หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, วิศวกรรมโทรคมนาคม . กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2544.

[2] C. Siva Ram Murthy. WDM optical networks: Concepts, design, and algorithms. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002

[3] L. H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee. Multicast Routing Algorithms and Protocols : A Tutorial IEEE Network 14 (January 2000): 90-102.

[4] L. H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks," *IEEE Communication Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 67-73, February 1999

[5] K. Tseng and J. Huang, "An Efficient Multicast Routing Algorithm in WDM Network", Communication, Circiut and System International Conference 2004, Vol.1, pp. 714-717,2004

[6] A. Khalil, C. Assi, A. Hadjiantonis, Nasser Abdellatif and M. A. Ali, "Multicast Traffic Grooming in WDM Network", Electrical and Computer Engineering 2004, Vol.2, pp. 785-88,May 2004

[7] Y. Zhou and G.Poo, "A New Multi-wavelength Multicast Wavelength Assignment (MMWA) Algorithm in Wavelength-Route WDM Network", IEEE International Conference 2004, Vol.3 , pp.1786-1790, 2004

[8] D. Yang and W. Liao, "Design of Light-Tree Based Logical Topologies for Multicast Stream in Wavelength Route Optical Network", IEEE Computer and Communication Conference 2003, Vol.1 , pp.3241, 2003

[9] B. Chen and J. Wang, "Efficient Routing and Wavelength Assignment for Multicast in WDM Network", IEEE Journal , Vol.20, pp.97-106, 2002

[10] B. Chen and J. Wang, "Constrained Wavelength Assignment for Multicast in WDM Network", Computer and Communication Network 2001 International Conference, pp. 388-394, October 2001

[11] H. Cheng and F. Lin, "A Capacipated Minimum-Cost Multicast Routing Algorithm for Multirate Multimedia Distribution", Intelligent Signal Processing and Communication System 2004, pp. 211- 216, November 2004

[12] Mehrdad Parsa, Qing Zhu and Garcia-Luna-Aceves, "An Iterative Algorithm for Delay-Constrained Minimum-Cost Multicasting", IEEE Transaction , Vol.6, pp.461-474, 1998

[13] X. Zhang, J. Wei, C. Qiao, "Constrained Multicast Routing in WDM Networks with Sparse Light Splitting," IEEE INFOCOM 2000, no. 1, pp. 1781-1790, March 2000.

[14] A. Zsigri, A. Guitton and M. Molnar, "Construction of Light-Tree for WDM Multicasting under Splitter Capability Constraints", Telecommunication International Conference 2003, Vol.1, pp. 171- 175, 2003

[15] N. Singhal, C. Ou and B. Mukherjee, "Share Protection for Multicast Sessions in Mesh Networks", Optical Fiber Communication Conference 2005, Vol.6, 2005

[16] N. Singhal and B. Mukherjee, "Architecture and Algorithm for Multicast in WDM Optical Mesh Networks using Opaque and Transparent Optical Cross Connect", Optical Fiber Communication Conference 2005, Vol.6, 2005

[17] N. Singhal and B. Mukherjee, "Protecting Multicast Sessions in WDM Optical Mesh Networks", Light wave Technology Journal, Vol.21, No.4, April 2003

[18] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Provision of Survivable Multicast Sessions Against Single Failures in Optical WDM Mesh Networks", Light wave Technology Journal, Vol.21, No.11, pp.2587-2594, November 2003

[19] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, "Protecting a Multicast Sessions Against Single Failures in a Mesh Network", IEEE International Conference, Vol. 2,pp. 1504-1508, May 2003

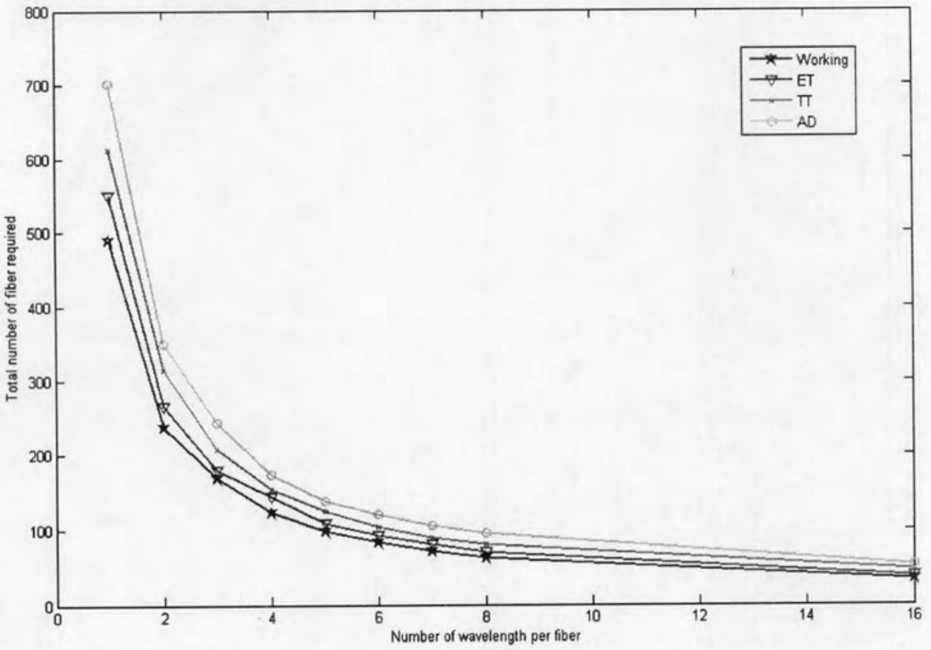
[20] A.Khalil, A. Hadjiantonis and M.A. Ali, "Pre-planed Multicast Protection Approaches in WDM Networks", Optical Communication ECOC 2005, pp. 25-26, September 2005

[21] C. Boworntummarat, S. Segkhoontod and L. Wuttisittikulkij, "Light-Tree Based Protection Strategies for Multicast Traffic in Transport WDM Networks with Multi-Fiber System", IEEE Communication Society, pp. 1791-1795, 2004

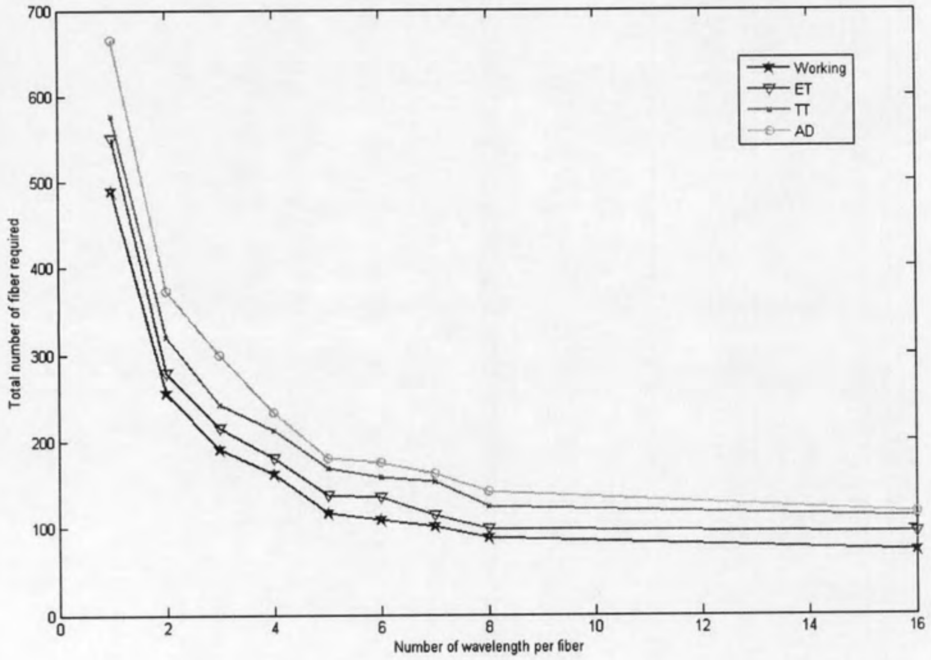
[22] C. Boworntummarat, "Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks," *A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in ElectricalEngineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University*, 2003.

ภาคผนวก

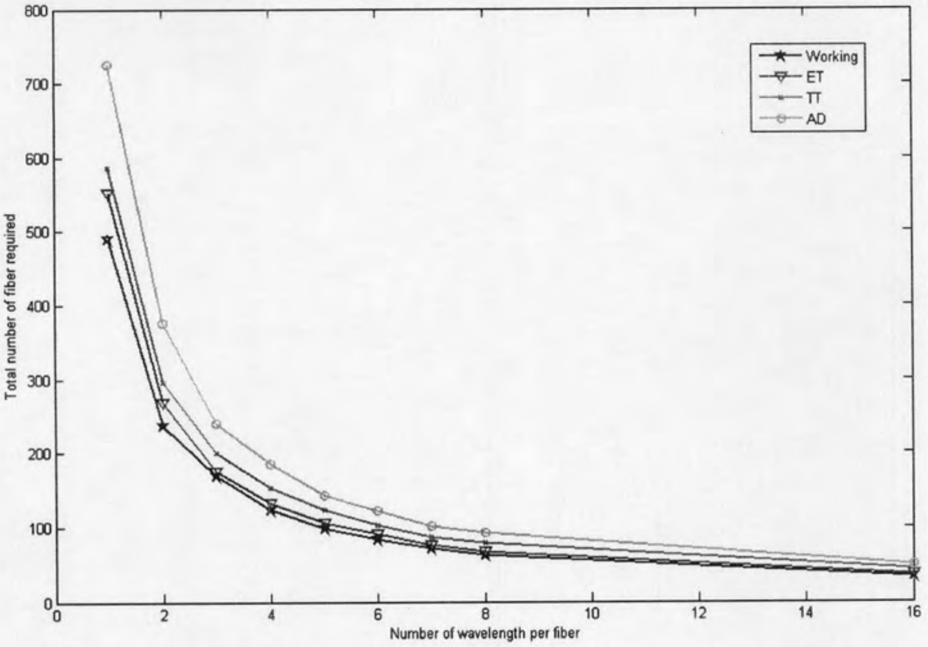
ภาคผนวก ก จำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด



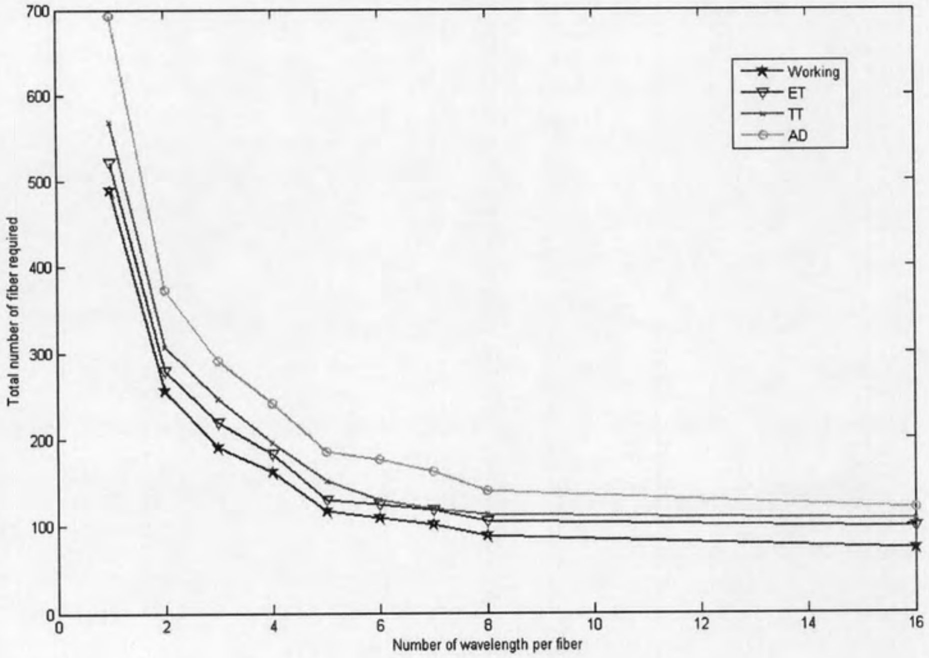
รูปที่ ก.1 โนด1เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



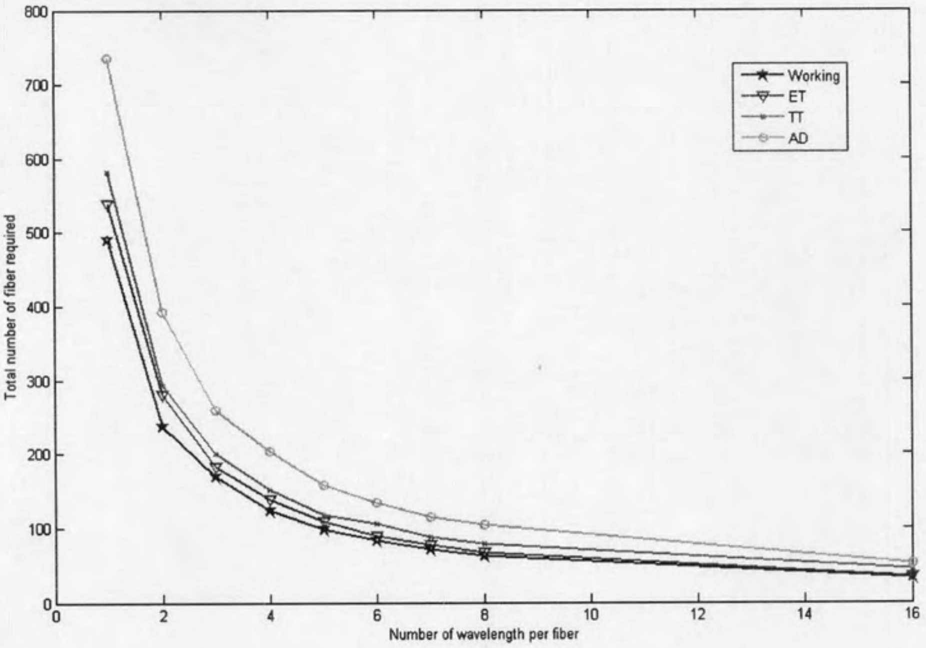
รูปที่ ก.2 โนด1เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



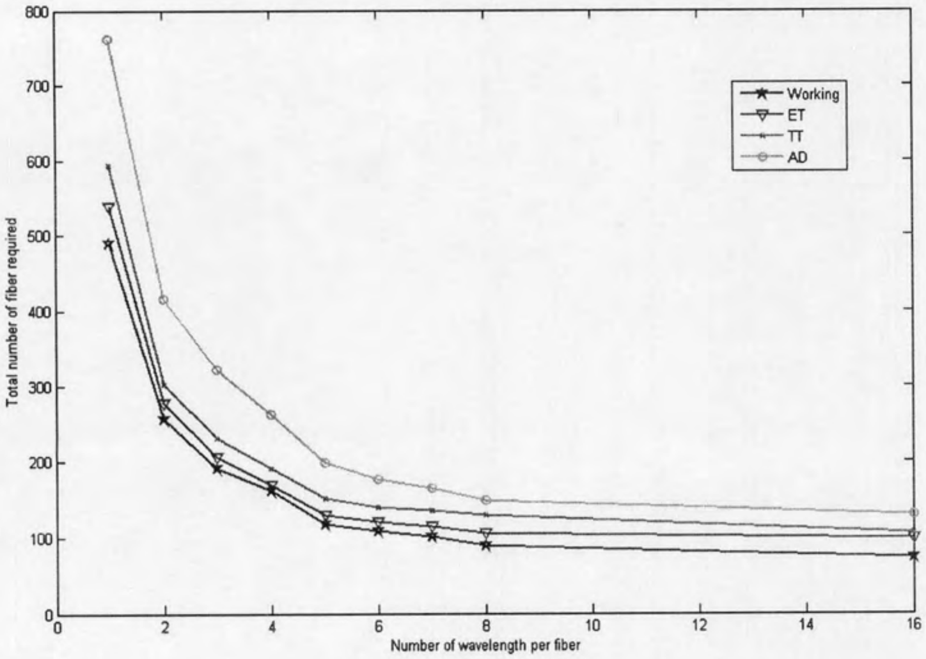
รูปที่ ก.3 โนด2เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



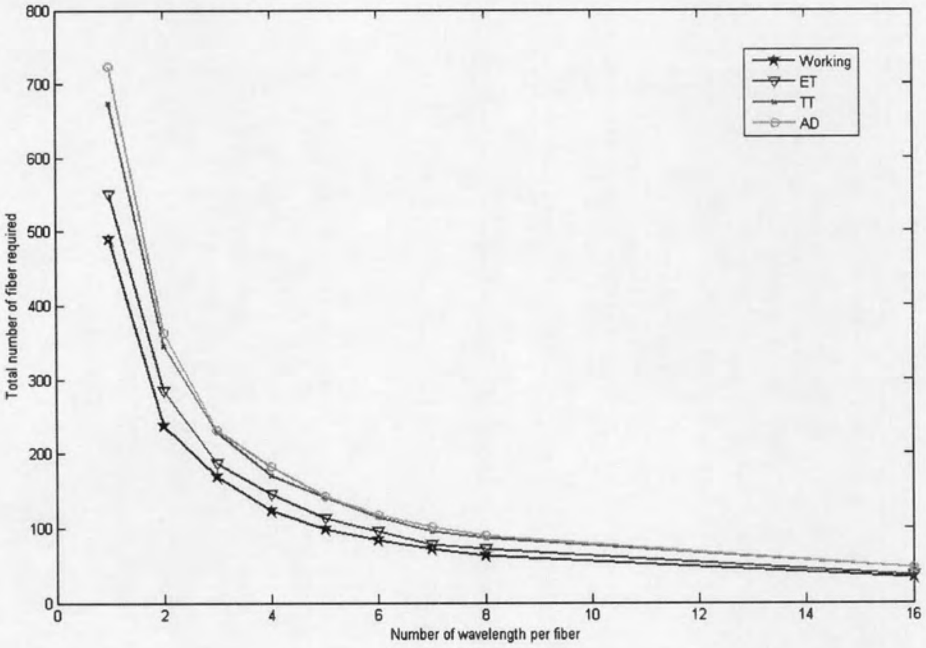
รูปที่ ก.4 โนด2เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



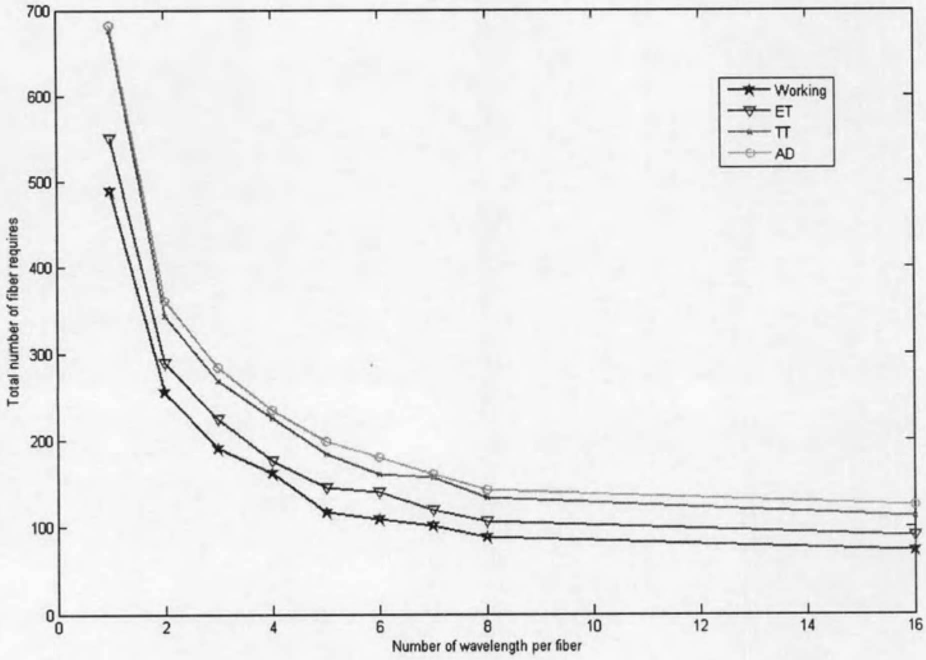
รูปที่ ก.5 โนด3เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



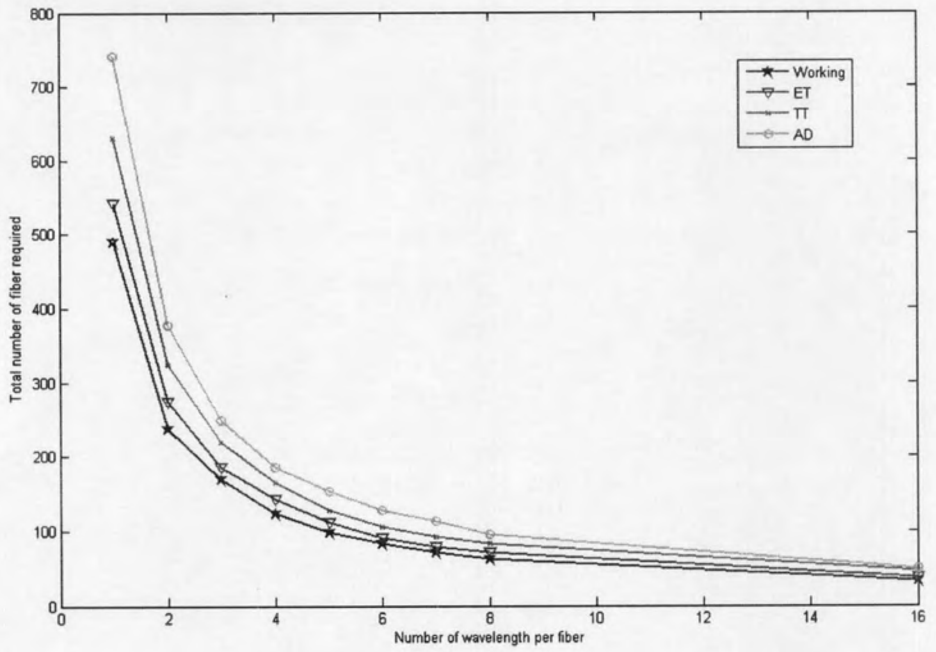
รูปที่ ก.6 โนด3เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



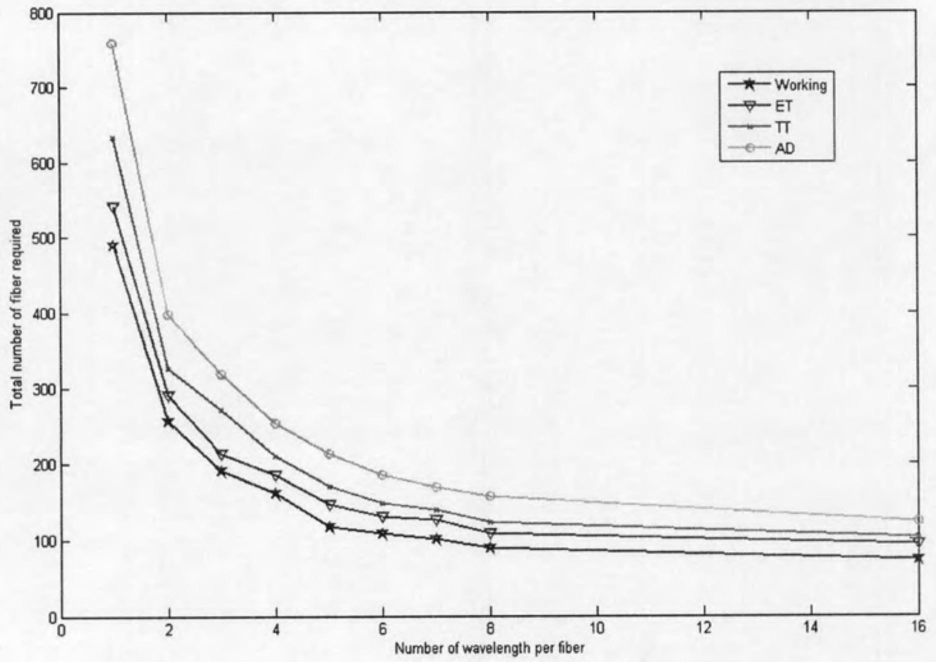
รูปที่ ก.7 โนด4เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



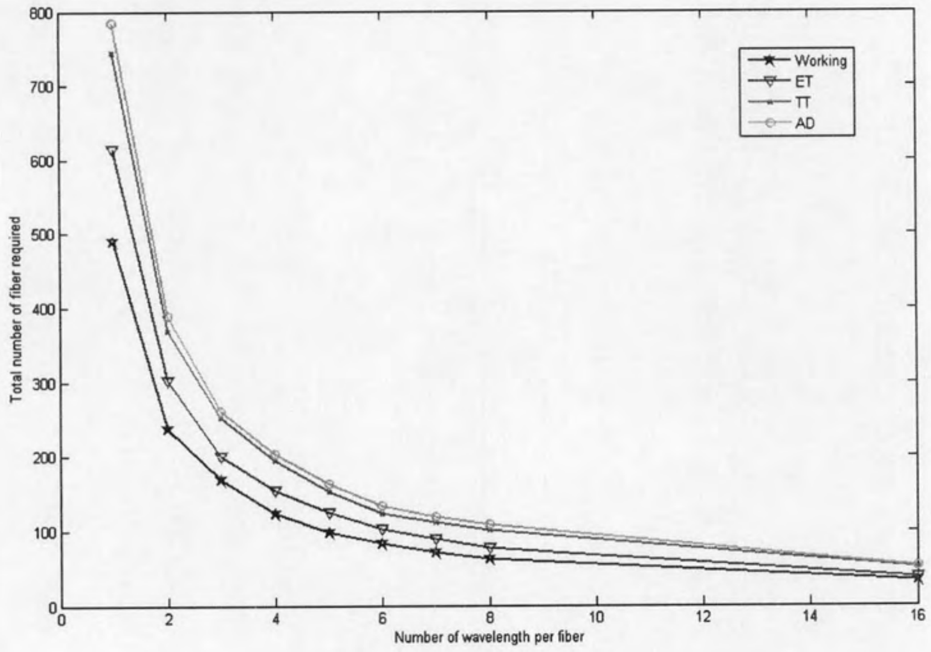
รูปที่ ก.8 โนด4เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



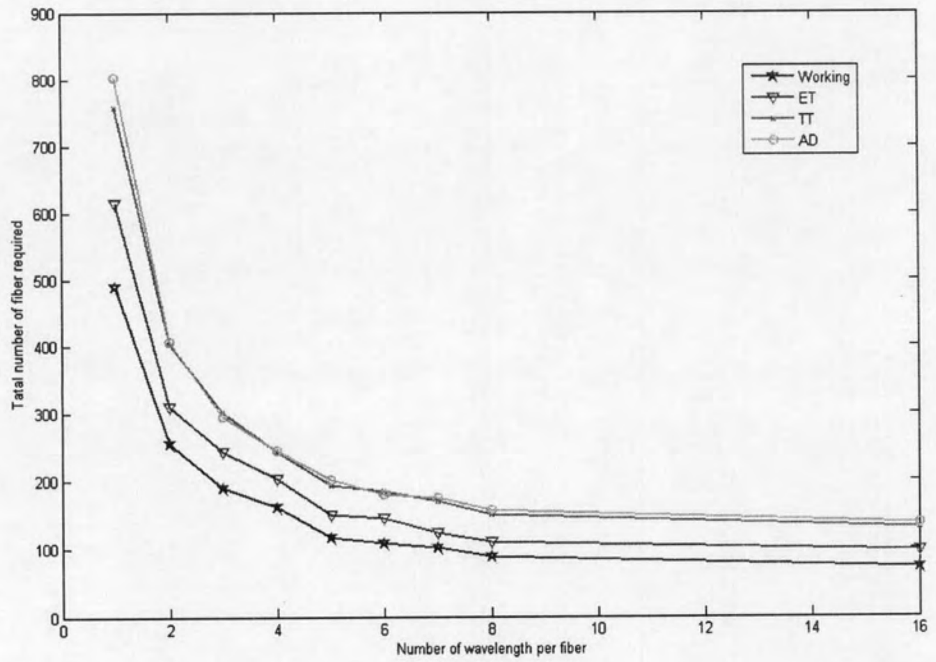
รูปที่ ก.9 โนด5เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



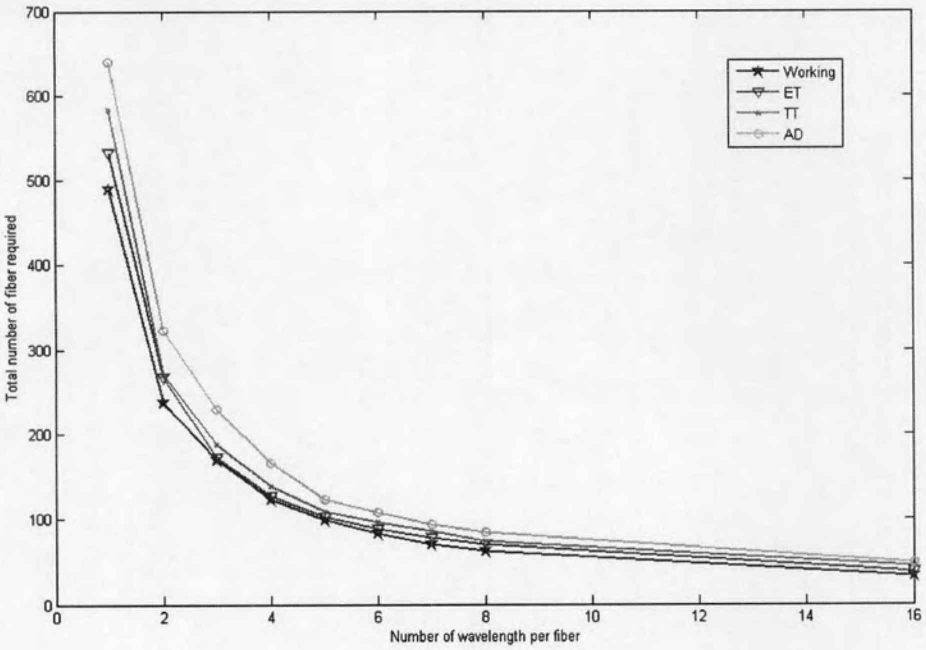
รูปที่ ก.10 โนด5เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



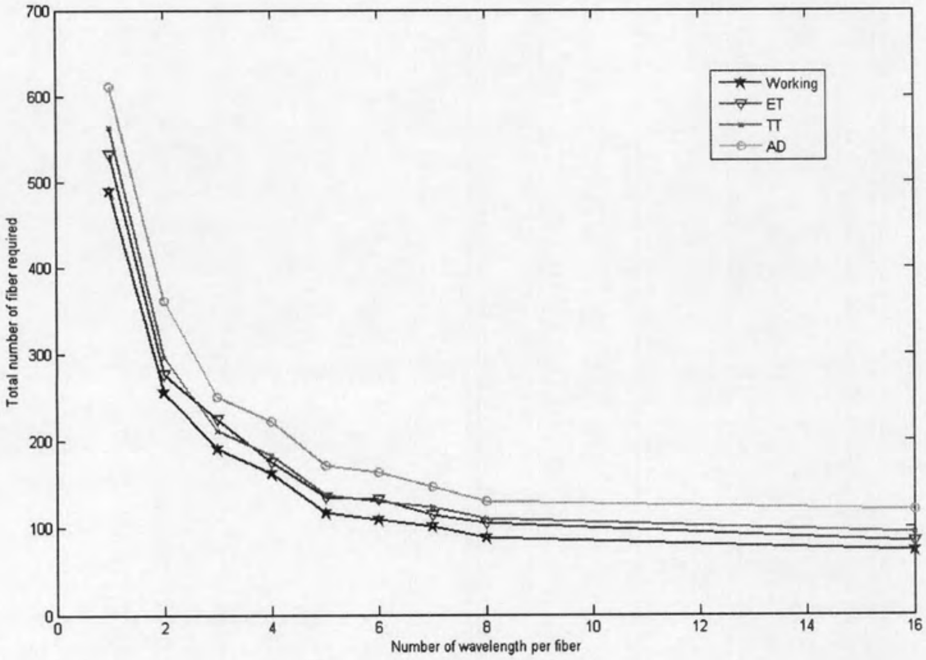
รูปที่ ก.11 โนด6เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



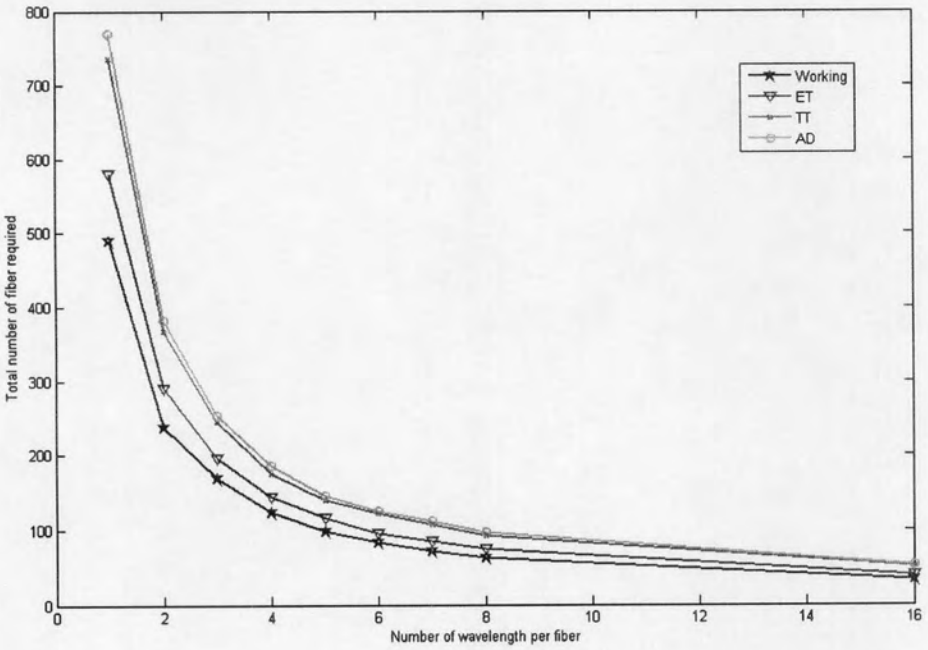
รูปที่ ก.12 โนด6เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



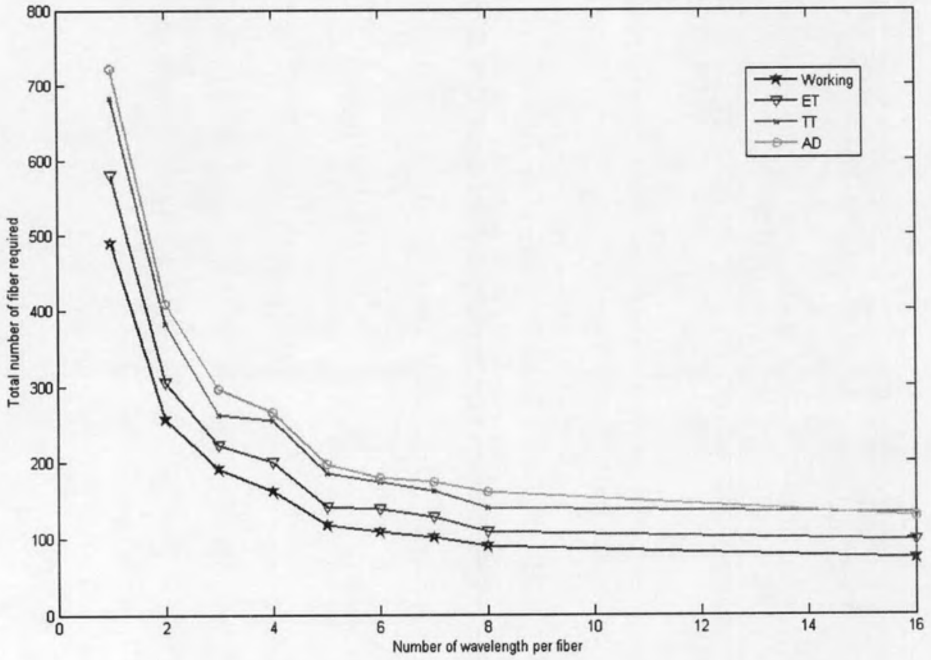
รูปที่ ก.13 โนด7เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



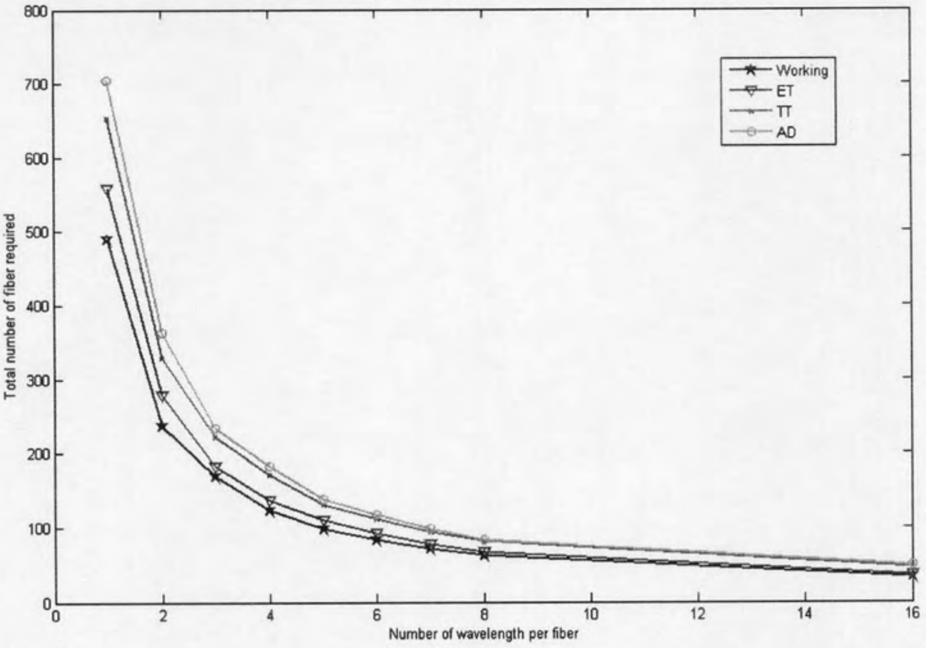
รูปที่ ก.14 โนด7เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



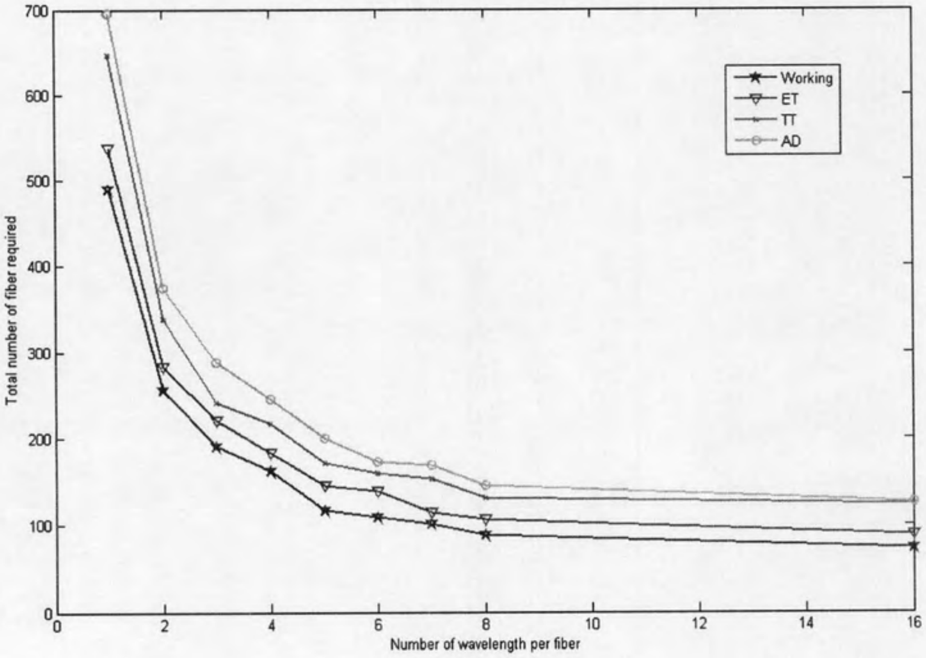
รูปที่ ก.15 โนด8เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



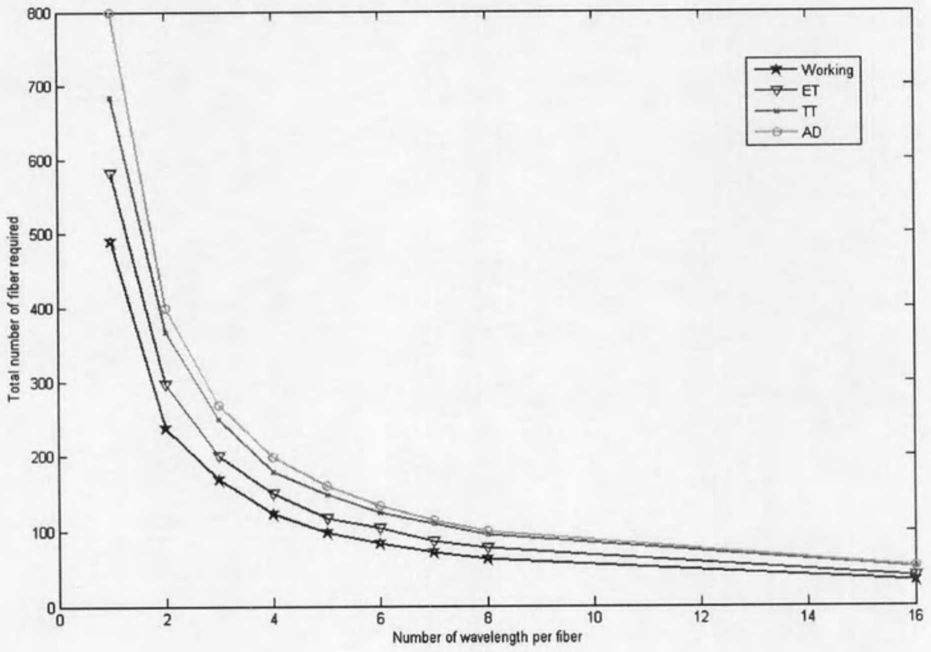
รูปที่ ก.16 โนด8เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



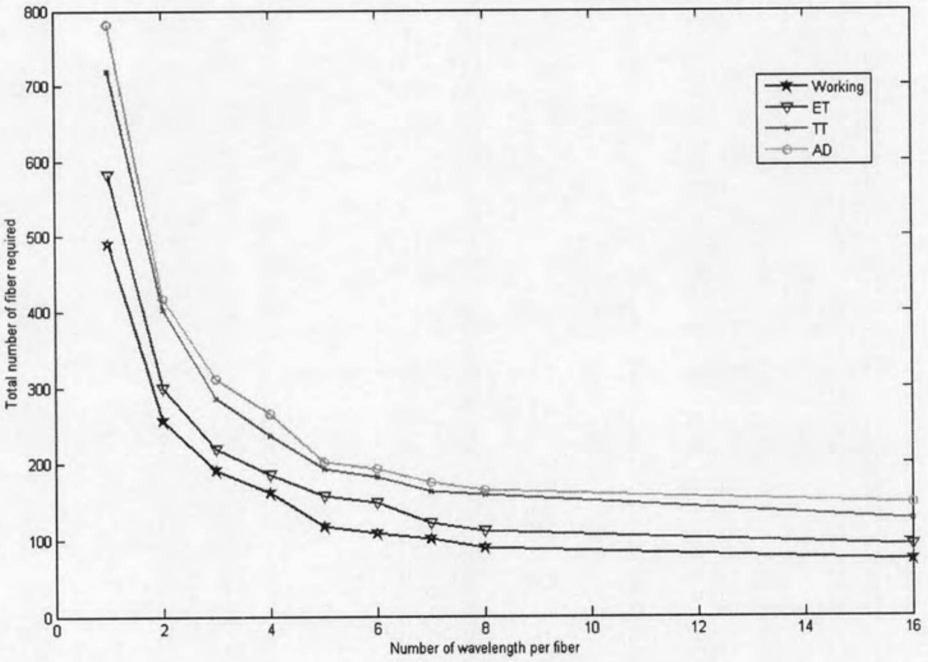
รูปที่ ก.17 โนด9เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



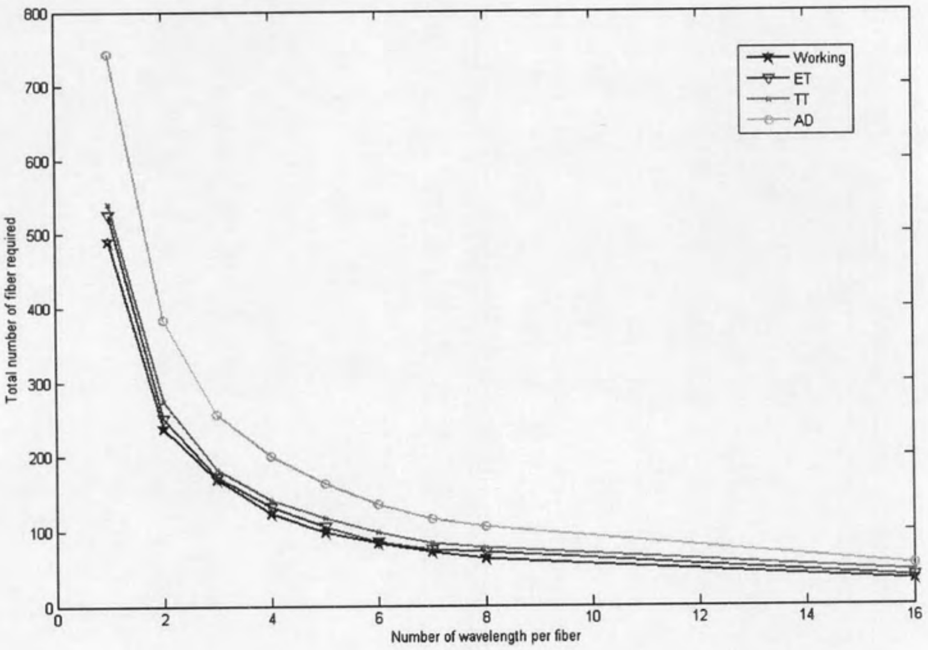
รูปที่ ก.18 โนด9เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



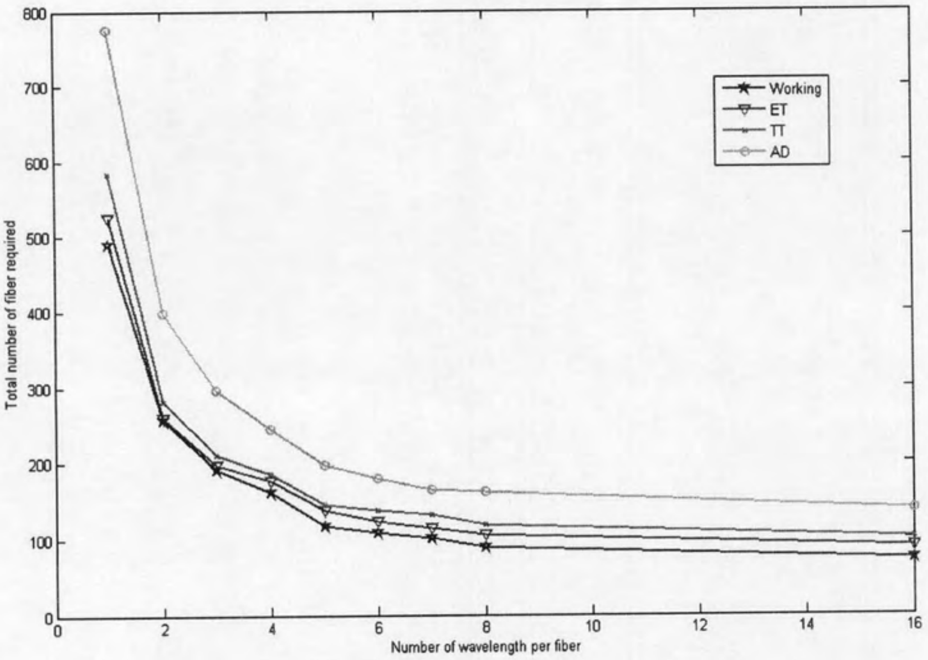
รูปที่ ก.19 โนด10เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



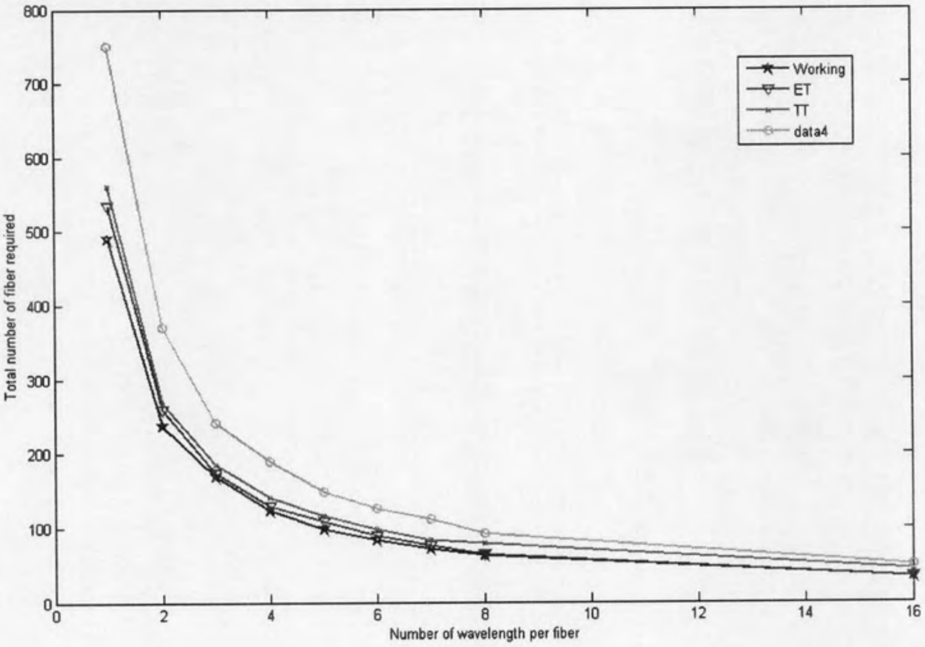
รูปที่ ก.20 โนด10เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



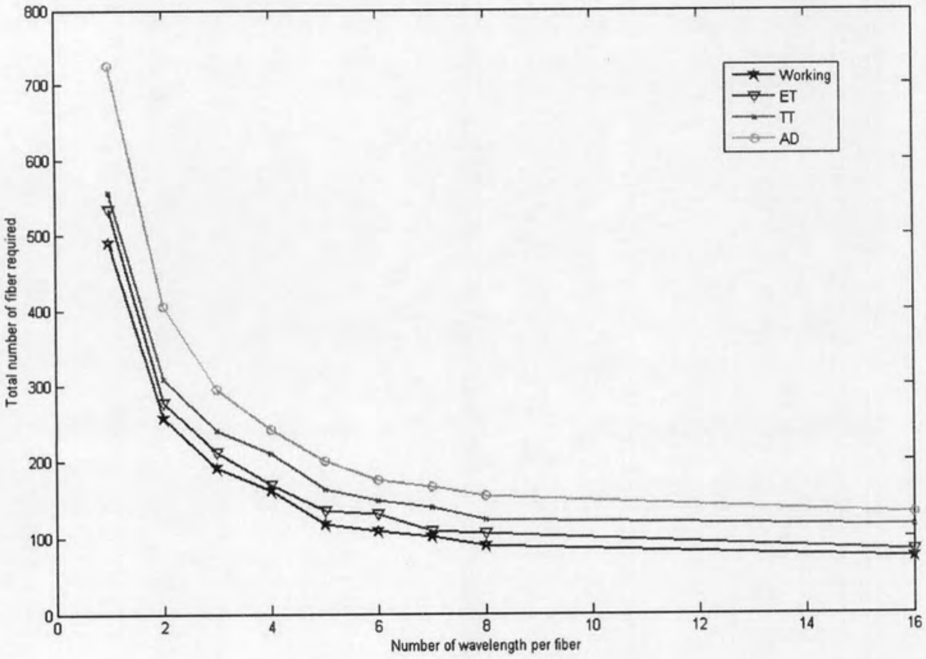
รูปที่ ก.21 โนด11เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



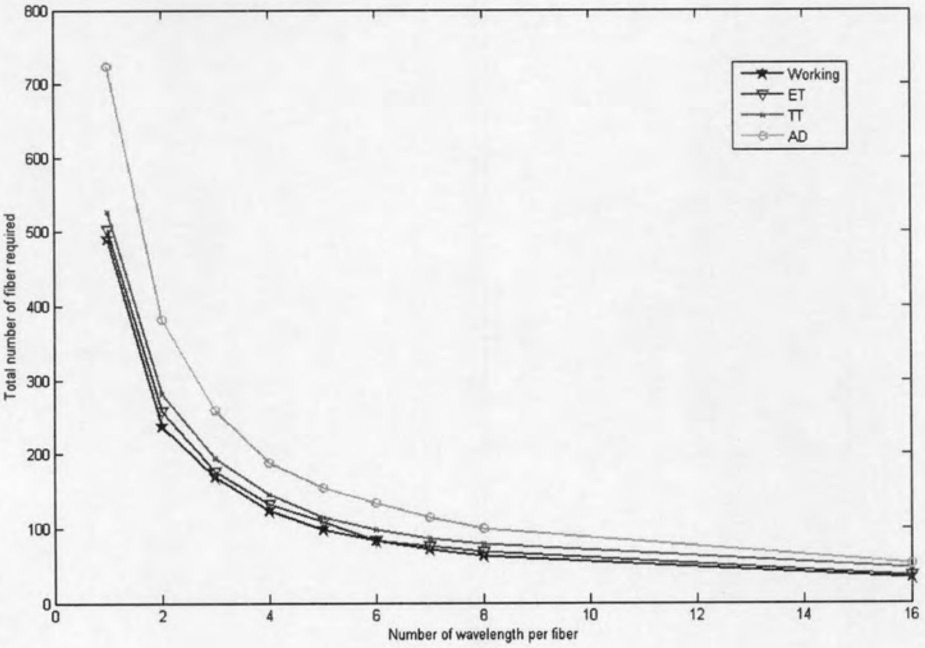
รูปที่ ก.22 โนด11เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



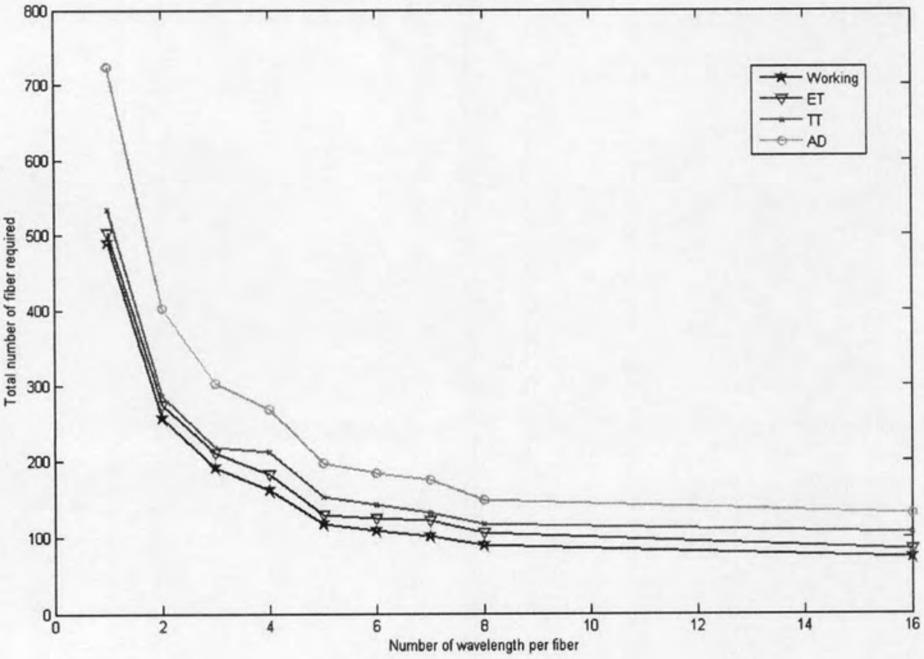
รูปที่ ก.23 โนด12เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



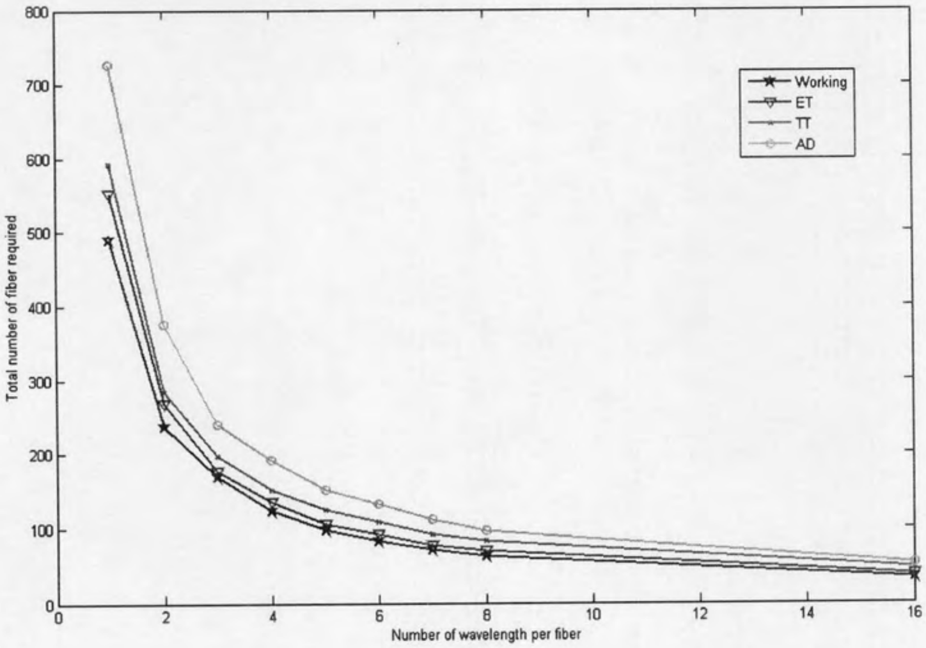
รูปที่ ก.24 โนด12เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



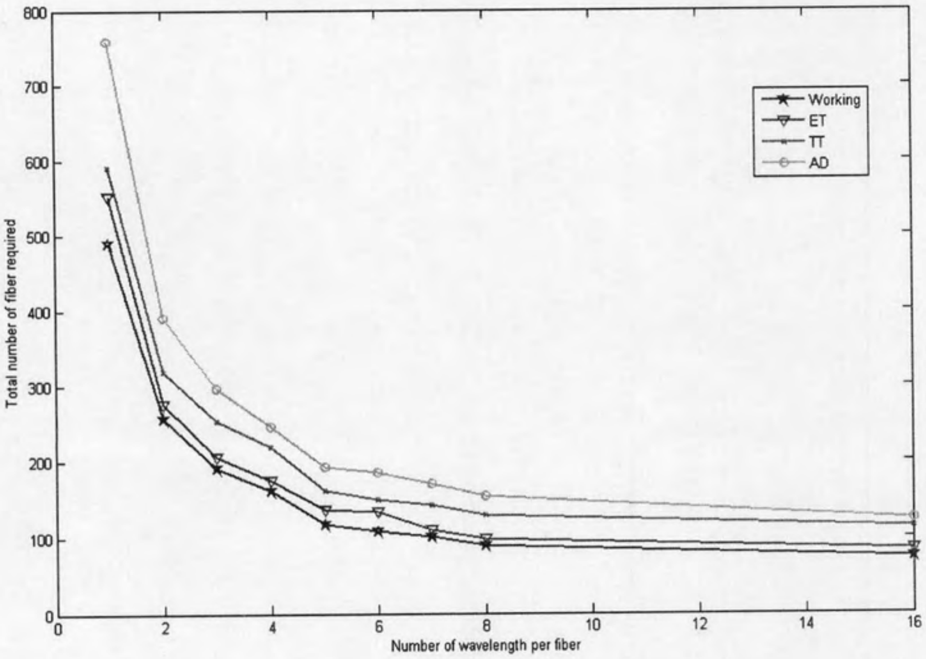
รูปที่ ก.25 โนด13เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ก.26 โนด13เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ก.27 โนด14เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ก.28 โนด14เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ตารางที่ ก.1 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 1 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่1 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	551	613	702	551	576	666
2	266	324	360	279	320	373
3	179	203	238	216	242	299
4	144	154	174	180	213	234
5	103	125	139	138	169	180
6	92	104	121	135	159	175
7	80	88	105	114	153	162
8	70	80	96	99	125	142
16	38	45	51	94	112	117

ตารางที่ ก.2 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 2 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่2 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	522	587	726	522	569	693
2	268	297	377	279	307	373
3	175	201	241	219	246	291
4	133	153	186	183	196	241
5	106	123	142	130	152	186
6	91	103	122	125	130	176
7	76	86	101	118	120	162
8	68	79	93	105	113	141
16	36	44	49	98	107	120

ตารางที่ ก.3 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 3 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่3 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	539	582	736	539	594	762
2	286	294	393	278	302	416
3	183	200	260	207	232	321
4	138	151	204	170	191	262
5	109	118	157	129	151	199
6	90	106	134	121	150	176
7	77	88	115	115	135	165
8	67	79	104	105	129	149
16	35	45	52	99	105	130

ตารางที่ ก.4 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด4 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่4 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	551	673	724	551	676	683
2	284	345	363	289	343	362
3	187	228	231	224	269	284
4	146	171	183	177	226	235
5	113	141	142	145	185	198
6	95	114	118	140	161	181
7	77	96	101	120	157	161
8	71	87	89	107	134	143
16	36	46	47	90	112	125

ตารางที่ ก.5 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 5 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่5 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	542	631	741	542	633	759
2	274	324	378	290	326	399
3	185	220	249	214	272	319
4	143	165	186	186	211	254
5	111	128	153	147	161	214
6	91	105	128	131	149	186
7	79	92	113	127	140	170
8	72	83	96	108	124	157
16	37	46	50	94	103	123

ตารางที่ ก.6 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 6 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่6 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	614	744	784	614	758	803
2	302	369	390	311	404	404
3	201	252	261	244	302	296
4	155	194	203	204	243	246
5	125	153	164	151	193	202
6	103	124	134	146	186	181
7	90	111	119	124	170	175
8	78	102	108	111	151	157
16	38	51	53	97	131	138

ตารางที่ ก.7 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 7 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่7 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	533	583	640	533	563	611
2	267	271	323	276	396	362
3	173	188	230	224	211	251
4	128	139	166	175	183	222
5	103	109	124	132	138	172
6	84	96	108	130	130	164
7	75	86	94	115	123	147
8	67	75	85	106	110	130
16	36	45	48	84	94	120

ตารางที่ ก.8 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 8 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่8 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	580	735	770	580	683	723
2	291	167	382	305	382	409
3	196	244	253	222	263	296
4	144	175	186	200	255	265
5	116	140	142	141	186	197
6	95	122	125	139	174	180
7	85	107	111	128	162	174
8	75	92	97	109	140	161
16	39	51	53	97	132	128

ตารางที่ ก.9 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 9 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่9 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	558	653	704	558	646	695
2	279	329	363	283	339	375
3	183	222	235	221	241	288
4	137	171	183	183	217	245
5	110	131	139	146	171	200
6	92	111	117	139	160	173
7	78	94	98	115	153	169
8	68	82	83	107	131	145
16	36	46	49	89	123	126

ตารางที่ ก.10 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 10 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่10 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	582	684	799	582	719	781
2	297	367	400	300	403	418
3	201	249	268	220	286	312
4	150	180	199	185	238	266
5	117	149	160	157	193	202
6	104	125	134	149	183	193
7	87	110	115	122	163	175
8	77	96	100	112	159	165
16	39	51	53	93	127	147

ตารางที่ ก.11 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 11 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่11 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	525	540	743	525	584	776
2	250	274	383	259	281	398
3	172	183	257	198	211	297
4	133	141	200	177	185	245
5	106	118	163	138	145	197
6	85	98	135	124	138	179
7	75	84	116	115	133	165
8	71	77	106	105	119	162
16	37	45	54	89	101	138

ตารางที่ ก.12 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 12 เสียหาย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่12 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	535	561	751	535	557	725
2	260	269	371	278	309	406
3	174	186	242	212	240	295
4	129	141	190	170	210	242
5	108	116	148	135	164	200
6	89	99	126	131	148	175
7	76	84	111	108	140	167
8	65	79	92	105	124	155
16	34	44	50	82	114	131

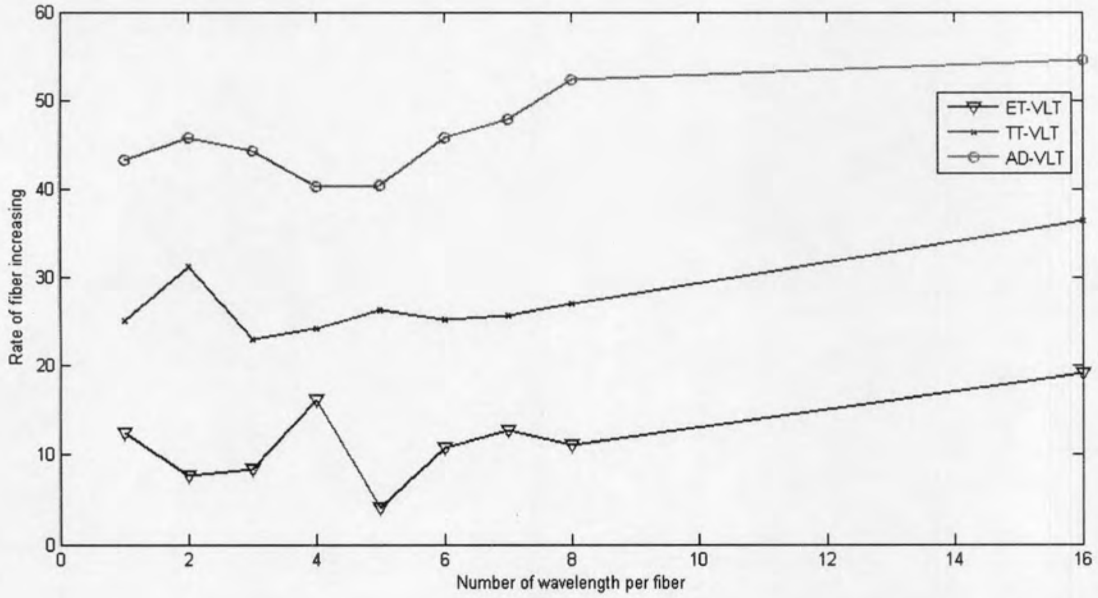
ตารางที่ ก.13 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 13 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่13 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	503	527	724	503	534	724
2	258	282	382	274	286	403
3	177	195	260	210	218	303
4	133	145	189	182	212	268
5	109	115	154	130	153	197
6	84	99	134	125	143	184
7	76	84	114	122	133	175
8	69	79	100	105	117	148
16	36	46	53	84	105	131

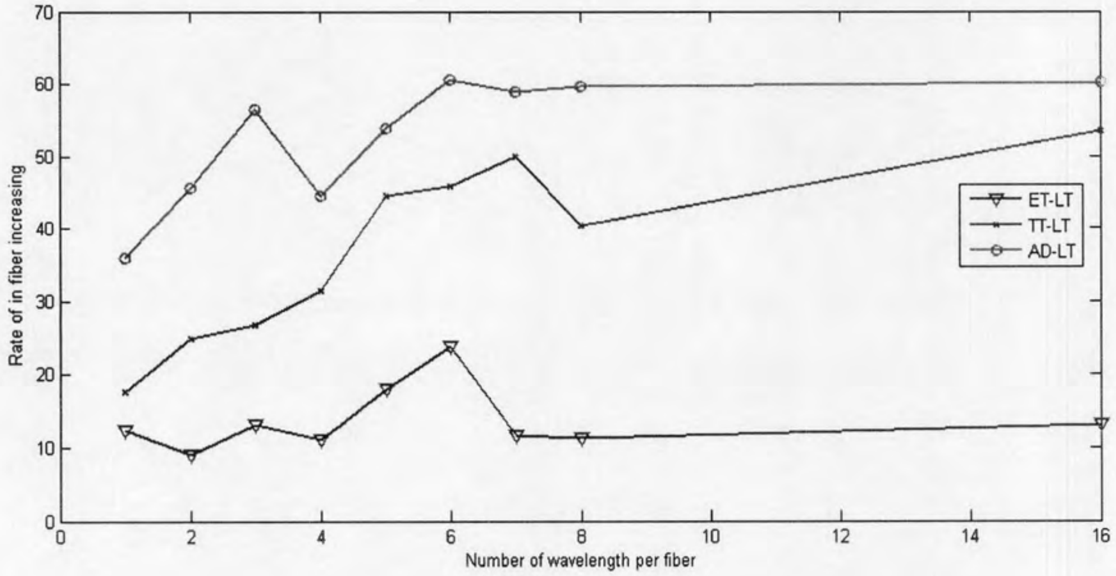
ตารางที่ ก.14 จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนด 14 เสียหาย

จำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่14 เสียหายในโครงข่าย						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	552	592	727	552	591	759
2	268	285	376	276	319	391
3	176	197	241	207	253	296
4	136	151	192	175	219	246
5	106	125	152	137	162	193
6	92	109	132	134	150	185
7	78	93	111	110	142	171
8	70	83	97	99	129	154
16	38	46	53	89	113	124

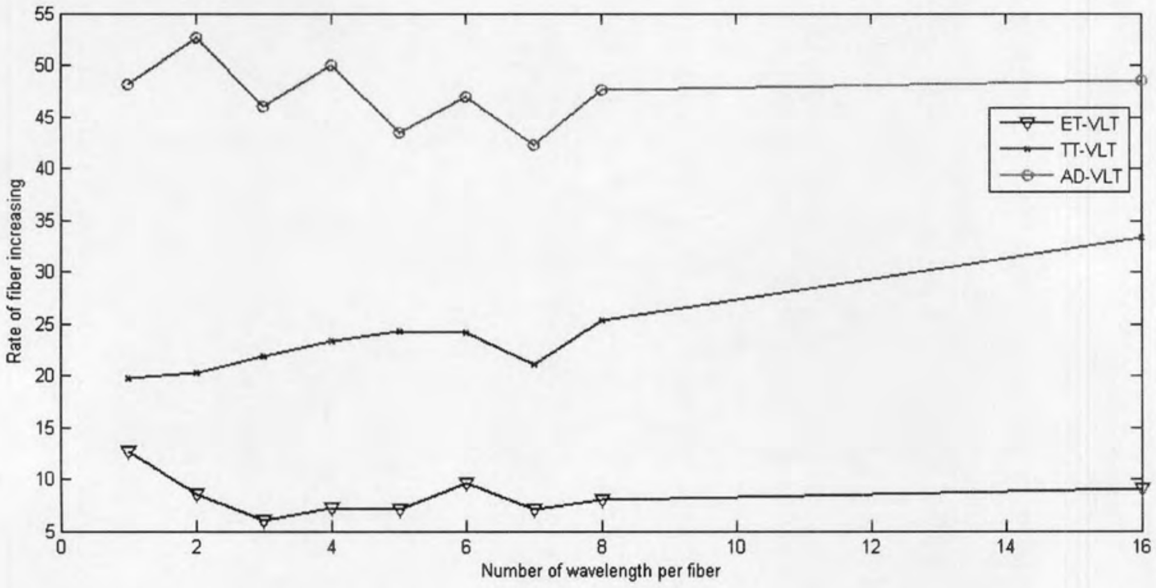
ภาคผนวก ข อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด



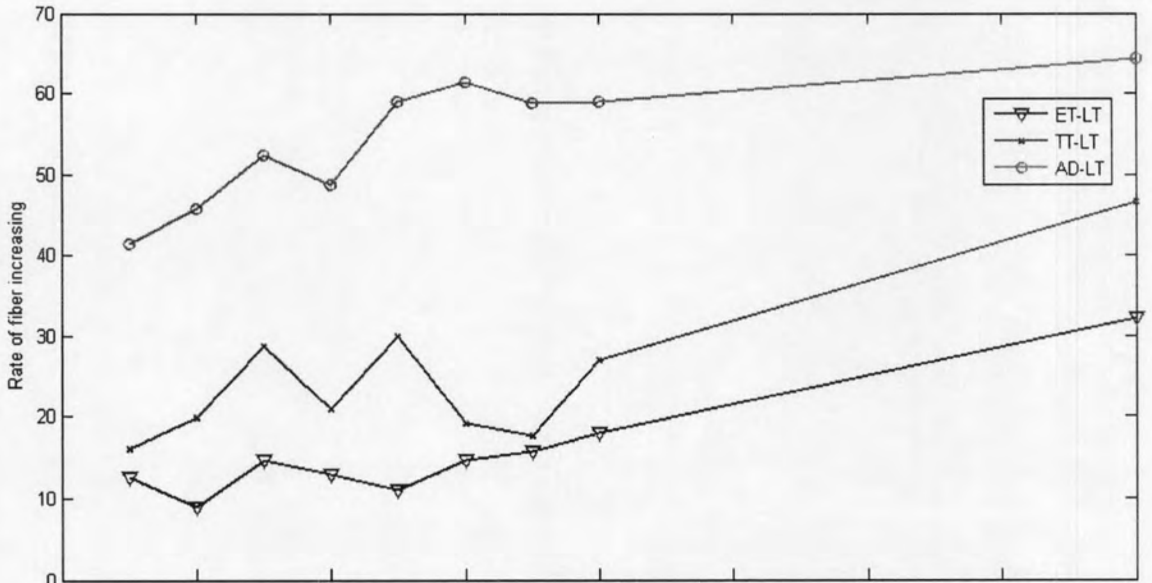
รูปที่ ข.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด1เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



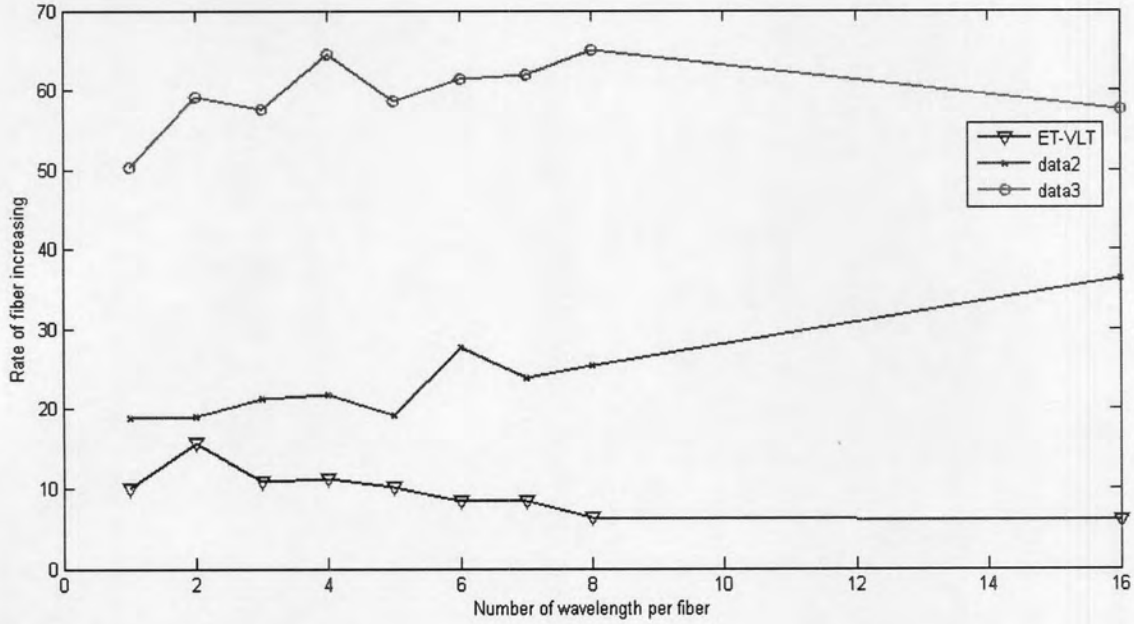
รูปที่ ข.2 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด1เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



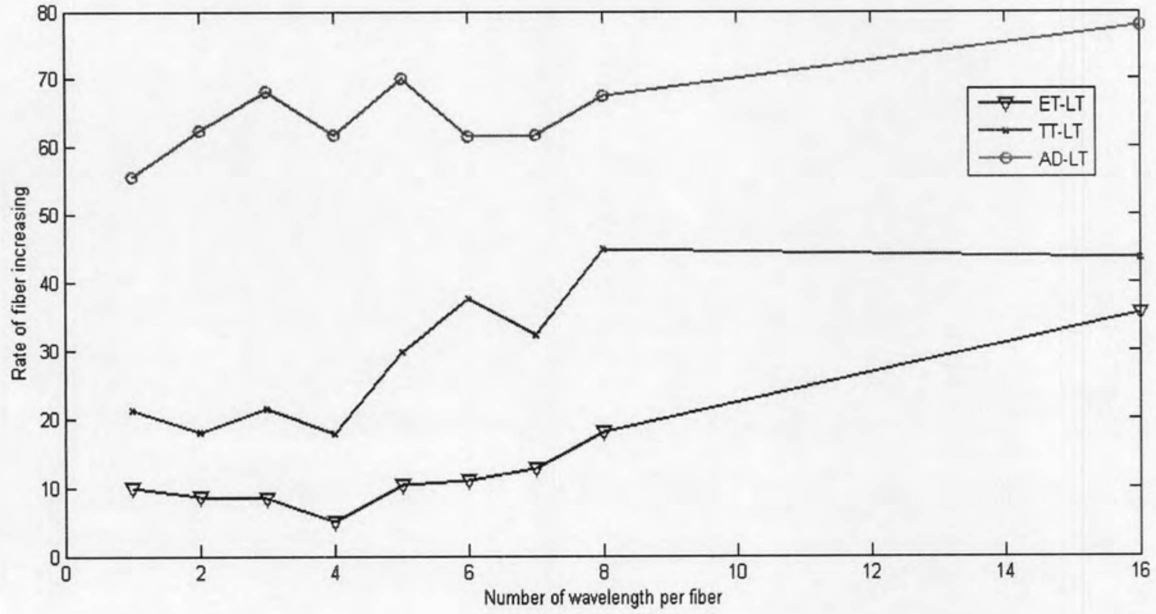
รูปที่ ข.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด2เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



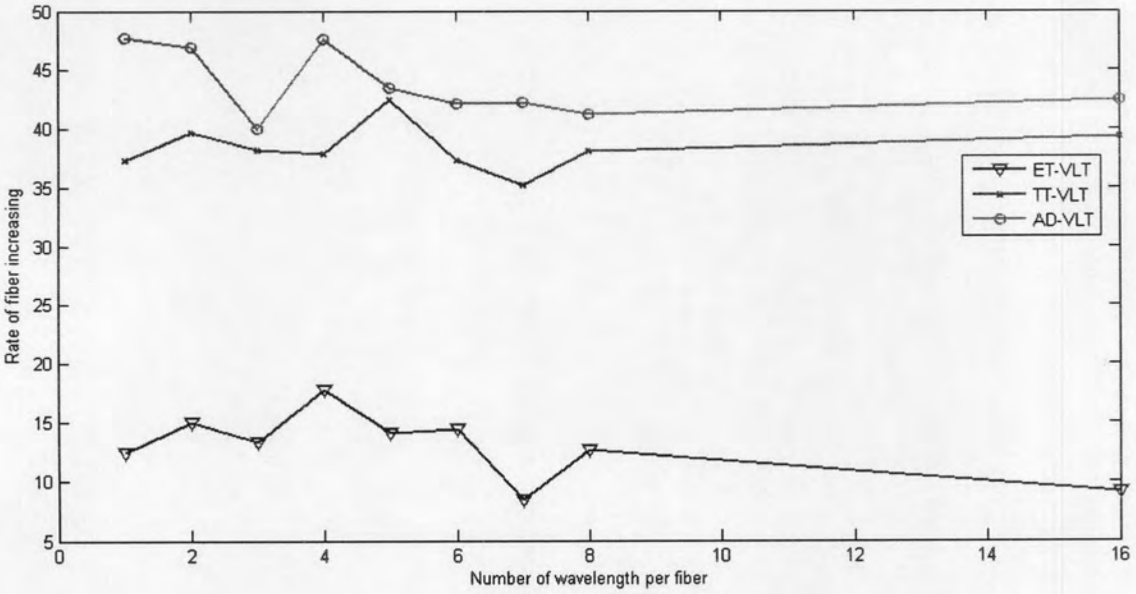
รูปที่ ข.4 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด2เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



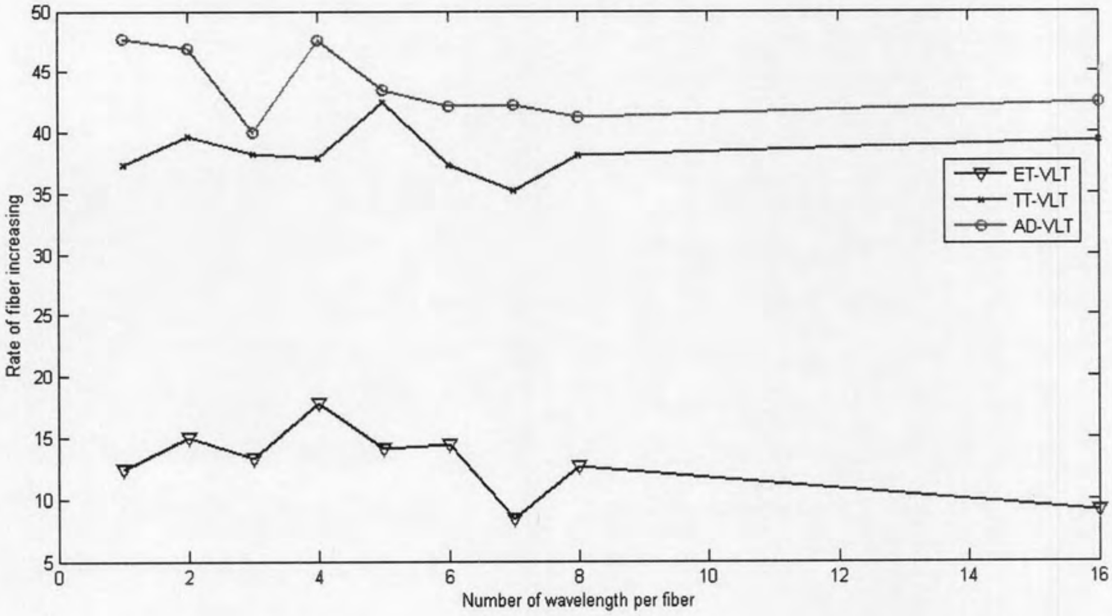
รูปที่ ข.5 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด3เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



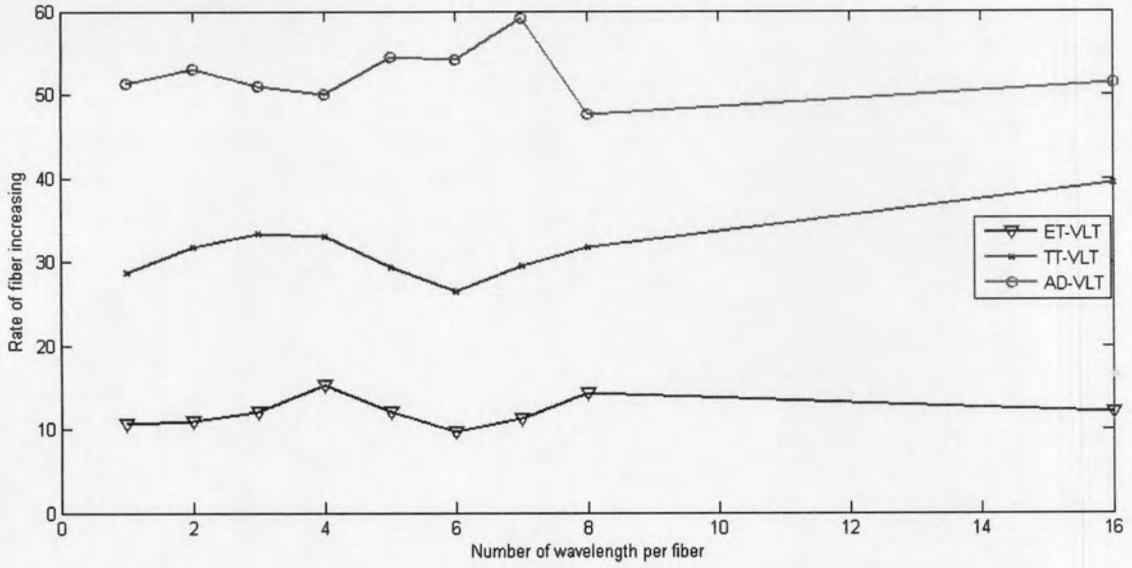
รูปที่ ข.6 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด3เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



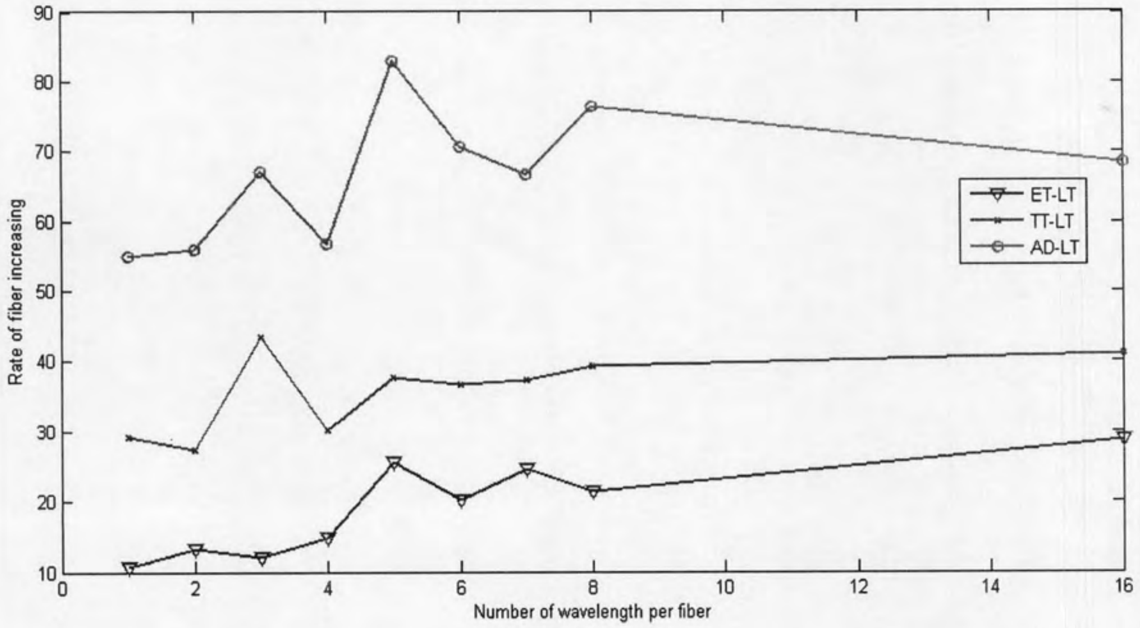
รูปที่ ข.7 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด4เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



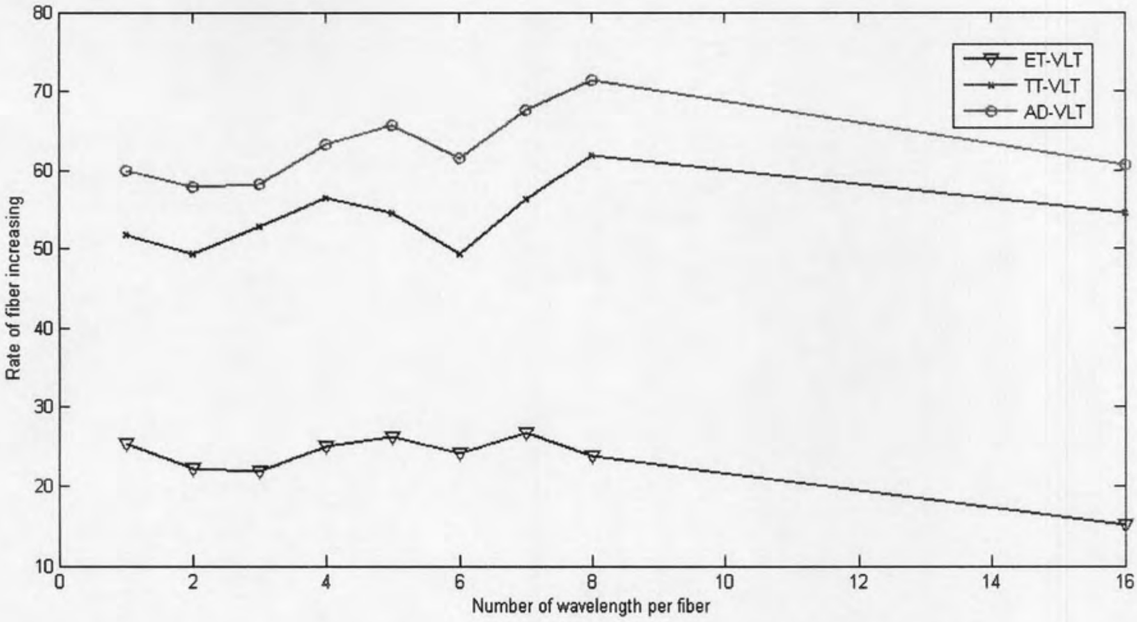
รูปที่ ข.8 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด4เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



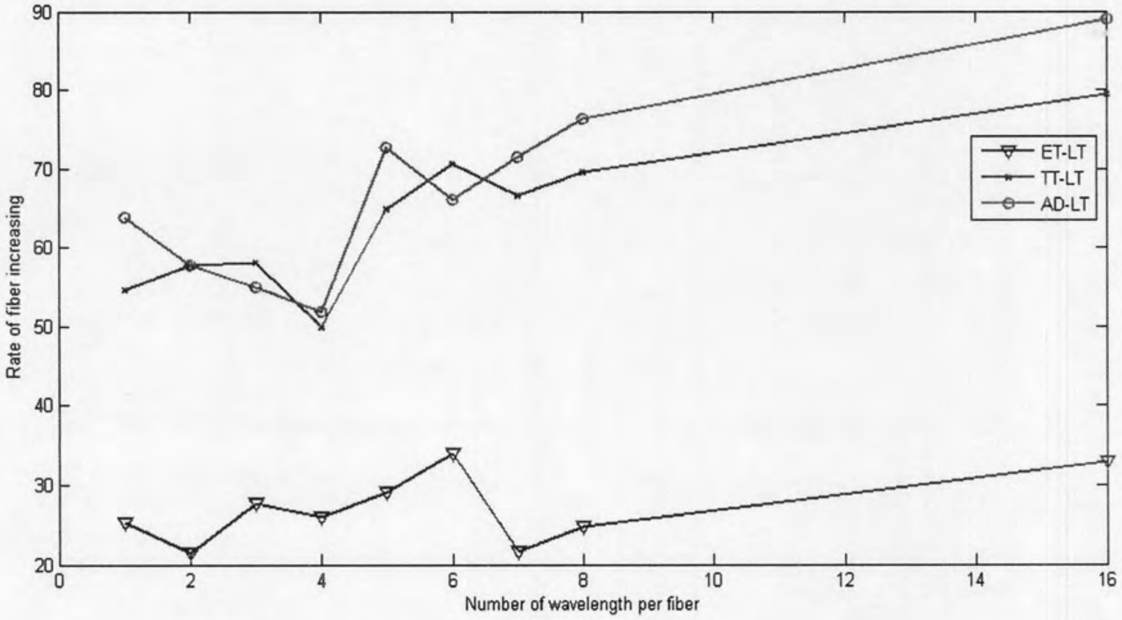
รูปที่ ข.9 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด5เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



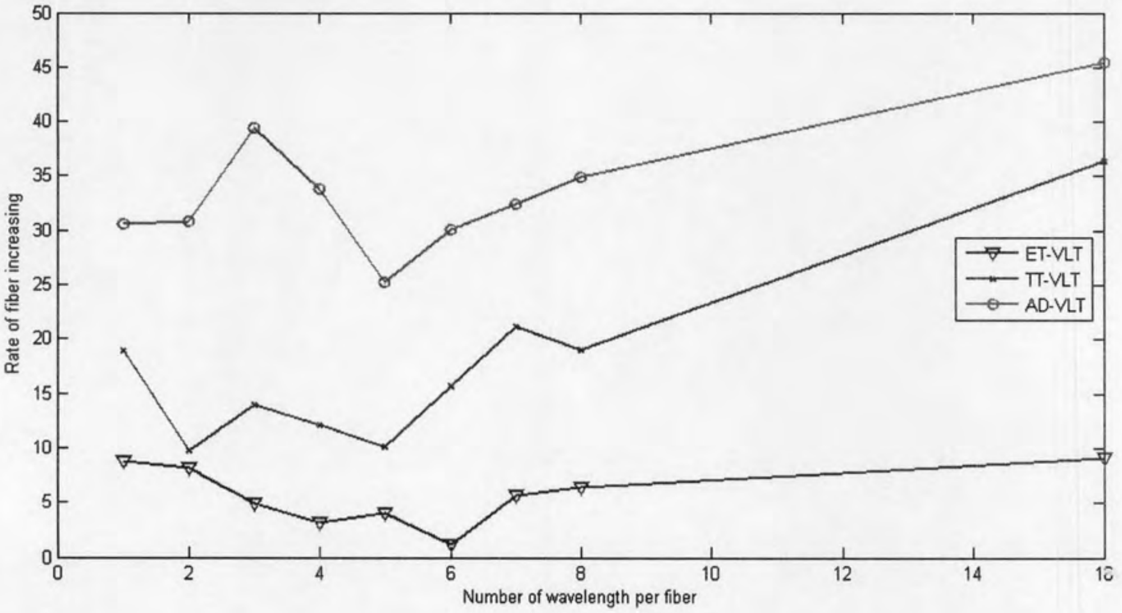
รูปที่ ข.10 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด5เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



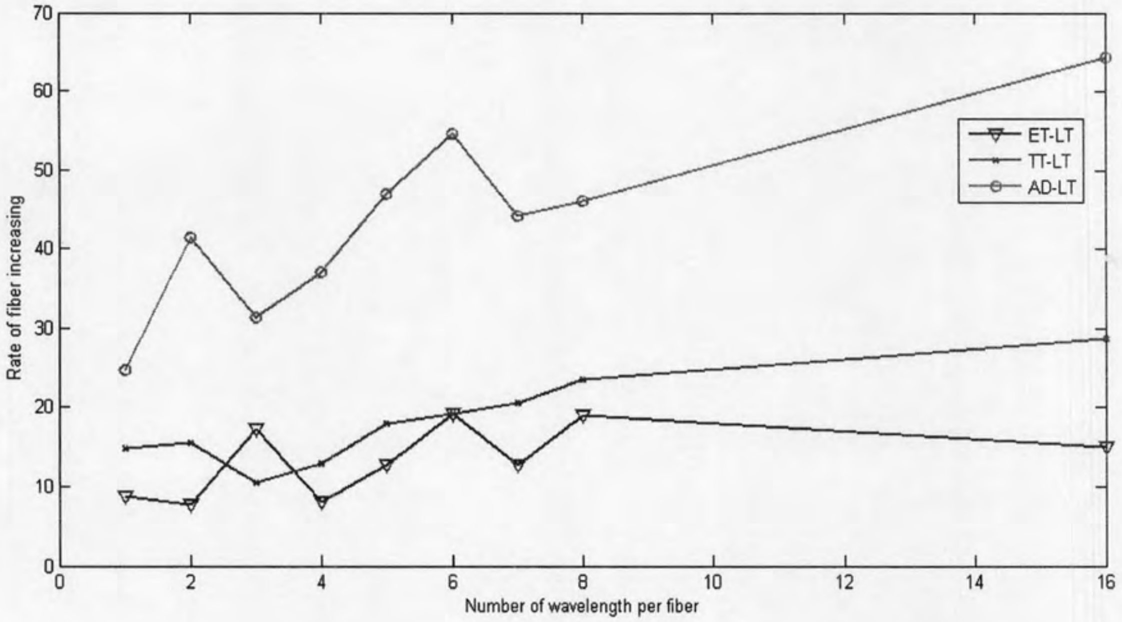
รูปที่ ข.11 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด6เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



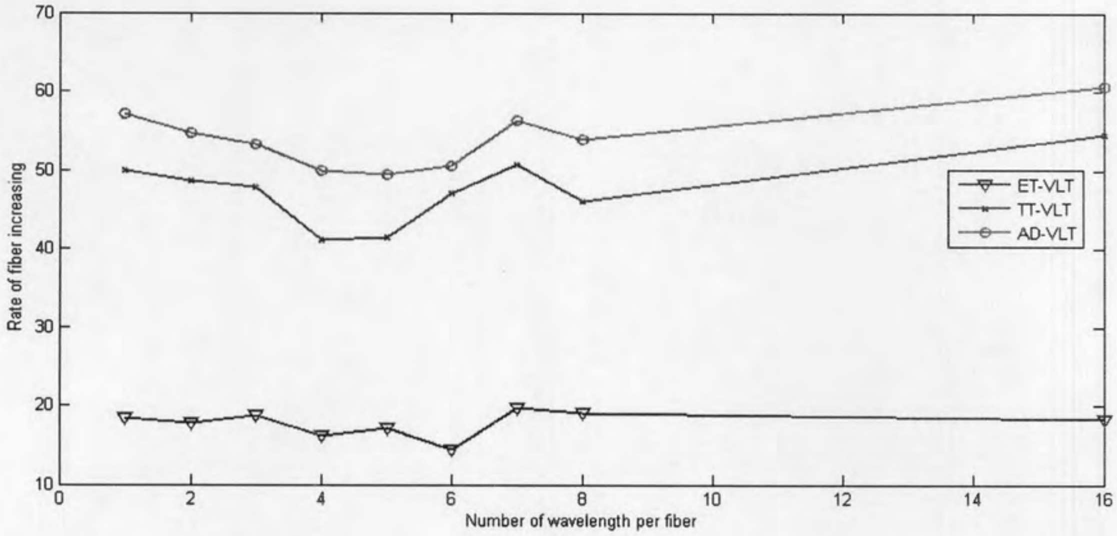
รูปที่ ข.12 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด6เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



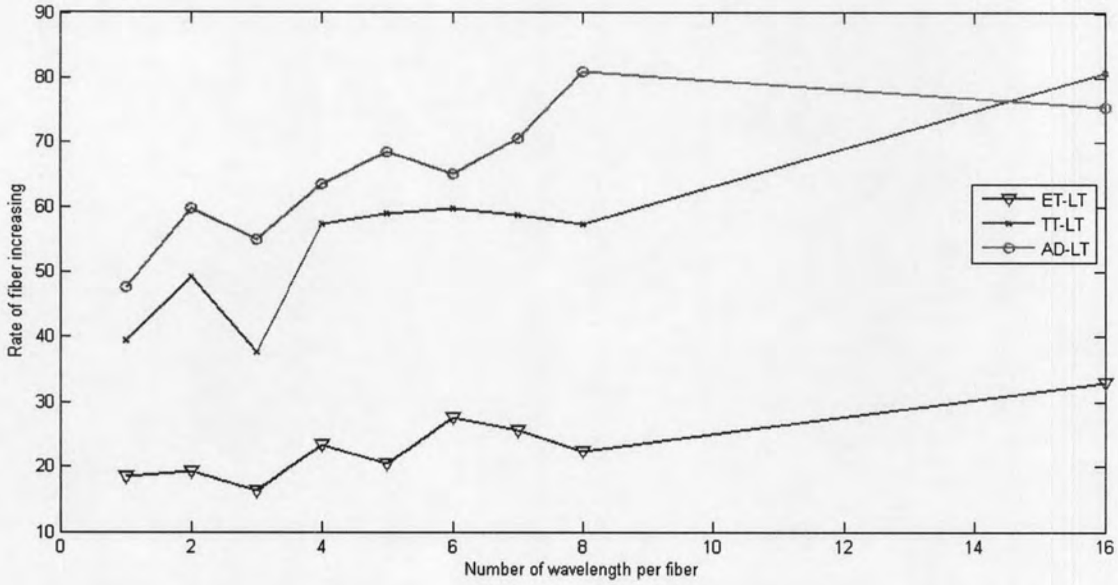
รูปที่ ข.13 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



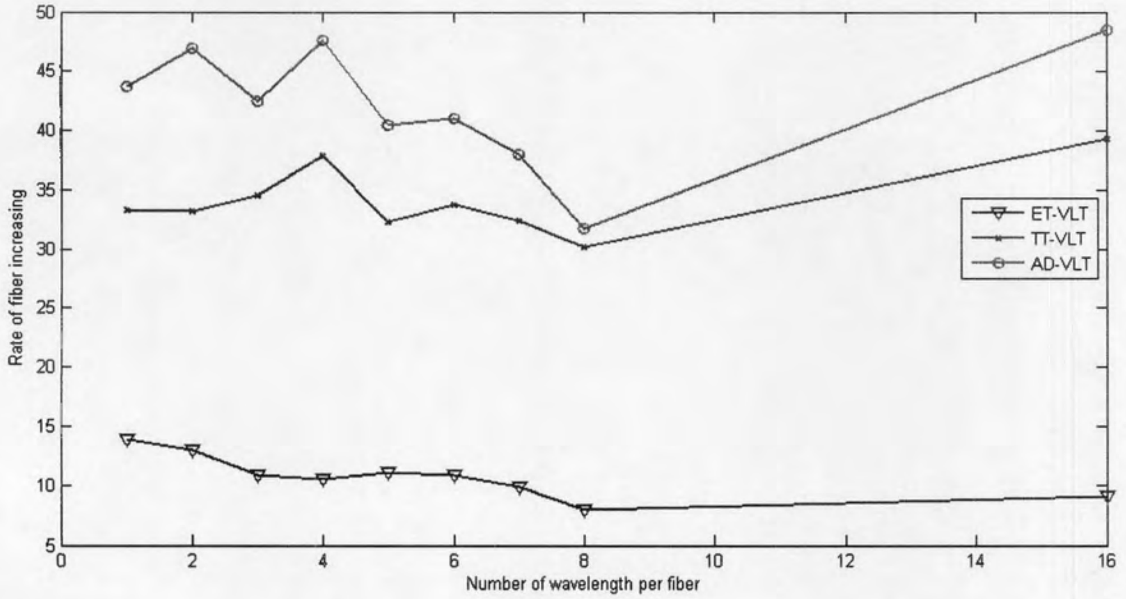
รูปที่ ข.14 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



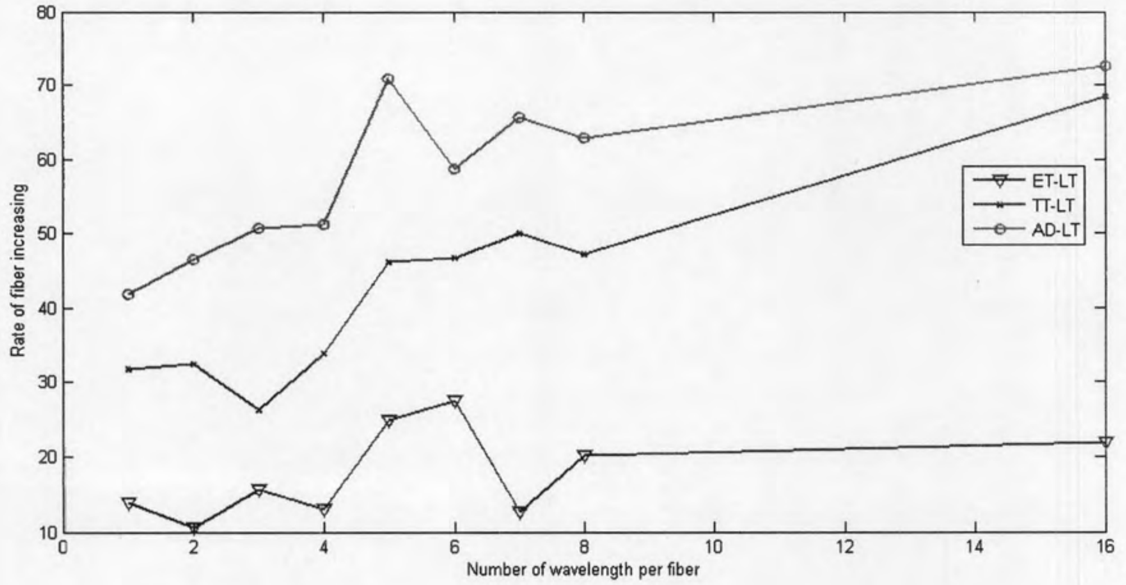
รูปที่ ข.15 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



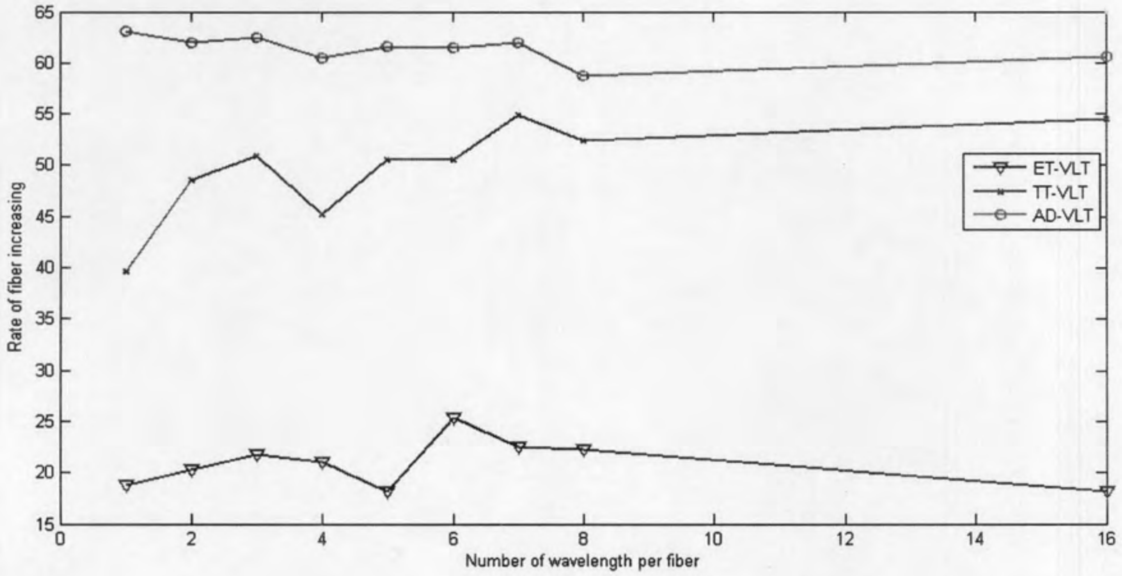
รูปที่ ข.16 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



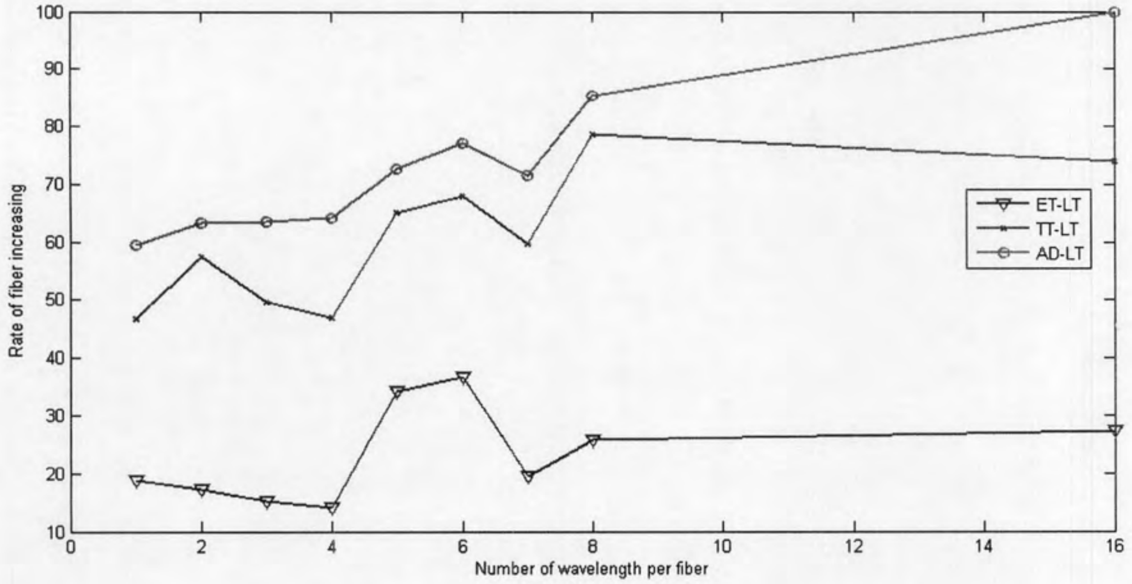
รูปที่ ข.17 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด9เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



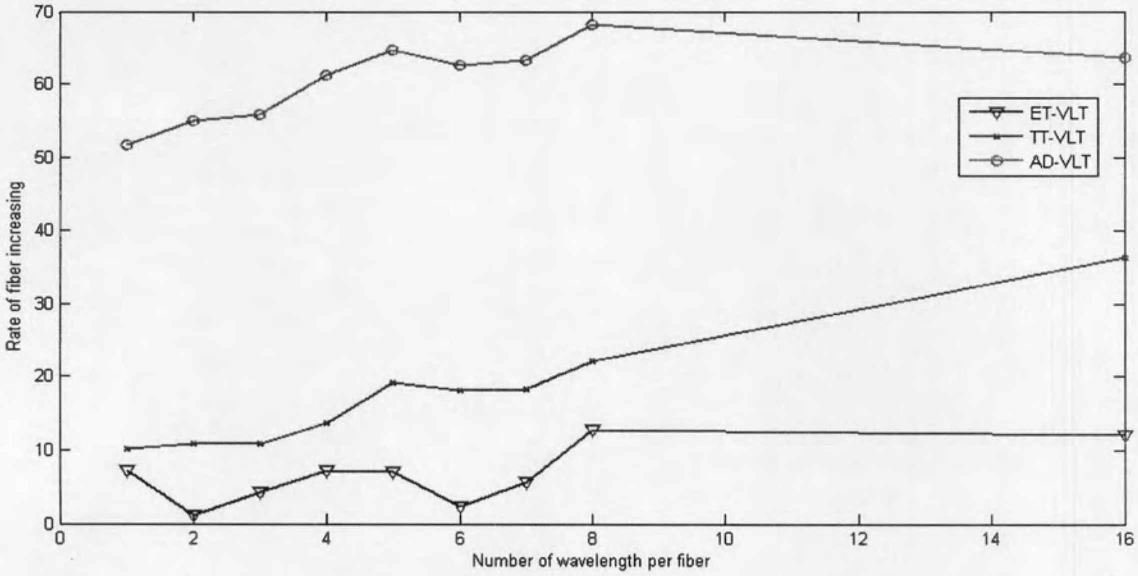
รูปที่ ข.18 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด9เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



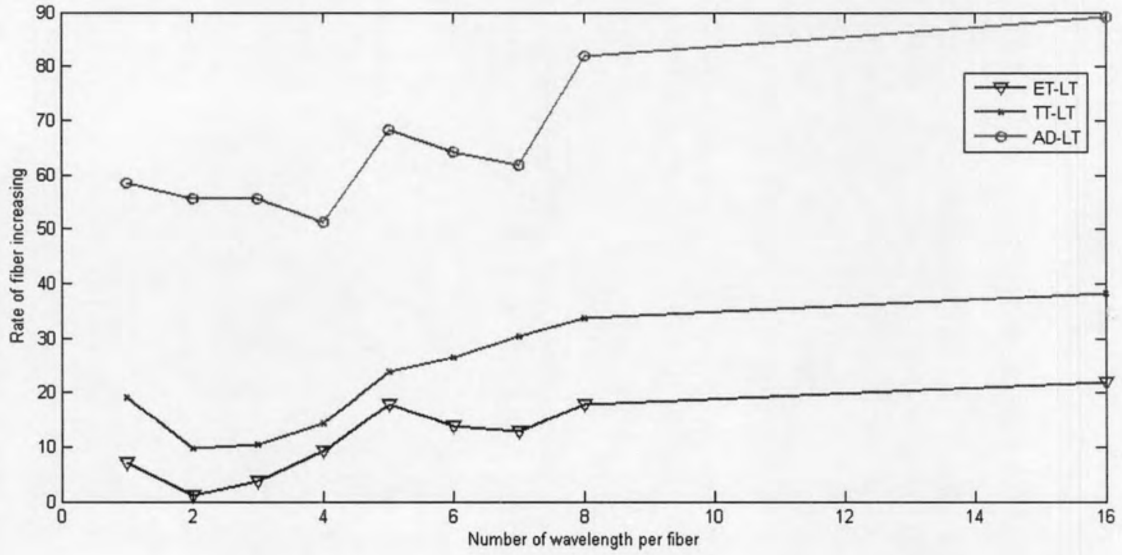
รูปที่ ข.19 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด10เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



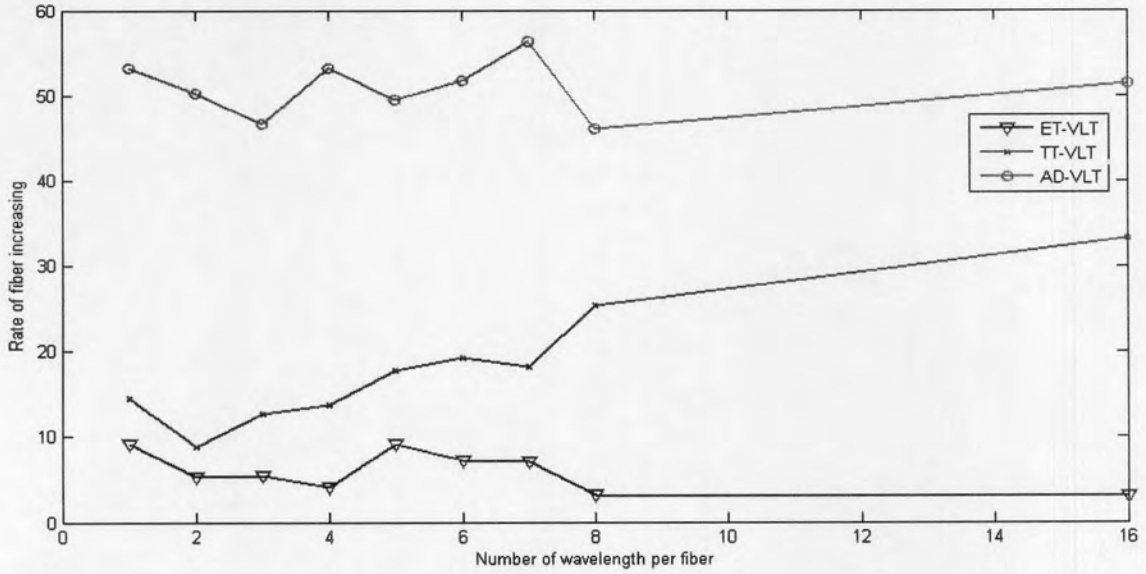
รูปที่ ข.20 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด10เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



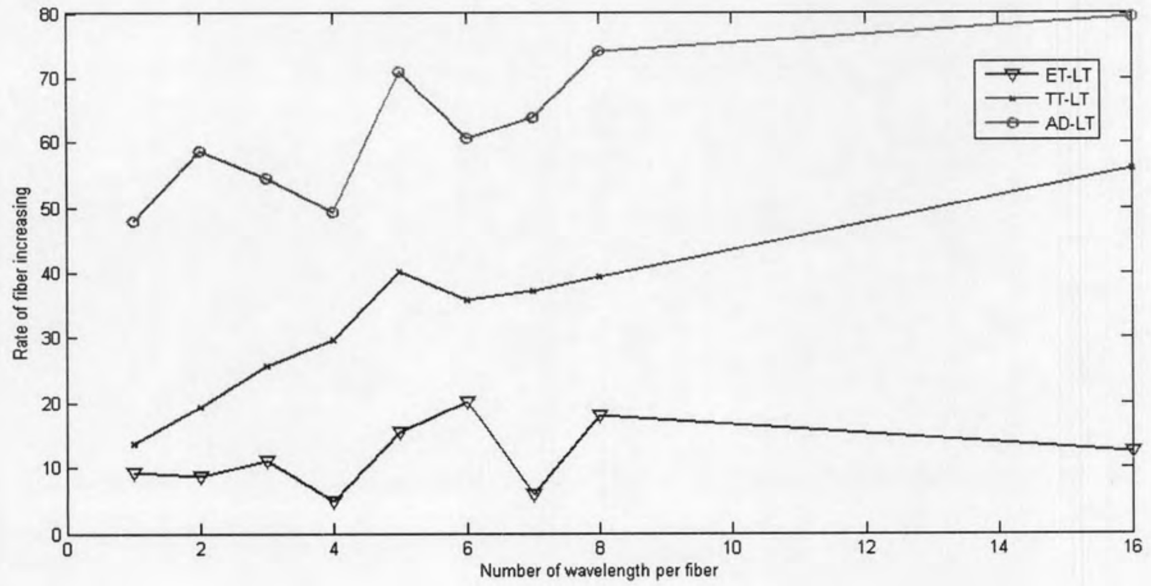
รูปที่ ข.21 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



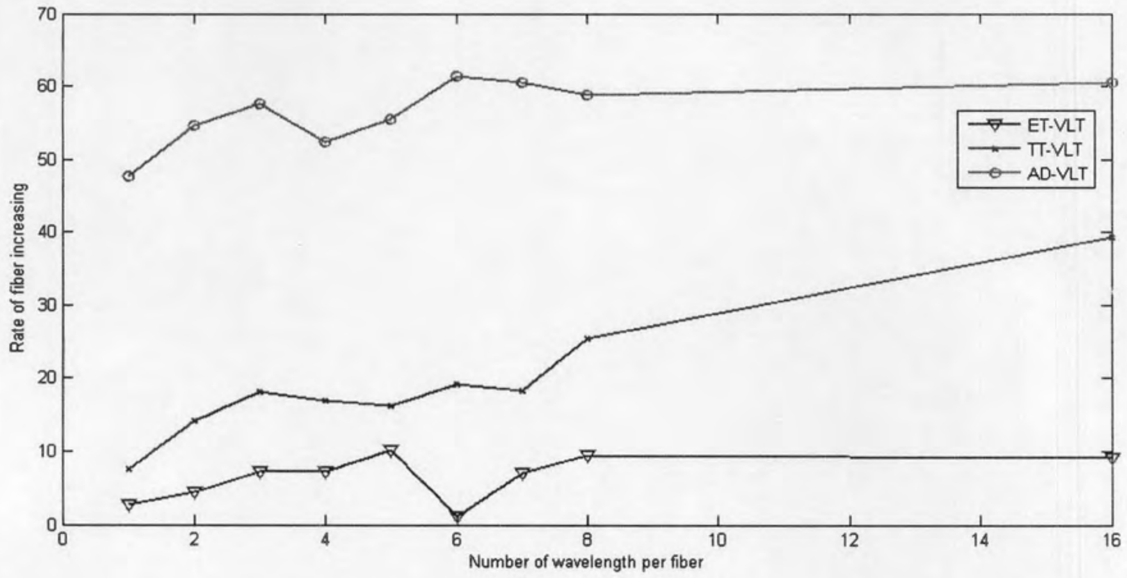
รูปที่ ข.22 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



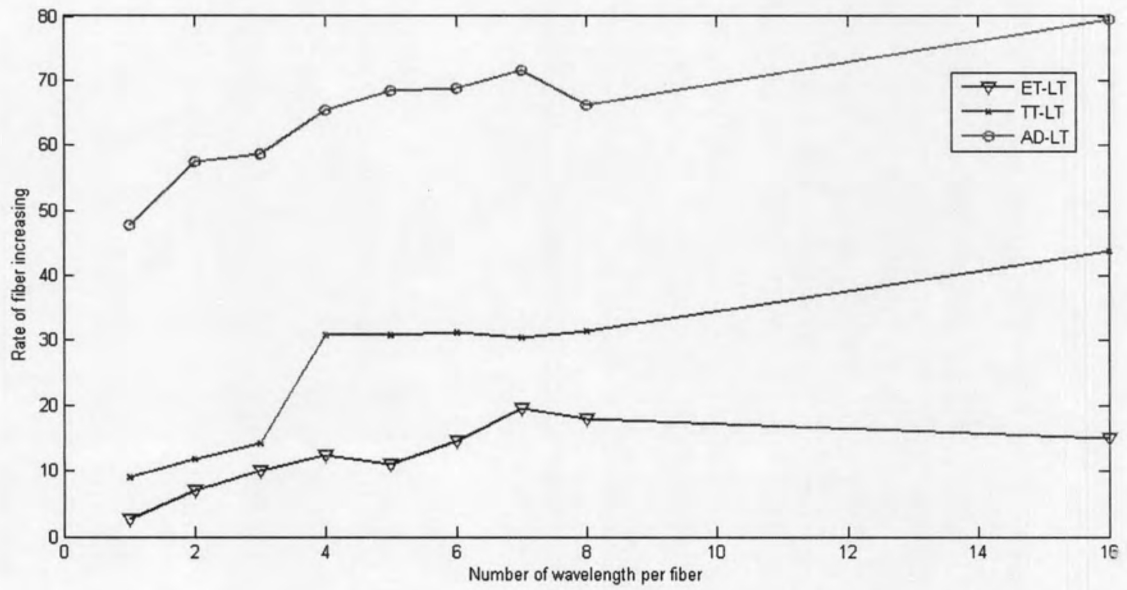
รูปที่ ข.23 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



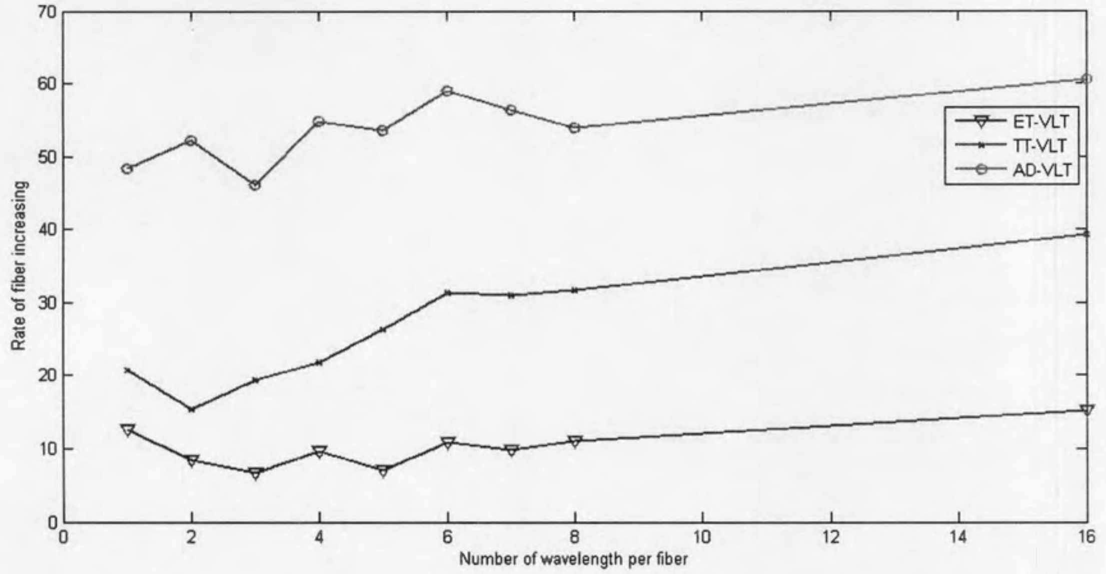
รูปที่ ข.24 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



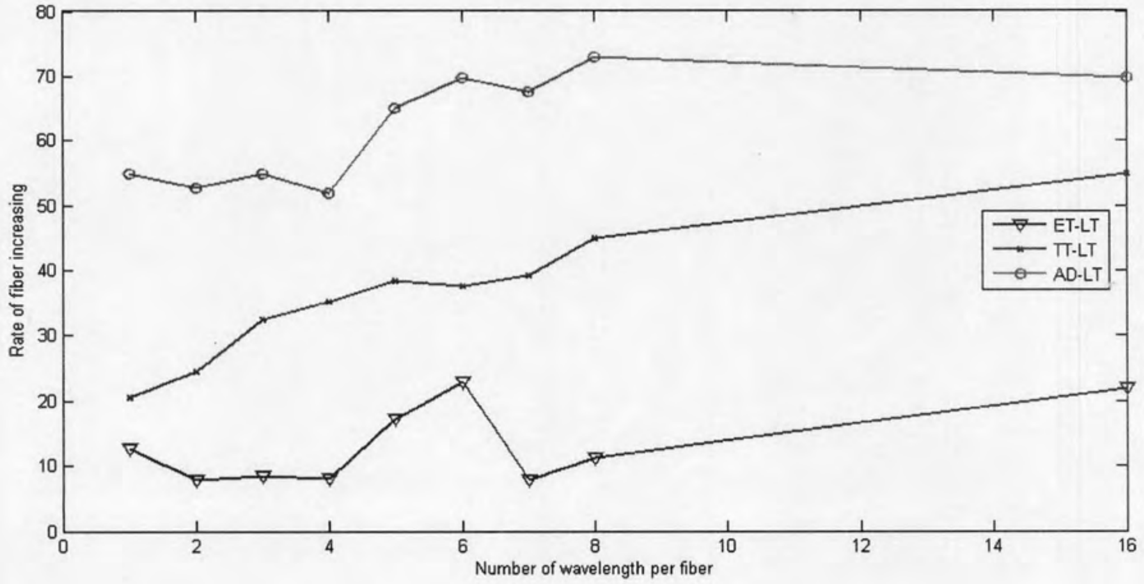
รูปที่ ข.25 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด13เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ข.26 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด13เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ข.27 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ข.28 อัตราการเพิ่มขึ้นของเส้นใยนำแสงเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 1 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 1 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.44	25.10	43.26	12.44	17.25	35.92
2	7.69	31.17	45.75	8.98	25.00	45.70
3	8.48	23.03	44.24	13.09	26.70	56.54
4	16.13	24.19	40.32	11.11	31.48	44.44
5	4.04	26.26	40.40	17.95	44.44	53.85
6	10.84	25.30	45.78	23.85	45.87	60.55
7	12.68	25.71	47.89	11.76	50.00	58.82
8	11.11	26.98	52.38	11.23	40.44	59.55
16	15.15	36.36	54.54	13.25	53.42	60.27

ตารางที่ ข.2 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 2 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 2 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.65	19.79	48.16	12.65	16.12	41.43
2	8.50	20.24	52.63	8.99	19.92	45.70
3	6.06	21.81	46.06	14.66	28.80	52.35
4	7.26	23.39	50.00	12.96	20.99	48.76
5	7.07	24.24	43.43	11.11	29.91	58.97
6	9.64	24.10	46.99	14.68	19.27	61.46
7	7.04	21.12	42.25	15.69	17.65	58.82
8	7.94	25.39	47.61	17.98	26.97	58.93
16	9.09	33.33	48.48	34.24	46.58	64.38

ตารางที่ ข.3 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 3 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 3 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	10.00	18.77	50.20	10.00	21.22	55.51
2	15.79	19.03	59.11	8.59	17.97	62.50
3	10.91	21.21	57.57	8.37	21.46	68.06
4	11.29	21.77	64.52	4.93	17.90	61.73
5	10.10	19.19	58.59	10.25	29.66	70.09
6	8.43	27.71	61.45	11.01	37.61	61.47
7	8.45	23.94	61.97	12.75	32.55	61.76
8	6.35	25.40	65.08	17.98	44.94	67.42
16	6.06	36.36	57.58	35.62	43.84	78.08

ตารางที่ ข.4 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 4 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 4 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.45	37.34	47.76	12.45	37.96	39.38
2	14.98	39.68	46.96	12.89	33.95	41.40
3	13.33	38.18	40.00	17.28	40.84	48.69
4	17.74	37.90	47.58	9.25	39.51	45.06
5	14.14	42.42	43.43	13.93	58.11	69.23
6	14.46	37.35	42.17	28.44	47.71	66.06
7	8.45	35.21	42.25	17.65	53.92	57.84
8	12.70	38.90	41.27	20.22	50.56	60.67
16	9.09	39.39	42.42	27.40	53.42	71.23

ตารางที่ ข.5 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 5 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 5 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	10.61	28.78	51.22	10.61	29.18	54.90
2	10.93	31.74	53.04	13.28	27.34	55.86
3	12.12	33.33	50.90	12.04	42.41	67.02
4	15.32	33.06	50.00	14.82	30.24	56.79
5	12.12	29.29	54.54	25.64	37.61	82.90
6	9.64	26.51	54.22	20.18	36.70	70.64
7	11.27	29.58	59.16	24.51	37.26	66.67
8	14.29	31.75	47.62	21.35	39.33	76.40
16	12.12	39.39	51.51	28.76	41.10	68.49

ตารางที่ ข.6 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 6 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 6 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	25.31	51.84	60.00	25.31	54.69	63.88
2	22.27	49.39	57.90	21.48	57.81	57.81
3	21.82	52.73	58.18	27.75	58.11	54.97
4	25.00	56.45	63.71	25.93	50.00	51.85
5	26.26	54.54	65.65	29.06	64.96	72.64
6	24.10	49.40	61.45	33.94	70.64	66.66
7	26.76	56.34	67.61	21.57	66.67	71.57
8	23.81	61.90	71.43	24.72	69.66	76.40
16	15.15	54.54	60.61	32.88	79.45	89.04

ตารางที่ ข.7 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 7 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 7 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	8.76	18.98	30.61	8.76	14.90	24.69
2	7.09	9.72	30.77	7.81	15.03	41.40
3	4.84	13.94	39.39	17.28	10.47	31.41
4	3.22	12.10	33.87	8.02	12.96	37.04
5	4.04	10.10	25.25	12.82	17.95	47.01
6	1.20	15.66	30.12	19.27	19.27	54.71
7	5.63	21.13	32.39	12.75	20.59	44.12
8	6.35	19.05	34.92	19.10	23.60	46.06
16	9.09	36.36	45.45	15.07	28.77	64.38

ตารางที่ ข.8 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 8 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 8 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	18.37	50.00	57.14	18.37	39.39	47.55
2	17.81	48.58	54.66	19.14	49.22	59.77
3	18.79	47.87	53.33	16.23	37.70	54.97
4	16.13	41.13	50.00	23.46	57.41	63.58
5	17.17	41.41	43.43	20.51	58.97	68.37
6	14.46	46.99	50.60	27.53	59.63	65.14
7	19.72	50.70	56.34	25.49	58.82	70.59
8	19.05	46.03	53.97	22.47	53.30	80.90
16	18.18	54.54	60.60	32.88	80.82	75.34

ตารางที่ ข.9 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 9 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 9 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	13.88	33.27	43.67	13.88	31.84	41.84
2	12.96	33.20	46.96	10.55	32.42	46.48
3	10.91	34.55	42.42	15.71	26.18	50.79
4	10.48	37.90	47.58	12.96	33.95	51.23
5	11.11	32.32	40.40	24.78	46.15	70.94
6	10.84	33.73	40.96	27.52	46.79	58.71
7	9.86	32.39	38.03	12.75	50.00	65.67
8	7.94	30.16	31.75	20.22	47.19	62.92
16	9.09	39.39	48.48	21.42	68.49	72.60

ตารางที่ ข.10 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 10 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 10 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	18.78	39.59	63.06	18.78	46.73	59.39
2	20.24	48.58	61.94	17.19	57.42	63.28
3	21.82	50.91	62.42	15.18	49.74	63.35
4	20.97	45.16	60.48	14.20	46.91	64.20
5	18.18	50.51	61.62	34.19	64.96	72.65
6	25.36	50.60	61.45	16.70	67.89	77.06
7	22.54	54.93	61.97	19.60	59.80	71.57
8	22.22	52.38	58.73	25.84	78.65	85.39
16	18.18	54.54	60.61	27.40	73.97	101.36

ตารางที่ ข.11 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 11 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 11 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	7.14	10.20	51.63	7.14	19.18	58.37
2	1.21	10.93	55.06	1.17	9.77	55.47
3	4.24	10.91	55.76	3.66	10.47	55.50
4	7.26	13.71	61.29	9.26	14.19	51.23
5	7.07	19.19	64.64	17.94	23.93	68.37
6	2.41	18.07	62.65	13.76	26.61	64.22
7	5.63	18.31	63.38	12.75	30.39	61.75
8	12.70	22.22	68.25	17.98	33.71	82.02
16	12.12	36.36	63.63	21.92	38.36	89.04

ตารางที่ ข.12 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 12 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 12 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	9.18	14.49	53.27	9.18	13.67	47.96
2	5.26	8.91	50.20	8.59	19.31	58.59
3	5.45	12.73	46.67	11.00	25.65	54.45
4	4.03	13.71	53.23	4.94	29.63	49.38
5	9.09	17.17	49.50	15.39	40.17	70.94
6	7.22	19.28	51.81	20.18	35.78	60.55
7	7.04	18.31	56.34	5.88	37.26	63.73
8	3.17	25.40	46.03	17.98	39.33	74.16
16	3.03	33.33	51.51	12.33	56.16	79.45

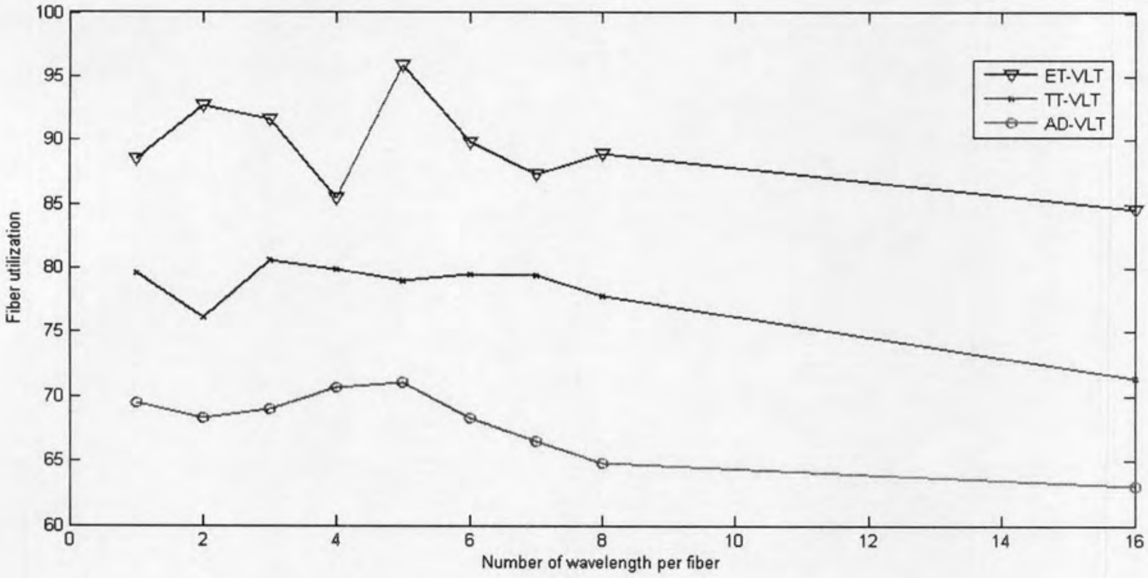
ตารางที่ ข.13 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 13 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 13 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	2.65	7.55	4.75	2.65	8.98	47.76
2	4.45	14.17	54.65	7.03	11.72	57.42
3	7.27	18.18	57.58	9.95	14.14	58.65
4	7.26	16.94	52.42	12.35	30.87	65.43
5	10.10	16.16	55.56	11.11	30.77	68.38
6	1.20	19.28	61.44	14.68	31.19	68.81
7	7.04	18.31	60.56	19.61	30.39	71.57
8	9.52	25.40	58.73	17.98	31.46	66.30
16	9.09	39.39	60.61	15.07	43.84	79.45

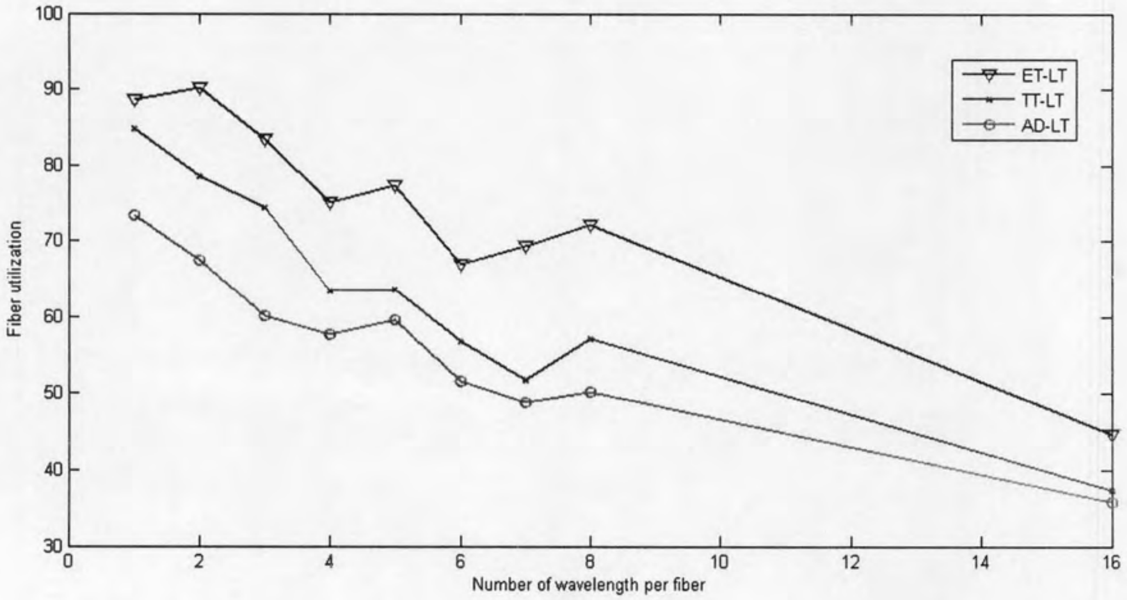
ตารางที่ ข.14 อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 14 เสียหายในโครงข่าย(%)

อัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนเส้นใยนำแสงเมื่อโนดที่ 14 เสียหายในโครงข่าย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	12.65	20.82	48.75	12.65	20.61	54.90
2	8.50	15.38	52.23	7.81	24.61	52.73
3	6.67	19.40	46.06	8.38	32.46	54.97
4	9.68	21.77	54.84	8.02	35.19	51.85
5	7.07	26.26	53.53	17.09	38.46	64.96
6	10.84	31.33	59.04	22.94	35.19	69.72
7	9.86	30.99	56.34	7.84	39.21	67.65
8	11.11	31.75	53.97	11.24	44.94	73.03
16	15.15	39.39	60.61	21.92	54.79	69.86

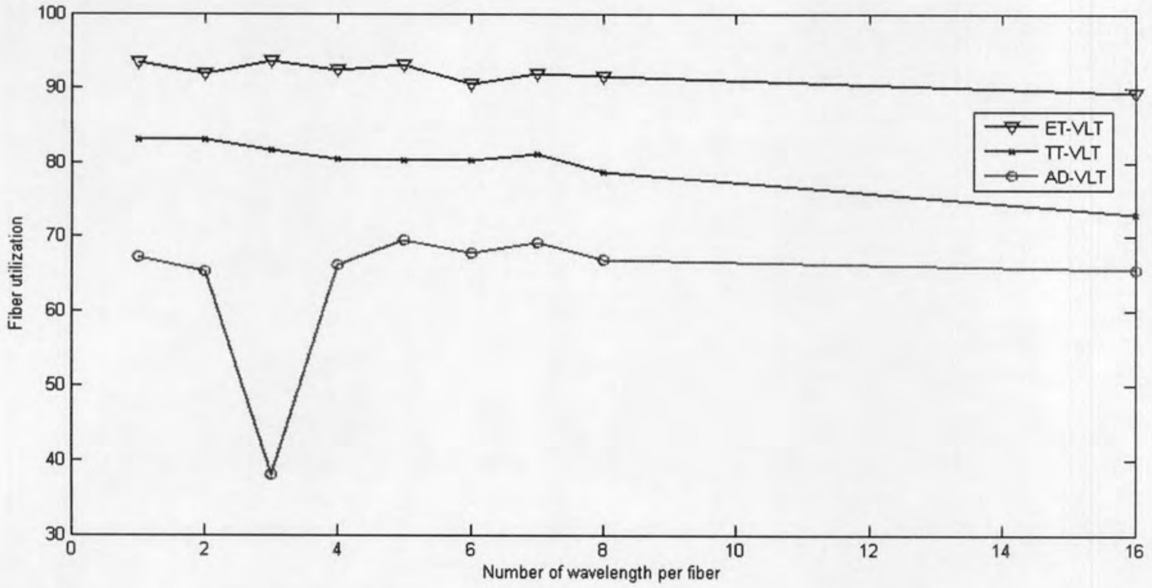
ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพของโครงข่ายในกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด



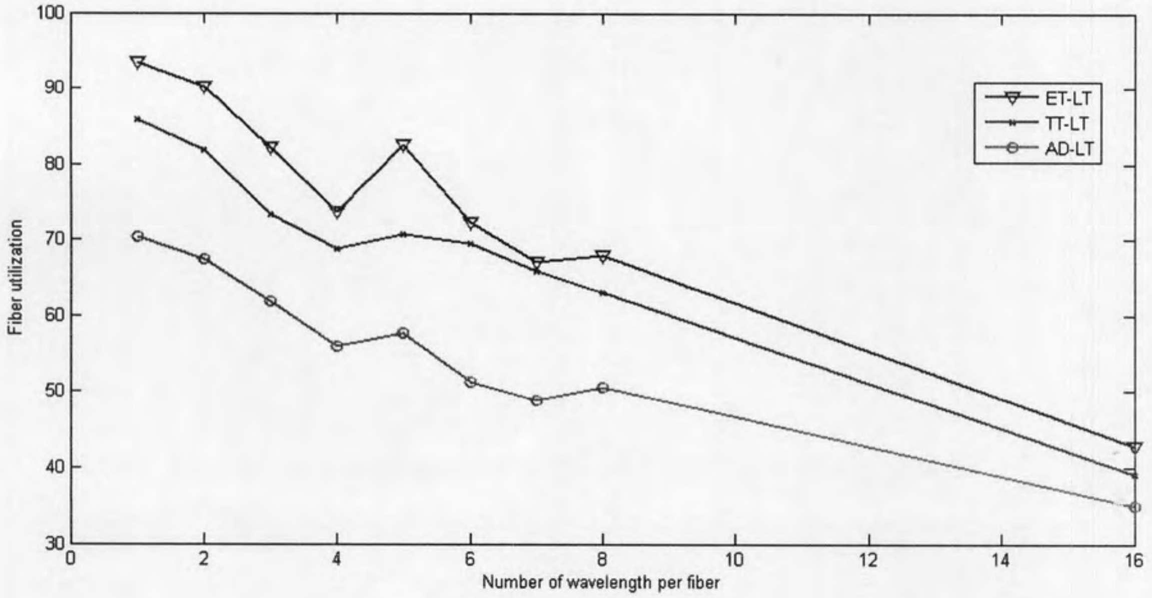
รูปที่ ค.1 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด1เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



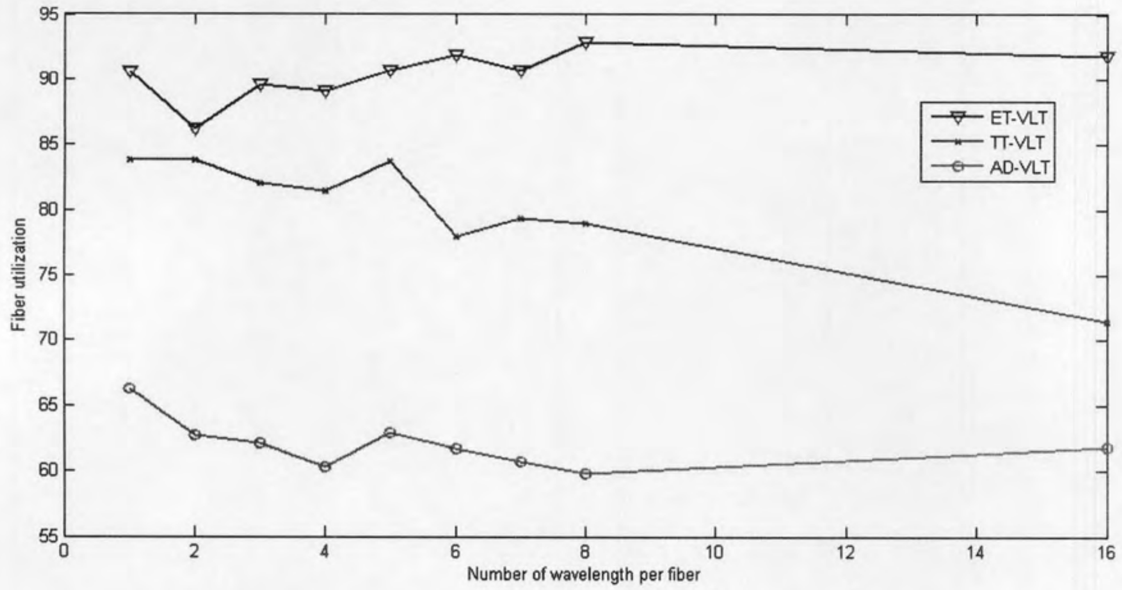
รูปที่ ค.2 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด1เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



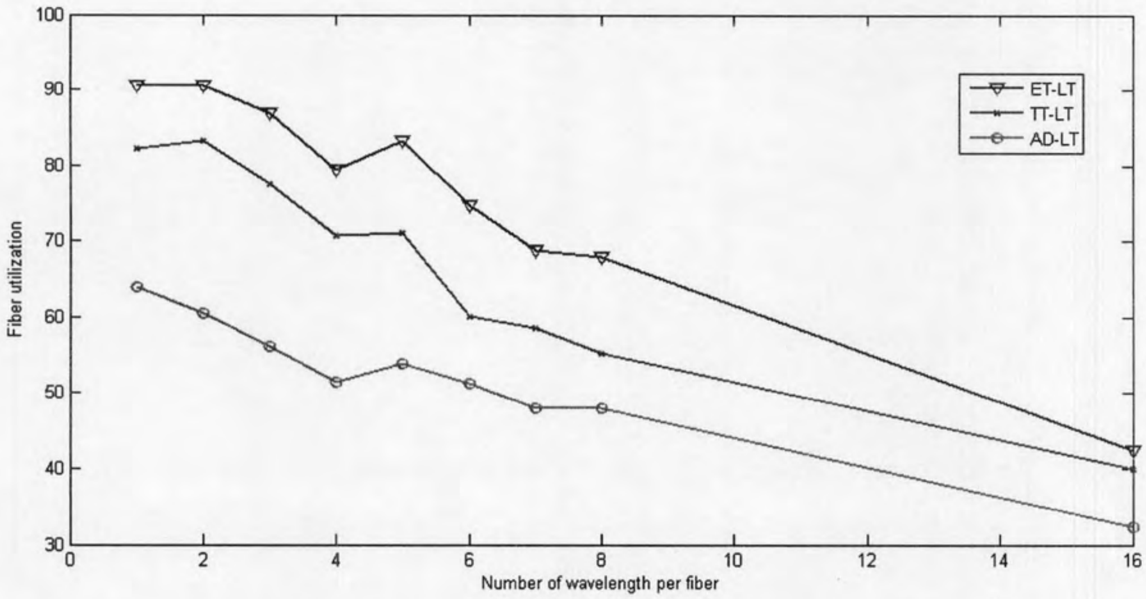
รูปที่ ค.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด2เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



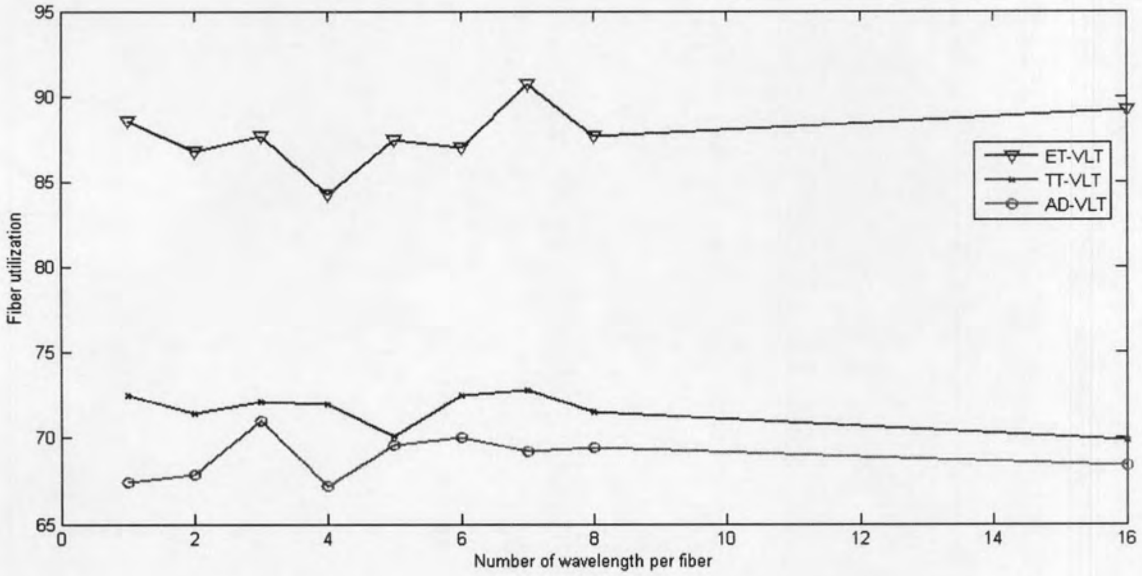
รูปที่ ค.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด2เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



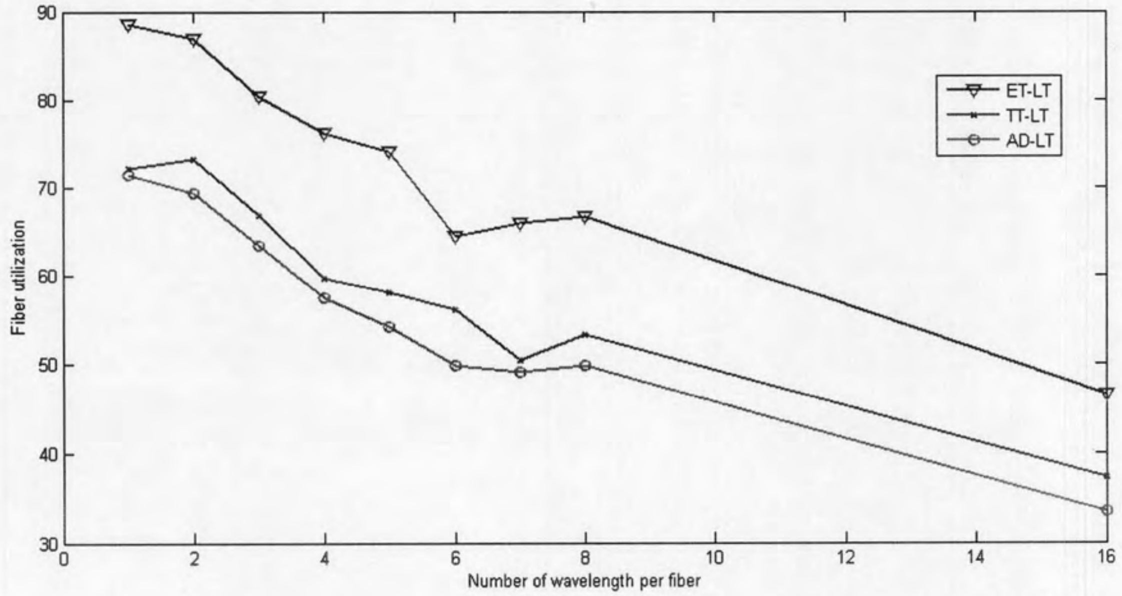
รูปที่ ค.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด3เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



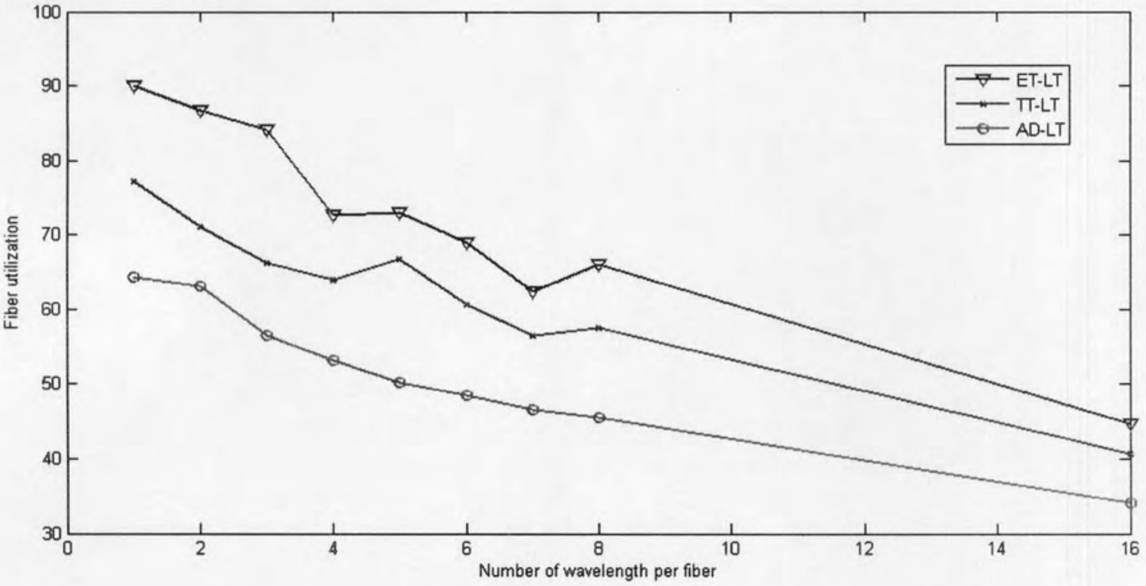
รูปที่ ค.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด3เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



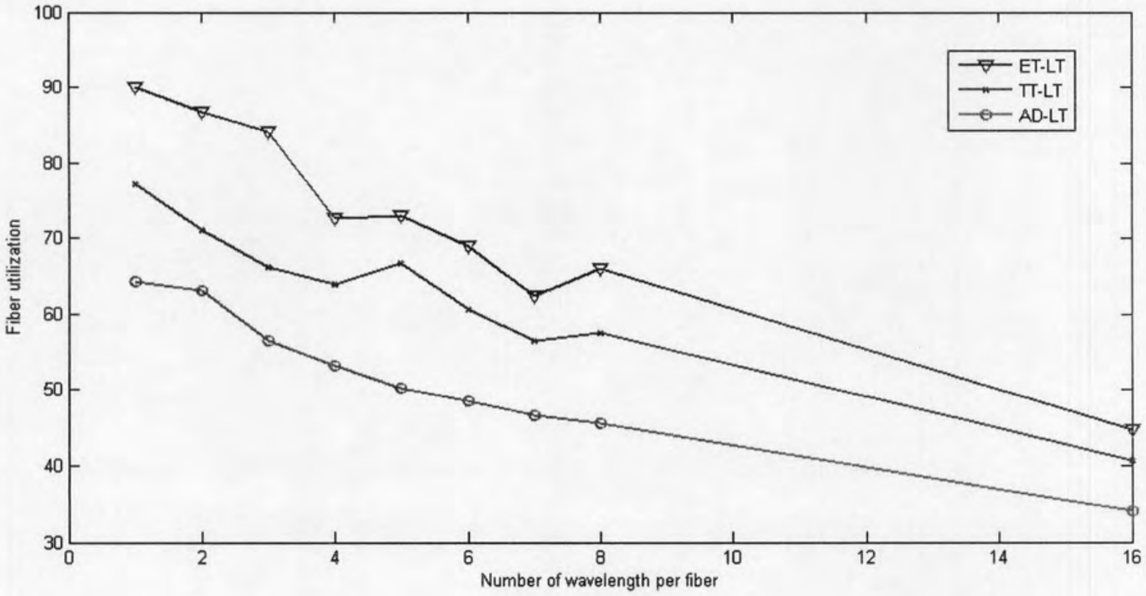
รูปที่ ค.7 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด4เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



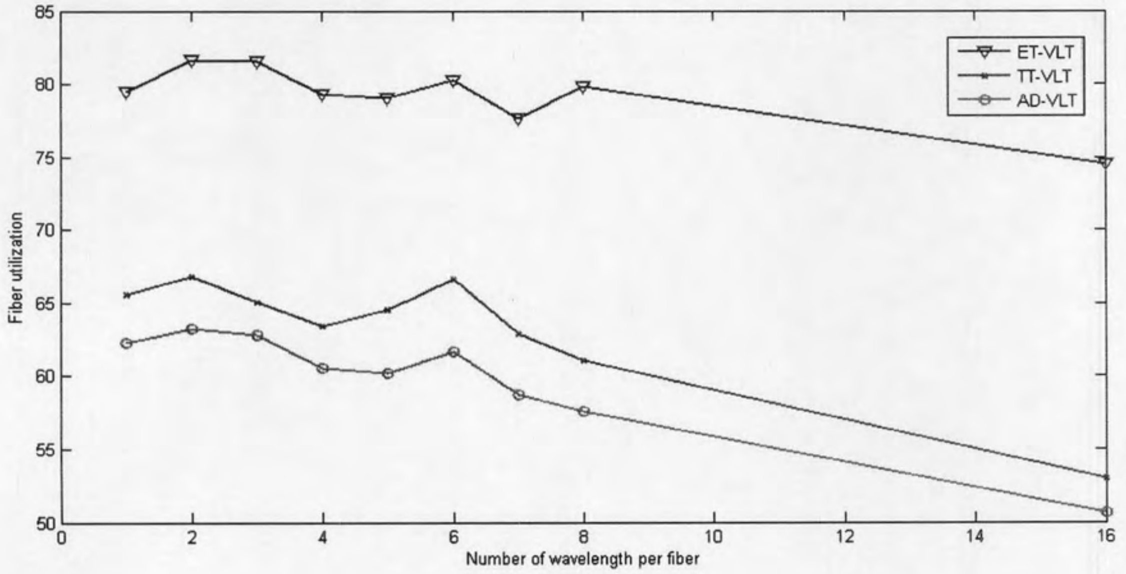
รูปที่ ค.8 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด4เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



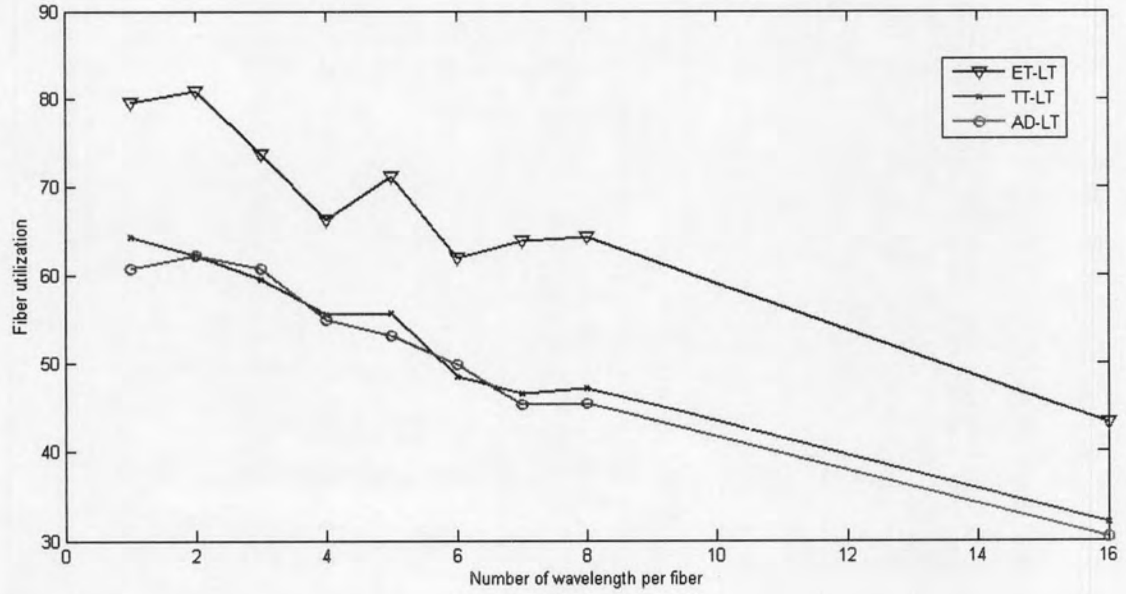
รูปที่ ค.9 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด5เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



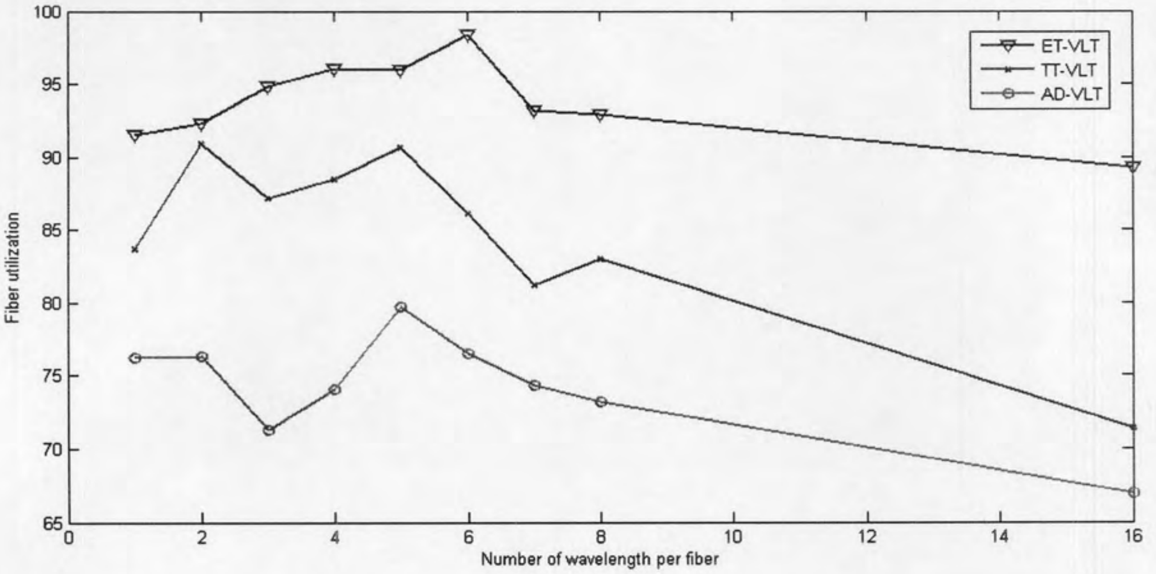
รูปที่ ค.10 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด5เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



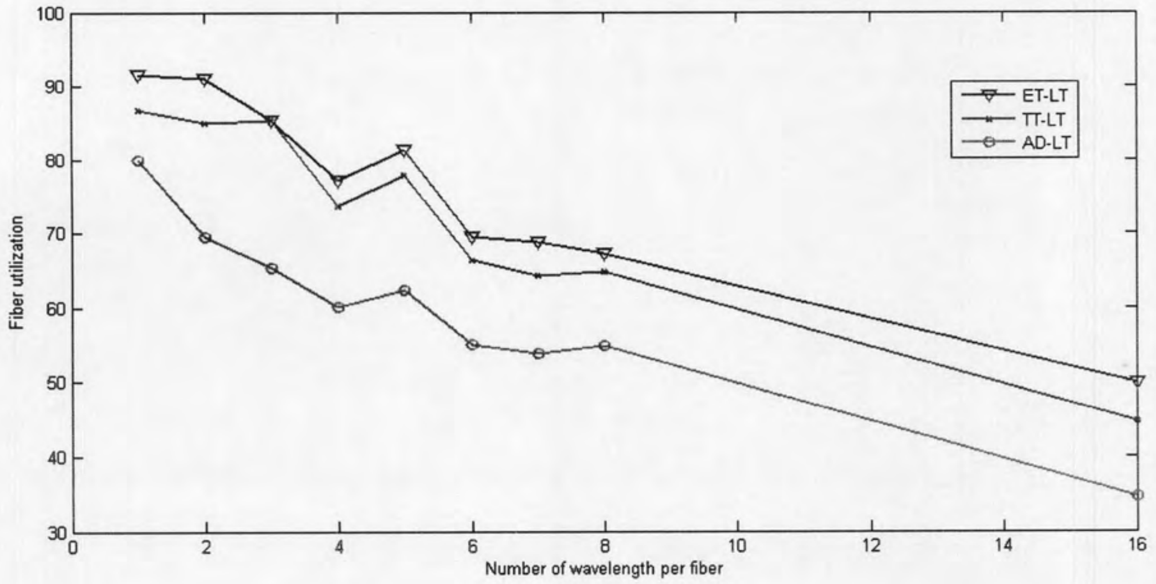
รูปที่ ค.11 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด6เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



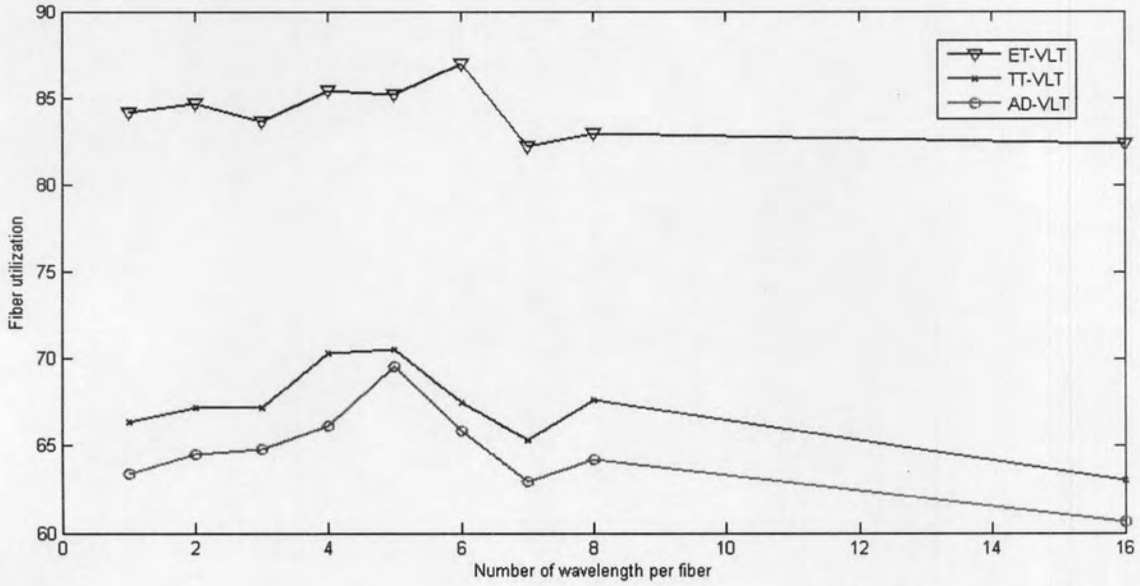
รูปที่ ค.12 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด6เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



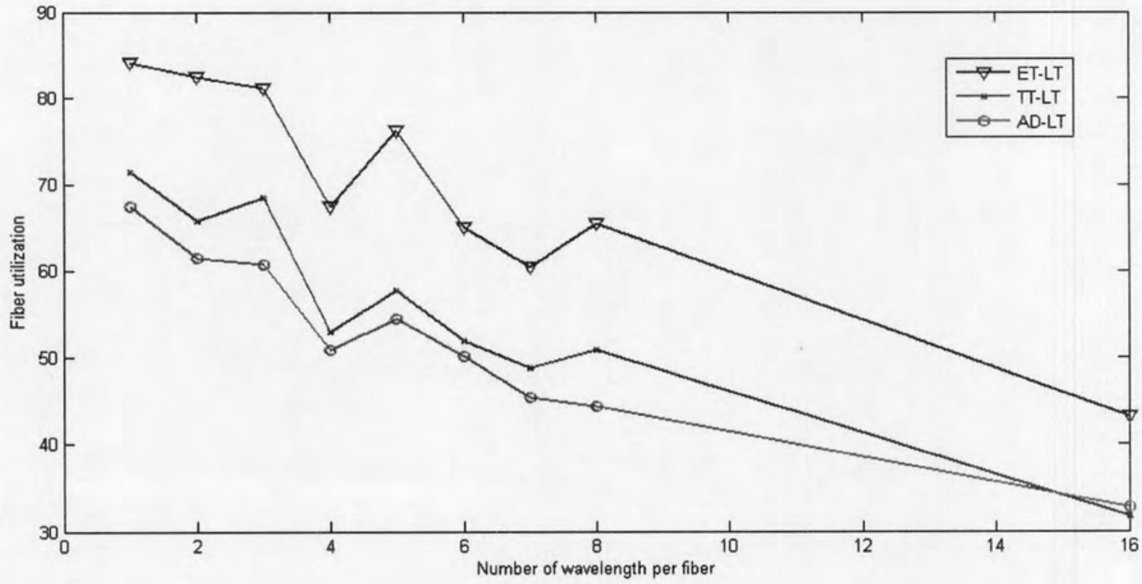
รูปที่ ค.13 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



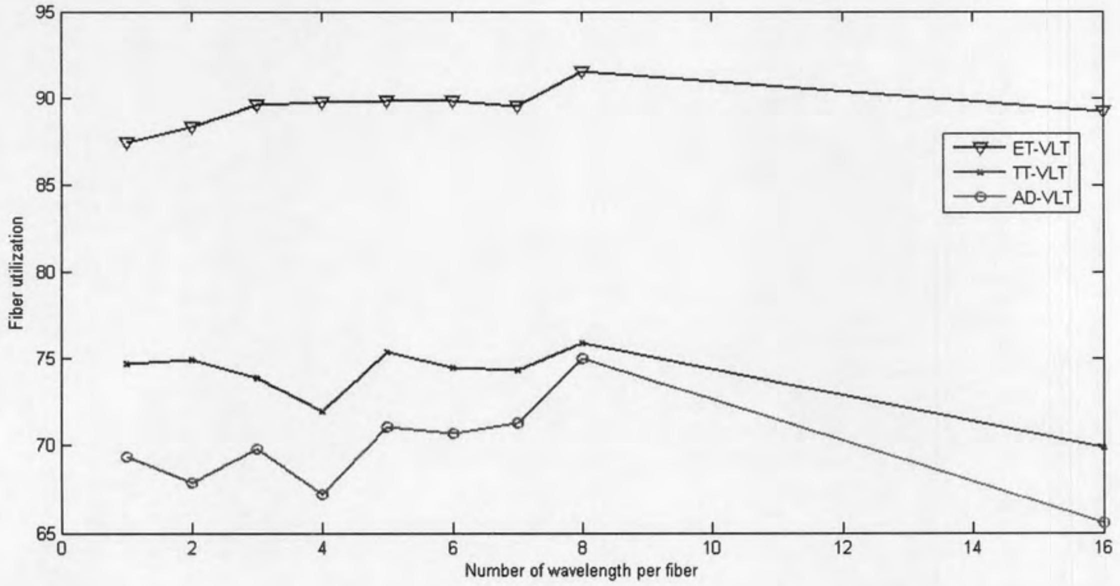
รูปที่ ค.14 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด7เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



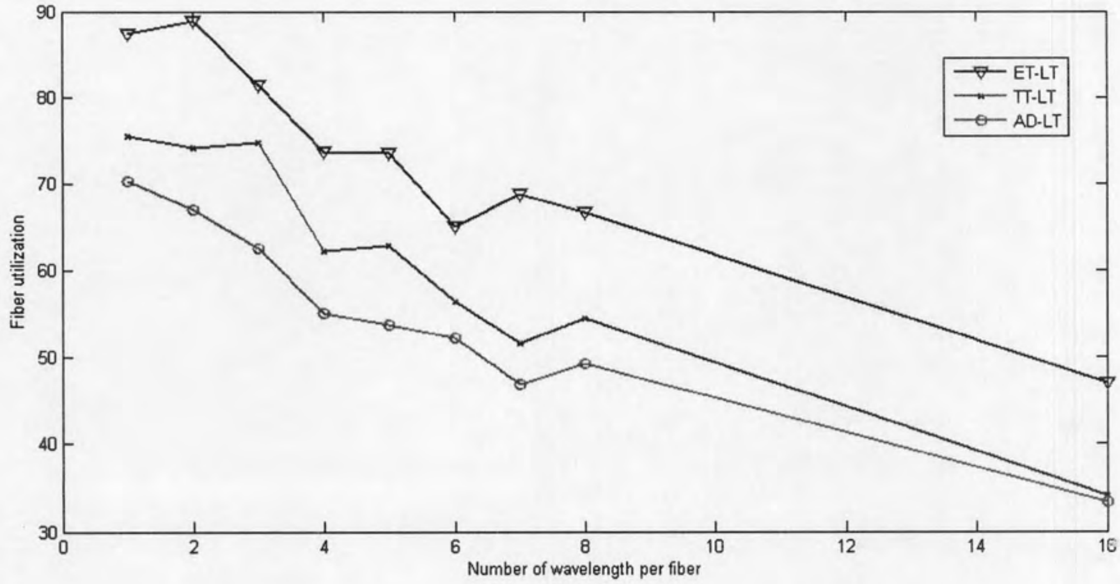
รูปที่ ค.15 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



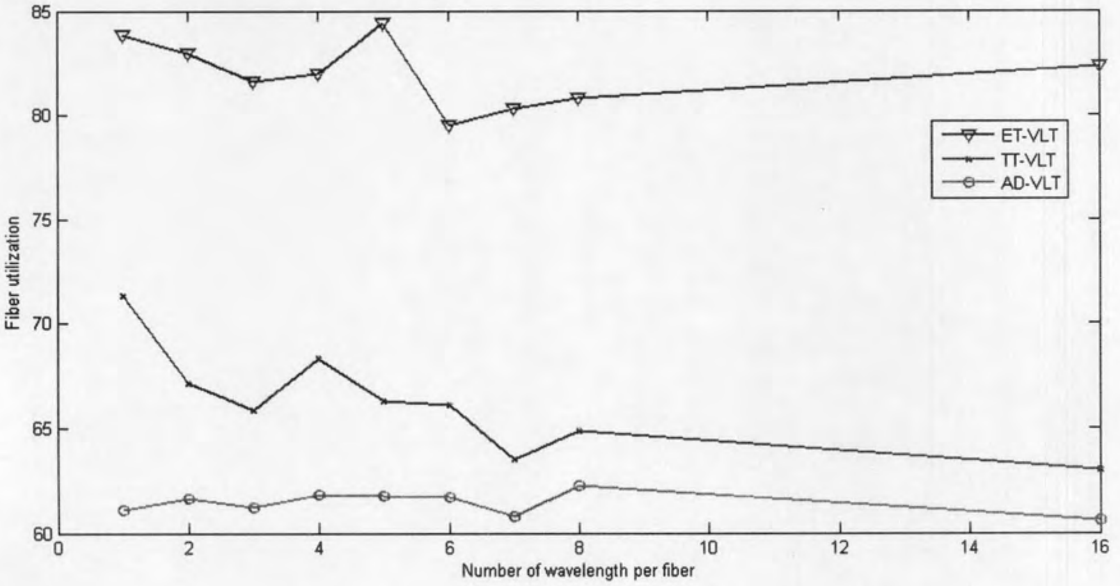
รูปที่ ค.16 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด8เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



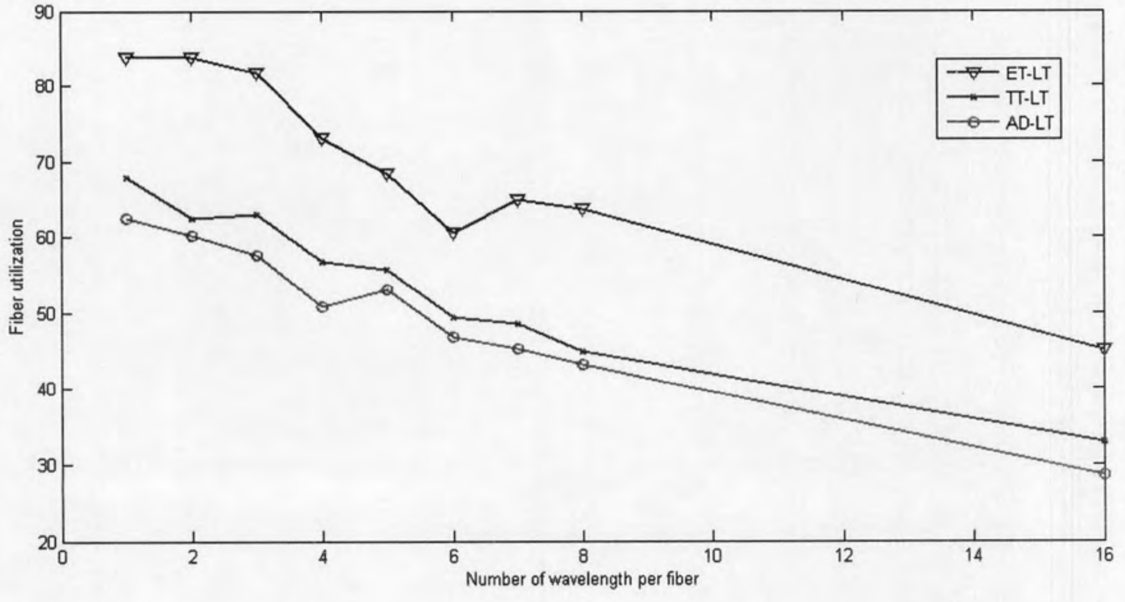
รูปที่ ค.17 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด9เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



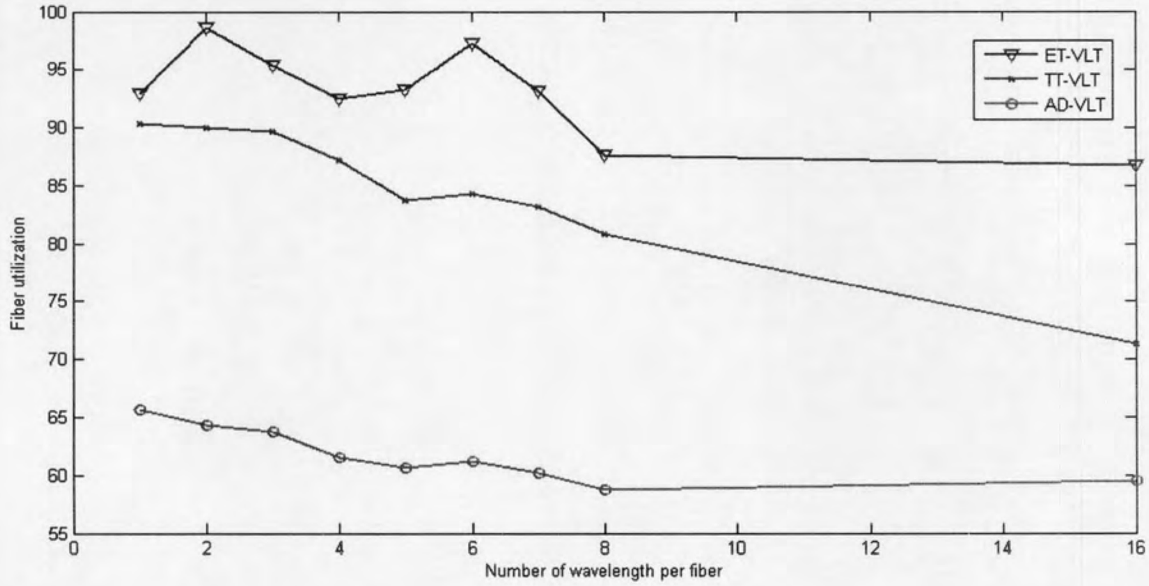
รูปที่ ค.18 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด9เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



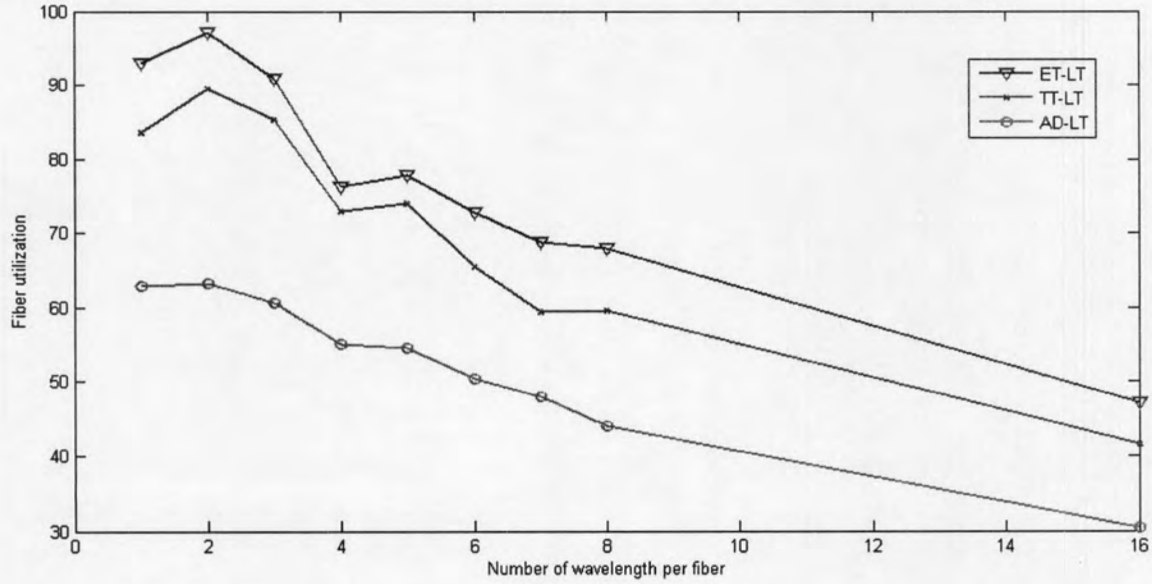
รูปที่ ค.19 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด10เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



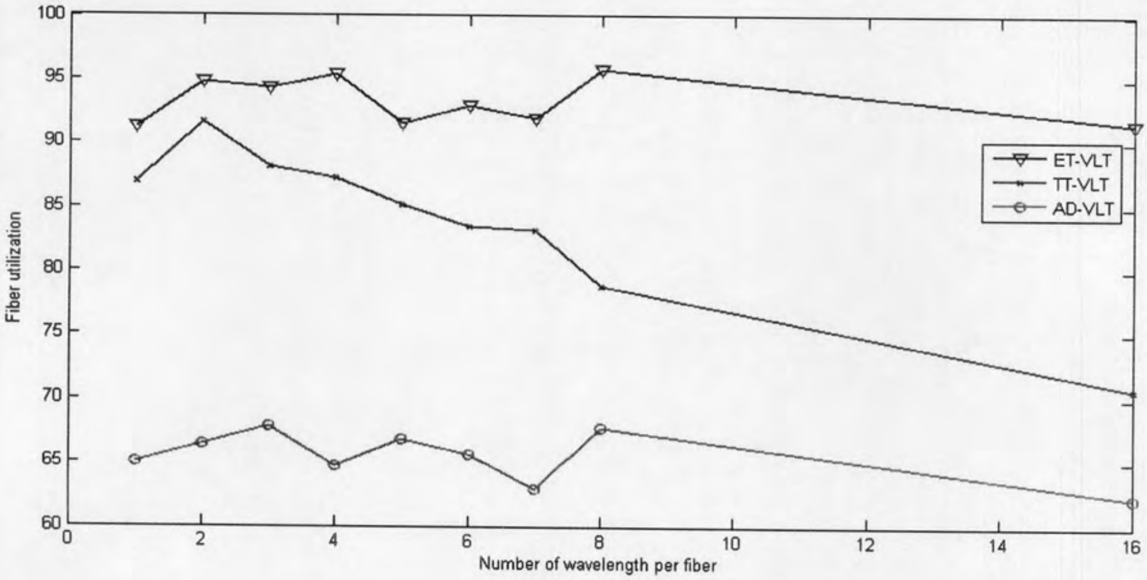
รูปที่ ค.20 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด10เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



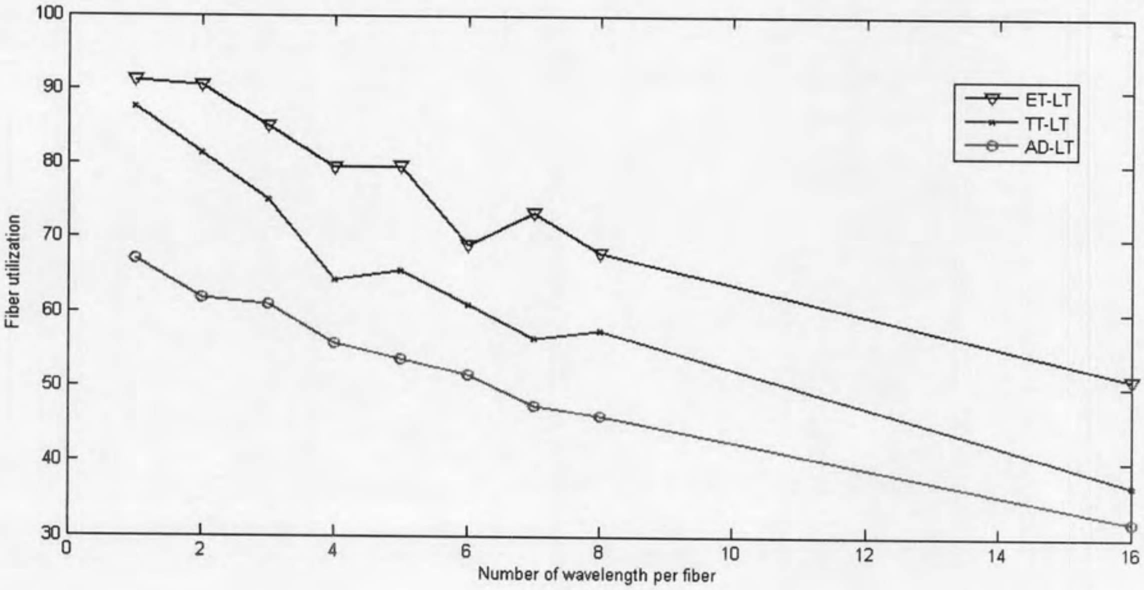
รูปที่ ค.21 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



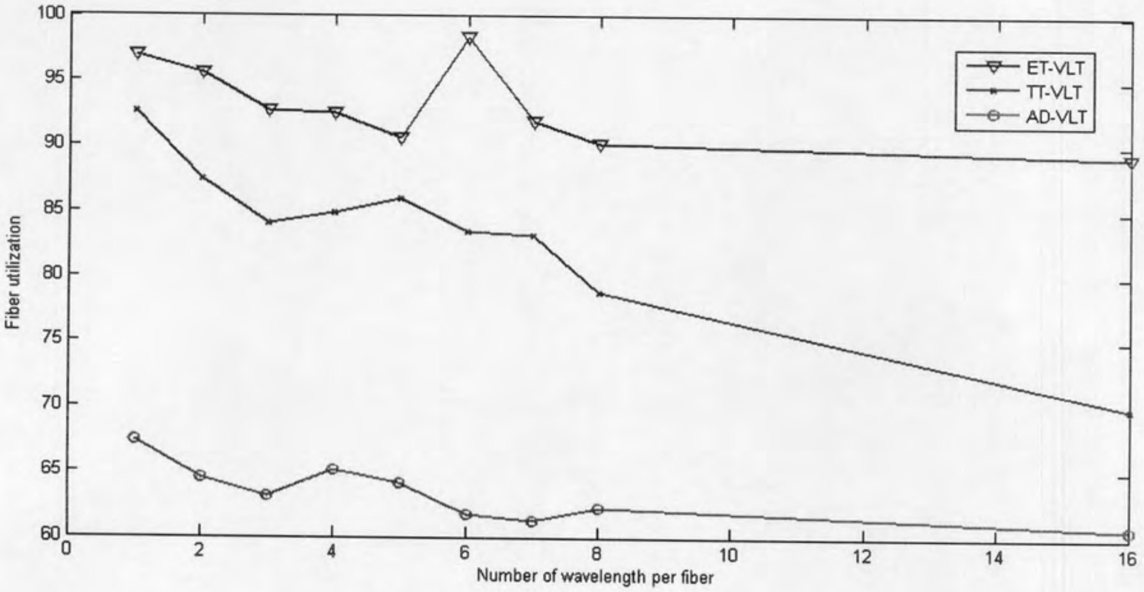
รูปที่ ค.22 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด11เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



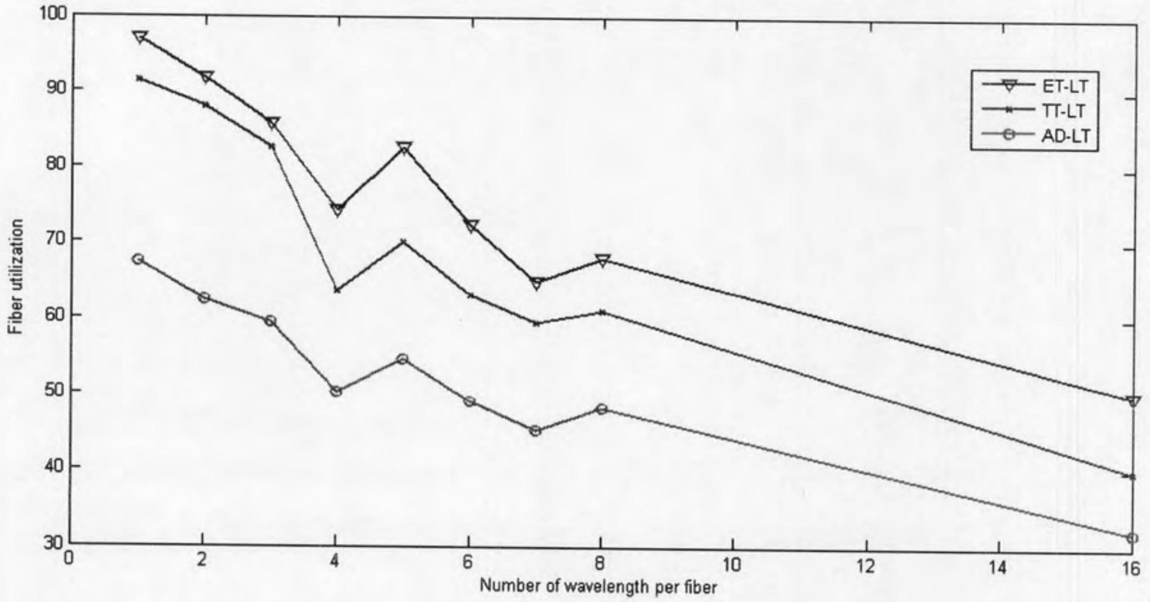
รูปที่ ค.23 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



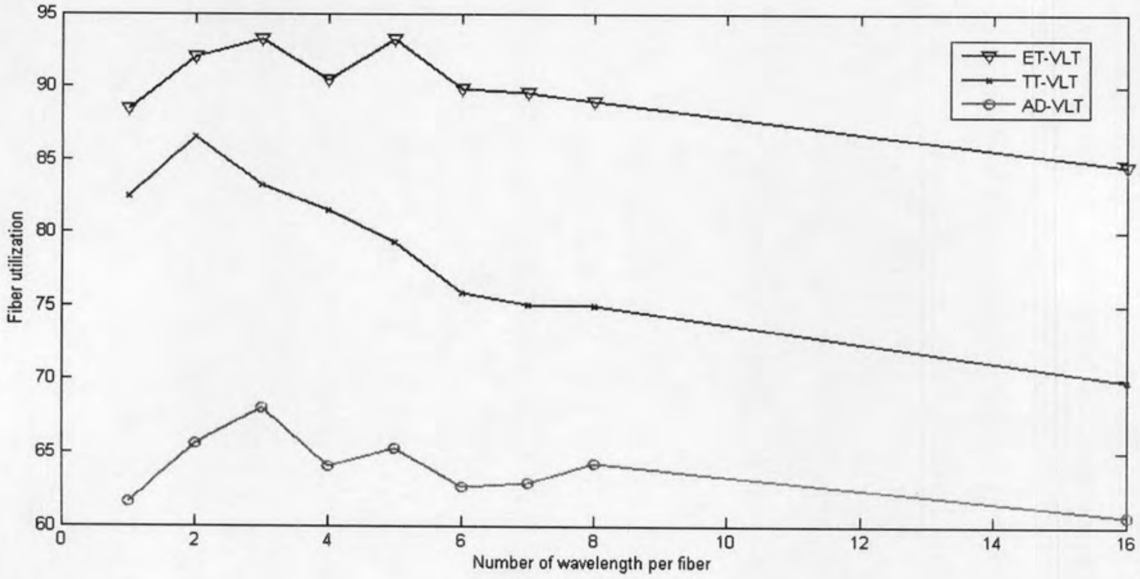
รูปที่ ค.24 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด12เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



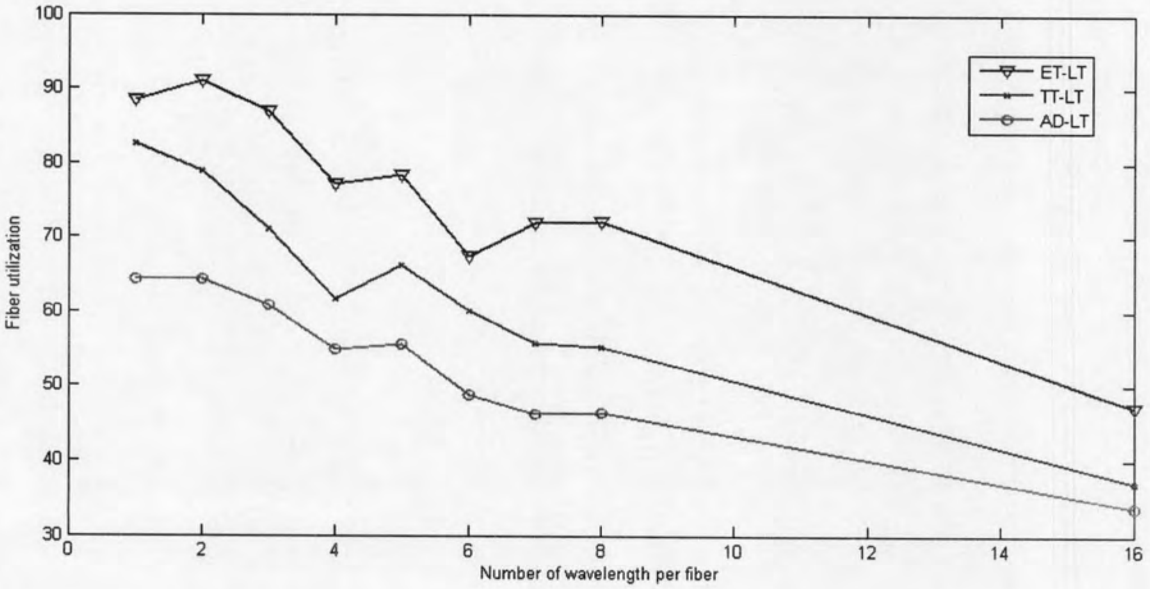
รูปที่ ค.25 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด13เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ค.26 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด13เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ค.27 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น



รูปที่ ค.28 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนด14เสียหายกรณีโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น

ตารางที่ ค.1 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 1 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 1 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	88.56	79.61	69.52	88.56	84.72	73.27
2	92.66	76.08	68.33	90.14	78.59	67.43
3	91.62	80.62	68.97	83.33	74.38	60.20
4	85.42	79.84	70.69	75.00	63.38	57.69
5	95.92	79.04	71.07	77.39	63.55	59.67
6	89.86	79.49	68.32	66.91	56.81	51.61
7	87.32	79.38	66.53	69.42	51.72	48.85
8	88.93	77.82	64.85	72.09	51.70	50.26
16	84.54	71.39	62.99	44.61	37.44	35.84

ตารางที่ ค.2 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 2 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 2 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	93.48	83.13	67.22	93.48	85.76	70.42
2	91.98	83.00	65.38	90.14	81.92	67.43
3	93.71	81.59	68.05	82.19	73.31	61.86
4	92.48	80.39	66.13	73.77	68.88	56.02
5	93.20	80.32	69.58	82.62	70.66	57.74
6	90.84	80.26	67.76	72.27	69.49	51.32
7	91.92	81.23	69.17	67.07	65.95	48.84
8	91.54	78.79	66.94	67.98	63.16	50.62
16	89.24	73.01	65.56	42.79	39.19	34.95

ตารางที่ ค.3 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 3 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 3 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	90.54	83.85	66.30	90.54	82.16	64.04
2	86.19	83.84	62.72	90.46	83.28	60.46
3	89.62	82.00	63.08	86.96	77.59	56.07
4	89.13	81.46	60.29	79.41	70.68	51.53
5	90.64	83.72	92.93	83.26	71.13	53.97
6	91.85	77.99	61.69	74.66	60.22	51.33
7	90.72	79.38	60.75	68.82	58.62	47.97
8	92.91	79.00	59.86	67.98	55.33	47.90
16	91.78	71.39	61.78	42.36	39.94	32.26

ตารางที่ ค.4 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 4 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 4 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	88.57	72.51	67.40	88.57	72.19	71.45
2	86.80	71.45	67.90	87.02	73.32	69.48
3	87.70	72.08	70.99	80.36	66.91	63.38
4	84.25	71.93	67.21	76.27	59.73	57.45
5	87.43	70.07	69.58	74.07	58.05	54.24
6	87.01	72.51	70.06	64.52	56.11	49.91
7	90.72	72.77	69.17	65.95	50.41	49.16
8	87.68	71.55	69.94	66.70	53.26	49.91
16	89.24	69.84	68.35	46.60	37.44	33.55

ตารางที่ ค.5 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 5 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 5 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	90.04	77.34	65.86	90.04	77.09	64.29
2	89.97	76.08	65.21	86.72	71.15	63.03
3	88.65	74.55	66.00	84.11	66.18	56.43
4	86.01	74.55	66.13	72.58	63.98	53.15
5	89.00	77.19	64.58	73.06	66.71	50.19
6	90.84	78.73	64.58	68.96	60.63	48.57
7	88.43	66.44	61.82	62.32	56.53	46.59
8	86.46	75.00	64.84	66.09	57.56	45.46
16	86.82	69.84	64.25	44.61	40.72	34.10

ตารางที่ ค.6 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 6 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 6 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	79.48	65.59	62.25	79.48	64.38	60.77
2	81.62	66.80	63.21	80.87	62.25	62.25
3	81.59	65.08	62.84	73.77	59.60	60.81
4	79.35	63.40	60.59	66.18	55.56	54.88
5	79.04	64.58	60.24	71.13	55.65	53.17
6	80.26	66.67	61.69	61.87	48.57	49.91
7	77.62	62.93	58.70	63.82	46.55	45.22
8	79.81	61.03	57.64	64.30	47.27	45.46
16	84.54	62.99	60.61	43.23	32.01	30.39

ตารางที่ ค.7 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 7 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 7 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	91.56	83.71	76.25	91.56	86.68	79.87
2	92.32	90.96	76.32	91.12	84.97	69.48
3	94.80	87.23	71.30	85.36	86.36	65.34
4	96.09	88.49	74.10	77.14	73.77	60.18
5	95.93	90.64	79.68	81.36	77.83	62.44
6	98.41	86.11	76.54	69.49	66.42	55.08
7	92.14	81.23	74.32	68.82	64.34	53.84
8	92.91	83.00	73.24	67.33	64.87	54.90
16	89.24	71.39	66.93	49.93	44.61	34.95

ตารางที่ ค.8 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 8 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 8 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	84.14	66.40	63.38	84.14	71.45	67.50
2	84.71	67.17	64.53	82.46	65.84	61.49
3	83.67	67.21	64.82	81.08	68.44	60.81
4	85.42	70.29	66.13	67.50	52.94	50.94
5	85.17	70.57	69.58	76.17	57.74	54.52
6	87.01	67.49	65.87	64.99	51.91	50.19
7	82.19	65.29	62.93	60.49	48.85	45.48
8	83.00	67.66	64.18	65.48	50.98	44.33
16	82.37	62.99	60.61	43.23	31.77	32.76

ตารางที่ ค.9 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 9 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 9 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	87.46	74.73	69.32	87.46	75.54	70.21
2	88.35	74.92	67.90	88.87	74.19	67.07
3	89.62	73.87	69.79	81.45	74.69	62.50
4	89.78	71.93	67.21	73.77	62.21	55.10
5	89.82	75.42	71.08	73.56	62.81	53.70
6	89.86	74.47	70.66	64.99	56.46	52.21
7	89.56	74.32	71.28	68.82	51.73	46.83
8	91.54	75.91	75.00	66.70	54.48	49.22
16	89.24	69.84	65.56	47.12	34.10	33.28

ตารางที่ ค.10 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 10 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 10 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	83.85	71.35	61.07	83.85	67.87	62.48
2	82.99	67.17	61.63	83.83	62.41	60.17
3	81.59	65.86	61.19	81.82	62.94	57.69
4	82.00	68.33	61.80	72.98	56.72	50.75
5	84.44	66.30	61.75	68.40	55.65	53.17
6	79.49	66.13	61.69	60.63	49.36	46.80
7	80.30	63.51	60.75	64.87	48.55	45.22
8	80.84	64.84	62.25	93.73	44.89	43.26
16	82.37	62.99	60.61	45.09	33.02	28.53

ตารางที่ ค.11 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 11 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 11 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	92.95	90.37	65.68	92.95	83.56	62.87
2	98.60	89.96	64.36	97.10	89.50	63.19
3	95.34	89.62	63.18	90.91	85.31	60.61
4	92.48	87.23	61.50	76.27	72.97	55.10
5	93.20	83.73	60.61	77.83	74.07	54.52
6	97.25	84.35	61.23	72.85	65.46	50.47
7	93.14	83.16	60.22	68.82	59.51	47.96
8	87.68	80.84	58.73	67.98	59.98	44.05
16	86.82	71.39	59.49	47.12	41.52	30.39

ตารางที่ ค.12 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 12 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 12 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	91.21	86.99	64.98	91.21	87.61	67.31
2	94.80	91.64	66.44	90.46	81.39	61.95
3	94.25	88.17	67.77	84.91	75.00	61.02
4	95.34	87.23	64.74	79.41	64.29	55.79
5	91.48	85.17	66.76	79.56	65.49	53.70
6	92.88	83.50	65.61	68.96	61.04	51.62
7	91.92	83.16	62.93	73.28	56.53	47.39
8	95.77	79.80	67.66	67.98	57.56	46.04
16	91.54	70.74	62.25	51.14	36.79	32.01

ตารางที่ ค.13 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 13 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 13 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	97.02	92.60	67.40	97.02	91.38	67.40
2	95.54	87.41	64.53	91.79	87.94	62.41
3	92.66	74.10	63.08	85.71	82.57	59.41
4	92.48	84.83	65.08	74.18	63.68	50.37
5	90.64	85.91	64.16	82.62	70.20	54.52
6	98.41	83.50	61.70	72.27	63.17	49.09
7	91.92	83.16	61.28	64.87	59.51	45.22
8	90.21	78.80	62.25	67.98	61.00	48.22
16	89.24	69.84	60.61	49.93	39.94	32.01

ตารางที่ ค.14 ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 14 เสียหาย(%)

ประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อโนดที่ 14 เสียหาย(%)						
M	VLT			LT		
	ET	TT	AD	ET	TT	AD
1	88.41	82.43	61.62	88.41	82.57	64.30
2	91.98	86.49	65.56	91.12	78.84	64.32
3	93.18	83.25	68.05	86.96	71.15	60.81
4	90.44	81.46	64.06	77.14	61.64	54.88
5	93.20	79.36	65.26	78.39	66.30	55.65
6	89.86	75.84	62.62	67.41	60.22	48.83
7	89.56	75.11	62.93	71.95	55.73	46.28
8	88.93	75.00	64.18	72.10	55.33	46.34
16	84.54	69.84	60.61	47.12	37.11	33.82

ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. Kunanan Luekijna and Chaiyachet Saivichit. Multicast Traffic Reconfiguration in WDM Network for Single Node Failure Design. The 9th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2007) (Febuary 2007).:1833-1838

Multicast Traffic Reconfiguration in WDM Network for Single Node Failure Design

Kunanan Luekijna and Chaiyachet Saivichit
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330
E-mail:chaiyachet.S@chula.ac.th

***Abstract* — Until recently, the problem of how to design survivable optical networks under single link failure has been studied quite extensively. However, the study on the design of optical networks for single node failure has been rarely discussed. This paper proposes 3 methods to reconfigure multicast traffic in WDM network for single node failure based on Integer Linear Programming (ILP) technique by reconfiguration of entire network, reconfiguration of traffic traversing through failure node and reconfiguration of traffic adjacent to failure node.**

The last two methods, we used node-disjoint share protection path between primary path and backup path to reconfigure multicast traffic. We used multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA) namely, Light-Tree(LT) and Virtual Light-tree(VLT) to design multicast traffic in WDM network for a single node failure. The objective of this paper is to design WDM network which supports multicast traffic for a single node failure in order to minimize fiber for survival network, given a static multicast traffic set, the number of wavelength per fiber can support and the network design approach (LT and VLT).

***Keywords* — Multicasting, WDM network, Routing and wavelength assignment, ILP, Node failure**

1. Introduction

In the last few year, Optical fiber technology has become the dominant transport medium in telecommunication system, because of its advantage in capacity, reliability, cost and scalability. Such technology is expected to serve as a broadband transport network that support various emerging multimedia service over the internet such as interactive distance learning, e-business, teleconference, video conference, live auction,, video on demand and game online. An attractive feature of optical fiber is its potential to offer extremely large transmission capacity in the order of Tb/s. In order to utilize fiber capacity effectively, Wavelength Division Multiplexing (WDM) technique [1,2] was introduced as a technology of expanding the bandwidth capacity of existing of optical fiber. WDM technology enables network to transmit several information, each at different wavelength, simultaneously on a single optical fiber.

Multicasting [3] is defined as point-to-multipoint communication from a source node to the set of destination nodes. According to the physical layer of a network, the essential equipment needed to successfully construct light-tree on the network is an optical power splitter which is established within an optical cross connects (OXC) of the network.

Network survivability is a major concern of network operators. Resiliency is generally achieved by means of protection or restoration. Protection is a technique that uses pre-assigned capacity to ensure survivability while restoration reroutes the affected traffic after a network element fail.

In literature, there are numerous research paper [4-8] in the area of single link failure. However, the study on the design of optical networks for single node failure has been rarely discussed. The probability of a node failure is generally much smaller than a link failure due to the build-in redundancy of many network equipments but node failure is still possible and will cause severe service disruption. In a typical protection scheme against node failure, the primary and the backup paths need to be node-disjoint along their routes. This requirement guarantees that no single node failure except the source or destination node can affect the primary and backup path simultaneously. Here, we assume that the source or destination node failure is not restorable. The node-disjoint requirement for intermediate node ensures that the primary and backup paths do not pass through the same link, in other word, they can also protect against a link failure.

In this paper, we propose MC-RWA [9] problem formulations in multi-fiber network environment with the objective of minimize the total number of fiber needed to support multicast traffic. Two wavelength assignment strategies namely Light-tree (LT) and Virtual Light-tree (VLT) are examined for protection network design three methods. Firstly, the whole network is entirely reconfigured for all light-Tree. Secondly, only light-Tree that traverses through a failure node are reconfigured. The last method , not only light-Tree traversing through a failure node but also light-Tree traversing through adjacent nodes connected to failure node are reconfigured with node-disjoint protection.

The rest of this paper is organized as follows. In section II, the strategies of MC-RWA in two method of WDM network are introduced. Multicast formulation for working and protection based on ILP for single node failure is presented in section III. Simulation results and discussions are presented in section IV. Finally, the conclusion is given in section V.

2. Multicast routing and wavelength assignment (MC-RWA)

In this paper, a concept of light-tree[10] is applied to serve multicast session is defined as a combination of optical branch. An optical branch is defined as a lightpath provided to connected between two nodes (source and destination or destination and destination) which are the members of the same multicast session. Therefore, in order to reach all member of the multicast session, the optical branches needed to form the light-tree must cover all members of the multicast session and the root node of a light-tree is the source node, while the end nodes of each optical branch are the destination nodes of the light-tree.

A. Wavelength assignment strategy[4]

From the wavelength assignment perspective, there are several distinct assignment policies that can be employed. In this paper, two different wavelength allocation method are discussed according to the wavelength conversion capability of each node.

1). Light-Tree (LT) strategy:

This strategy does not utilize wavelength converter in WDM network. When setting up a light-tree on an optical network only one wavelength is used for each multicast session.

2). Virtual Light-Tree (VLT) strategy:

On the other hand, this strategy does utilize wavelength converter in WDM network in every node. Therefore, the optical branches in a light-tree can use different values of wavelengths.

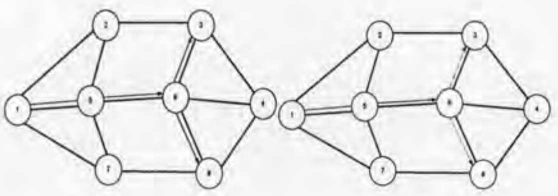


Figure 1A Figure 1B

Wavelength assignment strategy (LT(1A) and VLT(1B))

As illustrated, Figure 1 shows wavelength assignment strategy of which LT is shown in 1A and VLT is shown in 1B. This multicast session has node 1 as the source node and node 3, 6 and 8 as the destination nodes. Therefore, one possible light-tree composes of three optical branches; $1 \rightarrow 6$, $6 \rightarrow 3$ and $6 \rightarrow 8$. We assume the node of light-tree which are replicating and splitting the data information must be the member of multicasting session. In this example, optical power splitter must be used at node 6.

3. Problem description and multicast formulation

A. Network model

The WDM network is modeled by unidirected graph $G=(N,L)$, where N denotes a set of optical nodes, $i=\{1,2,3,..N\}$, with $|N|=N$, Meanwhile, the physical link are represented by a set of unidirected links, $L \subseteq NxN$, where a physical link *mn* is in the set L if there exists a link from node *m* to *n*. In the model, we assume that each physical link is bi-directional and may consist of more than one optical fiber to serve the traffic demand of the network. Each optical fiber is limited to multiplexing the number of wavelength up to M.

Notations:

N	Total number of node in network;
L	Total number of physical link in network;
i	Index of session;
itf	Index of session traverse through failure node;
iaf	Index of session adjacent to failure node;
S_i	Set of multicast session i $\{s_i, d_1, d_2, ..., d_j\}$;
t_i	Traffic demand of multicast session i;
Δ	The fanout of optical splitter;
M	A maximum number of wavelength per fiber;
$\delta^{sd}_{mn,p}$	take the value of one if route p of node pair sd passes through link *mn*, and zero, otherwise;
P_{sd}	A set of candidate routes of node pair *sd*;
X^{mn}_i	A boolean variable, an optical branch between node m and n to form a light-tree for carrying multicast demand t_i;
$P^{sd}_{i,p}$	A candidate physical route p of node pair **sd** for multicast demand t_i (For VLT system);
$P^{sd}_{i,p,\lambda}$	A candidate physical route p of node pair sd occupying wavelength λ for multicast demand t_i (For LT system);
I_a	An arbitrarily high constant integer;
$W_{i,\lambda}$	A Boolean variable, a wavelength channel λ occupied by multicast demand t_i (For LT system);
B^{sd}_f	A set of candidate backup route of node pair *sd* upon the failure of node *f*;
$\mu^{sd,f}_{mn,r}$	Take the value of one if backup route r of node pair *sd* passes through limk *mn* upon the failure of node *f*, and zero, otherwise;
fp_{mn}	Total number of primary fiber on physical link *mn*;
fb_{mn}	Total number of backup fiber on physical link *mn*;

ft_{mn} Total number of backup fiber that primary traverse through failure node;

fa_{mn} Total number of backup fiber that primary adjacent to failure node;

$xb^{mn}_{i,f}$ A boolean variable, a backup optical branch between node m and n to from a backup light-tree for carrying multicast demand t_i upon the failure of node f;

B. Light-Tree creation formulation

To determine an optimal light-tree T_i for supporting multicast request $S_i = \{s_i, d_1, d_2, ..., d_j\}$, we construct an bidirected graph $G_i = (N_i, A_i)$ corresponding to $S_i = \{s_i, d_1, d_2, ..., d_j\}$. The set of node N_i has elements consisting of S_i and the set of destinations $|d_j|$, namely $N_i = \{m \in N_i | m = s_i \vee m = d_j\}$. Meanwhile, the set of logical arcs A_i is defined as $A_i = \{mn \in A_i | m, n \in N_i \wedge m \neq n\}$. Based on the graph, $G_i = (N_i, A_i)$, we develop the light-tree formulation by employing a concept of transforming the graph G_i to the optimal light-tree T_i. Since the light-tree should have $|N_i| - 1$ optical branches, the first two constraints of the formulation are

$$\sum_{mn \in A_i} X_i^{mn} = |N_i| - 1 \quad \forall i, \forall mn \in L \qquad (1)$$

$$X_i^{mn} \in \{0,1\} \quad \forall m, n \in A_i, \forall i \qquad (2)$$

Moreover, based on the definition of a tree, the light-tree T_i should not contain a cycle and should be connected. Given a subset S of N_i, we can express the tree definition in term of the constraint

$$\sum_{mn \in \partial(S)} X_i^{mn} \geq 1 \quad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \varnothing, N \qquad (3)$$

For optical network, due to the limitation of the performance of the optical splitter which is characterized by the fanout Δ. Therefore, the light-tree solution should satisfy this limit by using the constraint.

$$\sum_{n: mn \in A_i} X_i^{mn} \leq \Delta \quad \forall m \in N_i, \forall i \qquad (4)$$

C. Working network design formulation

For the MC-RWA problem definition of the working network design, we can describe the corresponding formulation based on an optical network $G = (N, L)$ and the light-tree constraint introduced above as follow.

1). VLT wavelength assignment strategy

The objective is to minimize the total number of primary fiber requirements:

$$Min: \sum_{mn \in L} fp_{mn} \qquad (5)$$

Subject to the constraint (1)-(4) and:

$$\sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p}^{sd} = txX_i^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (6)$$

$$Mxfp_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p}^{sd} \delta_{mn,p}^{sd} \geq 0 \ \forall mn \in L \qquad (7)$$

$$P_{i,p}^{sd} \in Z^+ \quad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (8)$$

$$fp_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \qquad (9)$$

As formulated for the VLT wavelength allocation strategy, the objective function (5) is the minimization of the total number of optical primary fiber needed to support the multicast demand t_i. Constraint set (1)-(4) as introduced in the previous subsection are contained in the formulation to find the optimal light-trees. Constraint (6) ensures that exactly physical routes are selected for optical branches of the light-trees. Constraint (7) states that the wavelength capacity of each physical link should be sufficient to meet the multicast traffic load crossing to it. Finally, constraint (8) and (9) limit the network variables of the physical routes and optical fiber to be in the nonnegative integer.

2). LT wavelength assignment strategy

The objective is to minimize the total number of primary fiber requirements:

$$Min: \sum_{mn \in L} fp_{mn} \qquad (10)$$

Subject to the constraint (1)-(4) and:

$$\sum_{\lambda=1}^{M} \sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p,\lambda}^{sd} = txX_i^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (11)$$

$$fp_{mn} - \sum_i \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} P_{i,p,\lambda}^{sd} \delta_{mn,p}^{sd} \geq 0$$

$$\forall \lambda = \{1, 2, .., M\}, \forall mn \in L \qquad (12)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{i,\lambda} = 1 \quad \forall i \qquad (13)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \leq I_{\alpha} W_{i,\lambda}$$

$$\forall \lambda = \{1, 2, .., M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (14)$$

$$W_{i,\lambda} \in Z^+ \quad \forall \lambda = \{1, 2, .., M\}, \forall i \qquad (15)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \in Z^+$$

$$\forall p \in P_{sd}, \forall \lambda = \{1, 2, .., M\}, \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (16)$$

$$fp_{mn} \in Z^+ \quad \forall mn \in L \qquad (17)$$

As formulated for the LT wavelength allocation strategy, the objective function (10) is the minimization of the total number of optical primary fiber needed to support the multicast demand t_i. Constraint set (1)-(4) as introduced in the previous subsections are contained in the formulation to find the optimal light-trees. Constraint (11) ensures that exactly primary physical routes are selected and wavelength must be assign to them. Constraint (12) ensures that for any primary physical link, the channel capacity of each wavelength can accommodate the traffic route on it. . Constraint (13) states that only a single wavelength must be selected to support each multicast session. Constraint (14) enforce that no physical path from constraint (11) is permitted to route on wavelength λ, unless the multicast session selects wavelength λ . Finally, constraints (15)-(17) limit the network variables of the wavelength variables, the physical routes and optical fiber to be in the nonnegative integer.

D. Protection network design formulation.

As network survivability is now a serious concern for high-speed optical WDM network. This section presents three multicast protection strategies to protect multicast session against single node failure in WDM network. Firstly, the whole network is entirely reconfigured for all light-Tree. Secondly, only light-Trees that traverse through a failure node are reconfigured. The last method , not only light-Tree traversing through a failure node but also light-Tree traversing through adjacent nodes connect to failure node are reconfigured with node-disjoint protection. In this section we will describe only VLT wavelength assignment strategy because LT wavelength assignment strategy is different from VLT on specify wavelength in optical fiber.

1). Reconfiguration of entire network

As described, under normal operation, an optical network employs light-tree to support multicast traffic. For the reconfiguration of entire network, in the event of single node failure all outgoing light-tree are released and reconfigured to avoid a failure node. Although there is a number of light-tree not directly interrupted by the failure, a network using this protection is capable of rearranging them in the restoration process. Accordingly, this protection strategy is, in principle, considered very flexible to handle any interruption, resulting in the minimal requirement of capacity to resource.

1.1) VLT wavelength assignment strategy

$$Min: \sum_{mn \in L} fb_{mn} \qquad (18)$$

$$\sum_{mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} = |N_i| - 1 \qquad \forall i, \forall mn \in L, \forall f \in N \qquad (19)$$

$$\sum_{mn \in \partial(S)} Xb_{i,f}^{mn} \geq 1 \qquad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \varnothing, N, \forall f \in N \qquad (20)$$

$$\sum_{n:mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} \leq \Delta \qquad \forall m \in N_i, \forall i, \forall f \in N \qquad (21)$$

$$Xb_{i,f}^{mn} \in \{0,1\} \qquad \forall m,n \in A_i, \forall i, \forall f \in N \qquad (22)$$

$$\sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} = txXb_{i,f}^{sd} \qquad \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \qquad (23)$$

$$Mxfb_{mn} - \sum_{i} \sum_{sd} \sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} \mu_{mn,r}^{sd,f} \geq 0$$

$$\forall r \in B_f^{sd}, \forall f \in N, \forall mn \in L \qquad (24)$$

$$fb_{mn} \geq fp_{mn} \qquad \forall mn \in L \qquad (25)$$

$$B_{i,r,f}^{sd} \in Z^+ \qquad \forall r \in B_f^{sd}, \forall sd \in A_i, \forall f \in N, \forall i \qquad (26)$$

$$fb_{mn} \in Z^+ \qquad \forall mn \in L \qquad (27)$$

The objective function (18) is to minimize the total number of spare fiber of a network with the reconfiguration of entire network. Constraints (19)-(22) are provided to ensure that , in an event of node failure, all light-tree of the network are able to reconfigure to avoid the failure. Constraints (23) ensure that, upon the node failure the exactly backup physical routes are selected for optical branches of the light-trees. Constraints (24) ensure that upon the node failure, the number of fiber assigned to the link *mn* is high enough accommodate the restoration routes of all reconfigurate light-trees. Constraints (25) ensure that after node *f* is failure, number of spare fiber can be support traffic for working and protection method. Finally, constraint (26) and (27) express that the variable of restoration routes of light-trees and the number of fibers of each network link must be nonnegative integers.

2).Reconfiguration of traffic traversing through affected node

For this protection strategy, some part of this protection mechanism is identical to the first strategy. Employing this strategy, the protection permits only light-tree traversing a failure node to reconfigurate with node-disjoint protection.

Node-disjoint protection is only require the arrangement of the physical route that are pass through a failure node. However, in this protection strategy, the intermediate node in primary route and backup route must be chosen from different nodes. This mean that the network must chosen a backup route that do not pass intermediate node in primary route.

2.1) VLT wavelength assignment strategy

$$Min: \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn}) \qquad (28)$$

Subject to the constraint (1)-(4),(6)-(9),(19)-(22) and

$$P_{itf,p,f}^{sd} \delta_{p,f}^{sd} - \sum_{ra \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{i,ra,f}^{sd} = 0$$

$$\forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \qquad (29)$$

$$\sum_{ra \in NDJ(P_{i,p,f}^{sd})} B_{itf,ra,f}^{sd} = txXb_{itf,f}^{sd} \quad \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \qquad (30)$$

$$Mxft_{mn} - \sum_{itf} \sum_{sd} \sum_{ra \in NDJ(P_{itf,p,f}^{sd})} B_{itf,ra,f}^{sd} \mu_{mn,ra}^{sd,f} \geq 0$$

$$\forall ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f}), \forall f \in N, \forall mn \in L \qquad (31)$$

$$B^{sd}_{itf,ra,f} \in Z^{+}$$

$$\forall ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f}), \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \qquad (32)$$

$$ft_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \qquad (33)$$

The objective function (28) is the minimization of the number of working and spare fibers. Constraints (1)-(4) and (6)-(9) are used to obtain the working light-tree structure of multicast traffic. Before explaining constraint (29)-(31), a new terminology is introduced. For each primary path $P^{sd}_{i,p,f}$, $NDJ(P^{sd}_{i,p,f})$ is denoted as a set of candidate node disjoint backup path with respect to path $P^{sd}_{i,p,f}$ which traverses through failure node. Constraint (29) ensures that upon a failure node, the network selects node-disjoint backup path for protection. Constraint (30) ensures that exactly physical backup are selected for optical branches of the light-tree. Constraint (31) is formulated to determine the spare capacity enough to support backup path. Finally, Constraint (32) and (33) are provided to limit the network variables to be only nonnegative integer.

3). Reconfiguration of traffic adjacent to affected node.

For this protection strategy, some part of this protection mechanism is identical to the second strategy. Employing the protection permits the light-tree not only traverses a failure node but also has intermediate nodes connected to failed node. This strategy is reconfigured with node-disjoint protection scheme.

3.1) VLT wavelength assignment strategy

$$Min: \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn} + fa_{mn}) \qquad (34)$$

Subject to the constraint (1)-(4), (6)-(9),(19)-(22),(29)-(33) and

$$P^{sd}_{iaf,p,af}\delta^{sd}_{p,af} - \sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{i,p,f})} B^{sd}_{i,rb,af} = 0$$

$$\forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall f \in N \qquad (35)$$

$$\sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{i,p,af})} B^{sd}_{iaf,rb,af} = txXb^{sd}_{iaf,f}$$

$$\forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall f \in N \qquad (36)$$

$$Mxfa_{mn} - \sum_{iaf}\sum_{sd}\sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af})} B^{sd}_{iaf,rb,af}\mu^{sd,af}_{mn,rb} \geq 0$$

$$\forall rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af}), \forall af \in N, \forall mn \in L \qquad (37)$$

$$B^{sd}_{iaf,rb,af} \in Z^{+}$$

$$\forall rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af}), \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall af \in N \quad (38)$$

$$fa_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \qquad (39)$$

The objective function (34) is the minimization of number of working and spare fibers. Constraints (1)-(4),(6)-(9) and (29)-(33) are used to obtain working light-tree structure and reconfiguration of multicast traffic only session traversing through a failure node. Before explaining constraint (35)-(37), a new terminology is introduced. For each primary path $P^{sd}_{i,p,af}$, $NDJ(P^{sd}_{i,p,af})$ is denoted as a set of candidate node-disjoint backup paths with respect to path $P^{sd}_{i,p,af}$ which has intermediate nodes connected to the failed node. Such intermediate node shall be called Adjacent node. Constraint (35) ensure that to adjacent node, the network selects node-disjoint backup path to distribute traffic away from the failed node. Constraint (36) ensures that exactly physical backup paths are selected for optical branches of light-tree. Constraint (37) is formulated to determine the spare capacity enough to support backup path. Finally, constraint (38) and (39) are provided to limit the network variables to be only nonnegative integer.

4. Simulation result

In this section, we present the simulation result obtained from the ILP formulations by using realistic network structure of 14 nodes and 21 links, referred to as a National Science Foundation Network (NSFNet) as shown in Figure 2. We simulate 56 sessions multicast traffic that each node is determined to be the source node of 4 sessions. Each session has 4 destination nodes. We used fanout parameter (Δ) of 3 and traffic for each sessions is one. All the ILP models implemented for discussion are solved by the CPLEX optimization package [11] with CPU 2.8 GHz, 512 MB of RAM.

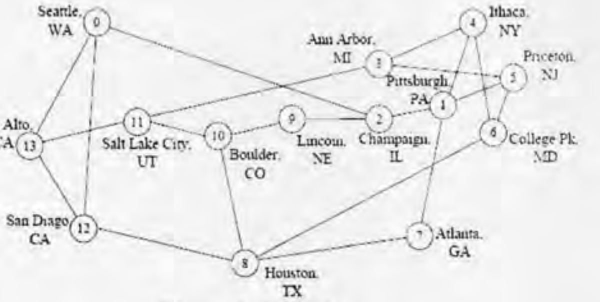


Figure 2. NSFNet

We investigated the result for three protection design approaches. Figure 3 show the total number of fiber required and the number of wavelength per fiber (M). It is shown that the graph characteristic for three protection design approaches exhibits similar trend. Fiber requirement tends to decrease when the value of wavelength per fiber (M) is increased. This is expected because when M increases the channel capacity per fiber is increased and thus more multicast session can be simultaneously supported in the same fiber, exemplifying the key advantage of WDM technology. For example, if network employs fiber with M=2 and M=16, the total number of fibers can be reduced to approximately half of M=1 and M=8.

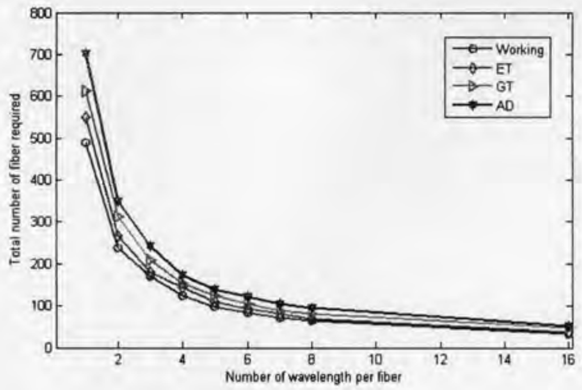


Figure 3. Result for NSFNET

5. Conclusion

In this paper, we have presented ILP formulation for three protection designs in WDM network for single node failure with the objective of minimization total number of fiber required to support multicast traffic. Three protection design approaches namely reconfiguration of entire network (ET), reconfiguration of traffic traversing through failure node (GT) and reconfiguration of traffic adjacent to failure node (AD). We simulated on the proposed work network structure of 14 nodes and 21 links (NSFNet). The results indicate that, for multicast WDM network after node failure occurred, all multicast sessions are released and reestablishment used number of fiber less than the method that considers only the session traversing through the failed node and the method that considers the session traversing through the failed node and adjacent nodes. In AD method, it distributes traffic away from failure node , implying that it reconfigures more sessions than GT method. That is the reason that why AD required more fiber than GT method.

Acknowledgement

This work was supported by the Cooperation Project between Department of Electrical Engineering and Private Sector for Research and Development, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand .

References

[1] C. Siva Ram Murthy. WDM optical networks: Concepts, design, and algorithms. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002.

[2] B. Mukherjee,“ WDM optical communication network: Progress and challenges ”, IEEE J. Select. Areas Commun., vol18,pp 1810-1824, Sept 1998.M.Young, The technical writer ‘s Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.

[3] L. H. Sahasrabuddhe and B., “Multicast Routing Algorithms and Protocols : A Tutorial”, IEEE Network, Vol. 14, pp.90-102, January 2000.

[4] N. Singhal, C. Ou and B. Mukherjee, “Share Protection for Multicast Sessions in Mesh Networks”,Optical Fiber Communication Conference 2005, Vol.6, 2005.

[5] N. Singhal and B. Mukherjee, “Protecting Multicast Sessions in WDM Optical Mesh Networks”,Light wave Technology Journal, Vol.21, No.4, April 2003.

[6] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, “Provision of Survivable Multicast Sessions Against Single Failures in Optical WDM Mesh Networks”, Light wave Technology Journal, Vol.21, No.11, pp.2587-2594, November 2003.

[7] N. Singhal, L. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, “Protecting a Multicast Sessions Against Single Failures in a Mesh Network”, IEEE International Conference, Vol. 2,pp. 1504-1508, May 2003.

[8] A.Khalil, A. Hadjiantonis and M.A. Ali, “Pre-planed Multicast Protection Approaches in WDM Networks”, Optical Communication ECOC 2005, pp. 25-26, September 2005.

[9] C. Boworntummarat, “Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks,” A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University, 2003.

[10] L. H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee, “Light-trees: Optical multicasting for improved performance in wavelength-routed networks,” IEEE Communication Magazine, vol. 37, no. 2, pp. 67-73, February 1999

[11] ILOG CPLEX User’s manual. Available: http://www.cplex.com

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย คุณนันต์ ลือกิจนา เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัดสระบุรี เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547