

Peran Disjoint Path dalam Memperbaiki Probabilitas Blocking Jaringan MIN Topologi Gamma

Fahmi Rinaldi¹⁾, Muhammad Zulfin²⁾, Raja Harahap³⁾, Rahmad Fauzi⁴⁾, Sihar P. Panjaitan⁵⁾

¹⁾Program Studi Nautika, Politeknik Adiguna Maritim Indonesia Medan, Indonesia

^{2,3,4,5)}Program Studi Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara Medan, Indonesia

fahmi.rinaldi@gmail.com; m.zulfin@usu.ac.id; raja@usu.ac.id;

ra.fauzi@usu.ac.id; siharpanjaitan@usu.ac.id

Abstrak

Jaringan Gamma merupakan salah satu Multistage Interconnection Network (MIN) yang menyediakan beberapa jalur antara pasangan sumber–tujuan ($S-T$), tetapi sebagian jalurnya pada Gamma Original masih bersifat partially disjoint. Penelitian ini mengevaluasi secara komparatif pengaruh ketersediaan 1–3 disjoint path terhadap probabilitas blocking pada jaringan Gamma 8×8 . Tiga konfigurasi dibandingkan, yaitu Gamma Original, GM 2DP, dan GM 3DP, dengan algoritma routing berbasis routing tag/distance tag, prioritas alamat sumber terkecil, dan rerouting ketika terjadi konflik pada elemen switching (ES). Evaluasi menggunakan dua permutasi koneksi $S-T$ yang diberikan secara simultan. Hasil menunjukkan bahwa pada Permutasi 1 ketiga konfigurasi menghasilkan blocking 0%. Pada Permutasi 2, Gamma Original menghasilkan 2 dari 8 koneksi gagal atau probabilitas blocking 25%, GM 2DP menghasilkan 1 dari 8 koneksi gagal atau 12,5%, sedangkan GM 3DP tidak mengalami kegagalan atau 0%. Dengan demikian, dibandingkan Gamma Original, penambahan dua disjoint path menurunkan blocking sebesar 50% secara relatif, sedangkan tiga disjoint path menghilangkan blocking pada skenario pengujian tersebut. Kontribusi penelitian ini bukan berupa topologi baru, melainkan bukti eksperimental terkendali bahwa peningkatan jumlah jalur yang benar-benar disjoint meningkatkan keberhasilan routing pada beban permutasi yang sama. Temuan ini dibatasi pada jaringan 8×8 dan dua permutasi, sehingga pengujian lebih luas diperlukan untuk generalisasi.

Kata Kunci: Multistage Interconnection Network, Gamma Network, Disjoint Path, Rerouting, Probabilitas Blocking, Fault Tolerance

I. PENDAHULUAN

Multistage Interconnection Network (MIN) tetap relevan sebagai infrastruktur interkoneksi pada sistem paralel karena mengurangi kompleksitas switching dibandingkan crossbar penuh, sekaligus menyediakan struktur routing yang teratur. Perkembangan desain MIN mutakhir menunjukkan kecenderungan meningkatkan redundansi jalur, reliabilitas, dan fault tolerance melalui modifikasi pola interkoneksi, penambahan jalur disjoint, serta penggunaan MUX/DEMUX atau replikasi struktur. Studi 2023–2026 menunjukkan bahwa fokus riset bergeser dari sekadar menyediakan banyak jalur menuju penyediaan jalur yang benar-benar terpisah dan evaluasi reliabilitas/performa secara kuantitatif. [1]–[5]

Dalam konteks switching, blocking terjadi ketika koneksi sumber–tujuan tidak dapat dibentuk karena elemen switching atau link yang dibutuhkan telah digunakan oleh koneksi lain. Karena itu, probabilitas blocking merupakan metrik langsung untuk mengevaluasi kemampuan routing dalam melayani permintaan koneksi secara simultan. Hasil penelitian terdahulu pada Gamma dan turunannya menunjukkan bahwa redundansi jalur dapat meningkatkan fault tolerance, tetapi jumlah jalur alternatif tidak selalu identik dengan jumlah jalur yang totally disjoint. [2]–[6]

Gamma Interconnection Network (GIN) memiliki karakter multipath yang bergantung pada

nilai tag antara sumber dan tujuan. Namun, jalur alternatif pada Gamma Original dapat berbagi elemen switching tertentu, sehingga sebuah titik konflik atau kegagalan dapat mempengaruhi lebih dari satu jalur. Penelitian terbaru mengenai FT Gamma-Minus, 4-Disjoint MIN, replicated 4-Disjoint GIN, dan arsitektur multipath 8×8 memperlihatkan bahwa disjointness merupakan faktor penting dalam meningkatkan toleransi gangguan dan reliabilitas. [1]–[5], [7]

Berdasarkan state of the art tersebut, terdapat gap yang lebih spesifik pada evaluasi probabilitas blocking: banyak penelitian menekankan terminal reliability atau fault tolerance, sedangkan perbandingan langsung antara jumlah disjoint path dan blocking di bawah pola permutasi serta kebijakan routing yang sama masih perlu diperjelas. Penelitian sebelumnya oleh penulis menunjukkan bahwa jalur redundan dapat menurunkan blocking pada Gamma, tetapi belum membedakan secara eksplisit efek 1, 2, dan 3 jalur yang benar-benar disjoint pada skenario pengujian yang identik. [6]

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mengukur pengaruh jumlah disjoint path terhadap probabilitas blocking pada jaringan Gamma 8×8 dengan membandingkan Gamma Original, GM 2DP, dan GM 3DP. Novelty penelitian terletak pada evaluasi eksperimental yang dikendalikan pada tiga tingkat disjointness dengan permutasi dan aturan prioritas yang sama, kemudian mengkuantifikasi penurunan blocking dan

kebutuhan rerouting. Kontribusi tersebut bersifat evaluatif dan komparatif, bukan klaim penciptaan topologi baru.

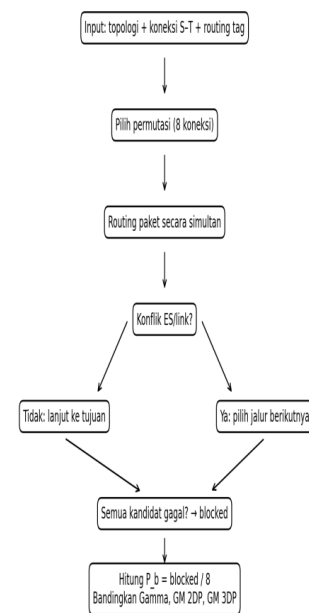
Urgensi mengenai *disjoint path* ini muncul karena GIN klasik masih memiliki kelemahan mendasar. Jalur redundan yang disediakan umumnya bersifat *partially disjoint*, bukan *totally disjoint*. Artinya, jalur-jalur tersebut masih berbagi setidaknya satu elemen *switching* (ES) yang sama, sehingga kegagalan pada satu ES tersebut dapat memblokir seluruh jalur alternatif secara bersamaan [7]. Sebagai upaya mitigasi, dikembangkanlah varian baru seperti GIN dengan 2 jalur *disjoint* (2DGIN) dan GIN dengan 3 jalur *disjoint* (3DGIN) yang dioptimalkan untuk memanfaatkan arsitektur jalur *disjoint* secara lebih efektif.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian menggunakan pendekatan simulasi deterministik-komparatif pada jaringan 8×8 . Variabel bebas adalah jumlah disjoint path yang tersedia pada tiga konfigurasi jaringan, sedangkan variabel terikat adalah probabilitas blocking. Semua konfigurasi menggunakan delapan koneksi sumber–tujuan pada setiap permutasi, kedatangan paket simultan, prioritas alamat sumber terkecil, dan mekanisme rerouting sampai seluruh jalur yang tersedia dicoba. Dengan demikian, perbedaan hasil blocking terutama dikaitkan dengan struktur jalur yang tersedia, bukan perubahan beban trafik atau kebijakan prioritas.

Parameter simulasi: ukuran jaringan $N=8 \times 8$; jumlah koneksi per permutasi=8; konfigurasi=3; permutasi=2; trafik point-to-point; kedatangan simultan; prioritas=alamat sumber terkecil; metrik $P_b = B/N_c$, dengan B jumlah koneksi gagal dan N_c jumlah koneksi yang ditawarkan. Untuk replikasi, lingkungan komputasi dapat menggunakan Python 3.x dengan struktur data untuk representasi ES, routing tag, dan penghitung keberhasilan/gagal. Karena data penelitian hanya mencakup dua permutasi, analisis statistik dibatasi pada statistik deskriptif dan effect comparison, bukan uji signifikansi inferensial.

Pseudocode algoritma umum: (1) input topologi, koneksi S–T, dan routing tag; (2) untuk setiap permutasi, masukkan seluruh paket secara simultan; (3) pilih jalur kandidat pertama; (4) jika ES/link tersedia, lanjutkan ke tingkat berikutnya; (5) jika konflik, pilih kandidat berikutnya sesuai aturan rerouting; (6) jika seluruh kandidat gagal, tandai blocked; (7) hitung $P_b = \text{blocked}/8$; dan (8) bandingkan Gamma Original, GM 2DP, dan GM 3DP.



Gambar 1. Flowchart prosedur simulasi komparatif.

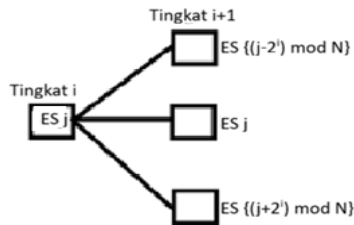
Jaringan Gamma Original yang dimaksudkan di sini adalah sama dengan jaringan GIN yang telah dipaparkan pada bagian terdahulu. Ia adalah jaringan interkoneksi yang menghubungkan masukan $N=2^n$ ke keluaran N. Jaringan ini terdiri dari $\log_2 N$ tingkat dengan N *switch* per tingkat. Pada tingkat tengah, jaringan dibangun dari ES *crossbar* 3 masukan dan 3 keluaran. Tingkat-tingkat tersebut dihubungkan melalui koneksi "pangkat dua" dan identitas sedemikian rupa sehingga terdapat jalur redundan antara terminal masukan dan keluaran. Sedangkan ES berukuran 1×3 dan 3×1 masing-masing membangun tingkat pertama dan tingkat terakhir. Dalam jaringan ini, jalur dari sumber ke tujuan dapat direpresentasikan menggunakan salah satu bentuk redundan dari selisih antara nomor sumber dan tujuan [8].

Hubungan jumlah tingkat dengan ukuran jaringan Gamma dinyatakan $N = 2^{(n-1)}$, sehingga $n = \log_2(N)+1$. Sebagai contoh, untuk $n=4$ diperoleh $N=8 \times 8$, sedangkan $N=16 \times 16$ membutuhkan $n=5$ tingkat.

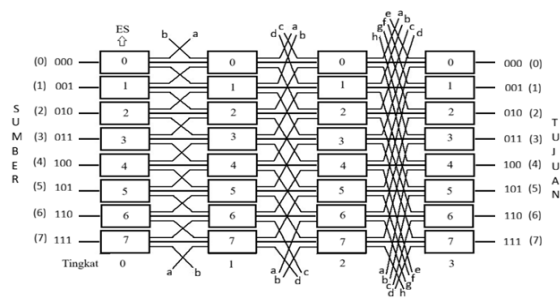
Pada jaringan Gamma original, koneksi satu tingkat ke tingkat berikutnya dilakukan berdasarkan aturan tertentu. Jika diasumsikan bahwa $i \{0 \leq i \leq (\log_2 N)\}$ adalah nomor tingkat dan $j \{0 \leq j \leq N-1\}$ adalah nomor ES, maka terdapat tiga kemungkinan koneksi dari tingkat i ke tingkat $i+1$ [9]:

- Link dari ES j pada tingkat i terhubung langsung ke ES j pada tingkat $i+1$.
- Link dari ES j pada tingkat i mengambil jalur ke atas untuk mencapai ES $(j - 2^i) \bmod N$ pada tingkat $i+1$.
- Link dari ES pada tingkat i mengambil jalur ke bawah untuk mencapai ES $(j + 2^i) \bmod N$ pada tingkat $i+1$.

Jadi, jika sebuah paket masuk dari sebuah ES pada tingkat i , paket tersebut dapat keluar ke ES tertentu pada tingkat $i+1$ sesuai dengan ketentuan di atas. Gambar 2 menunjukkan pola koneksi antar tingkat pada jaringan Gamma. Sedangkan Gambar 2 memperlihatkan sebuah jaringan Gamma original berukuran 8×8 .



Gambar 2. Pola koneksi antar tingkat jaringan Gamma original.



Gambar 3. Jaringan Gamma Original berukuran 8×8

Jaringan Gamma memiliki sejumlah jalur redundan antara setiap pasangan koneksi S-T. Jalur redundan memberi pilihan routing alternatif, sedangkan disjoint path mensyaratkan tidak adanya ES bersama pada bagian internal jalur. Perbedaan ini penting karena banyak jalur redundan belum tentu memberikan fault tolerance yang setara dengan jumlah jalur yang totally disjoint. [2], [3], [6]

Dalam representasi setiap $tag \square = T - S \pmod N$, jaringan Gamma menerapkan sistem bilangan biner yang sepenuhnya redundan. Karakteristik sistem ini memungkinkan $tag \square \neq 0$ memiliki lebih dari satu representasi, yang sekaligus menyediakan beberapa pilihan jalur koneksi dalam jaringan.

Tabel 1 memperlihatkan hubungan antara ukuran jaringan N , jumlah tingkat n dan nilai $tag \delta$ terhadap jumlah jalur redundan sebuah jaringan Gamma original berukuran 8×8 [10].

Tabel 1. Hubungan N , n , dan δ terhadap jumlah jalur redundan

Nilai $tag \delta$	Jumlah Jalur Redundan			
	($N=2, n=2$)	($N=4, n=3$)	($N=8, n=4$)	($N=16, n=5$)
0	1	1	1	1
1	2	3	4	5
2		2	3	4
3		3	5	7
4			2	3
5			5	8
6			3	5
7			4	7
8				2
9				7

10				5
11				8
12				3
13				7
14				4
15				5
Total	3	9	27	81

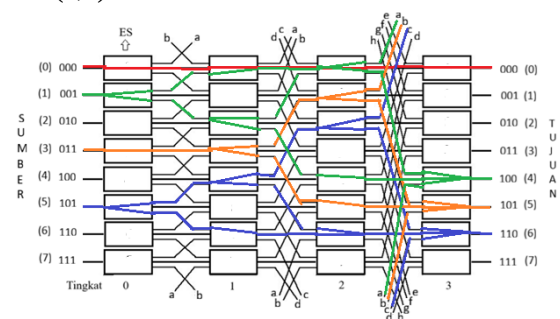
Dengan adanya jalur redundan untuk setiap koneksi (S-T) jaringan Gamma memiliki toleransi kegagalan yang lebih tinggi dibandingkan dengan jaringan MIN dasar seperti: delta, banyan, omega, shuffle exchange dan yang lainnya. Tabel 2 memperlihatkan jumlah jalur redundan dan pola representasi redundan jaringan Gamma 8×8 ($N=8$) dengan berbagai nilai $tag \delta$. *Least significant bit* (LSB) adalah bit yang berada paling kiri.

Tabel 2. Representasi Jalur Redundan Jaringan Gamma 8×8

Nilai $tag \delta$	Jumlah jalur redundan	Jalur redundan (routing tag)
0	1	(0, 0, 0)
1	4	(1, 0, 0), (-1, -1, 1), (-1, 1, 0), (-1, -1, -1)
2	3	(0, 1, 0), (0, -1, 1), (0, -1, -1)
3	5	(1, 1, 0), (-1, 0, 1), (-1, 0, -1), (1, -1, -1), (1, -1, 1)
4	2	(0, 0, 1), (0, 0, -1)
5	5	(1, 0, 1), (-1, 1, 1), (-1, -1, 0), (1, 0, -1), (-1, 1, -1)
6	3	(0, 1, 1), (0, 1, -1), (0, -1, 0)
7	4	(1, 1, 1), (1, -1, 0), (-1, 0, 0), (1, 1, -1)

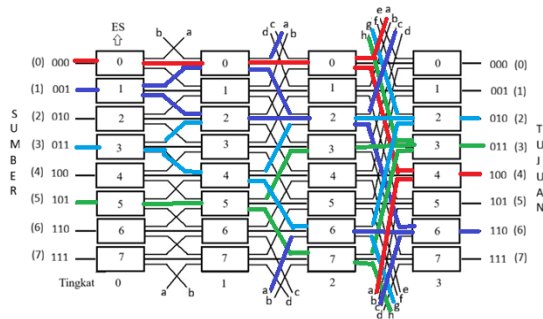
2.1 Jalur Disjoint pada Gamma Original

Untuk mengetahui jalur *disjoint* yang terdapat pada sebuah jaringan Gamma original caranya adalah dengan menggambarkan jalur redundan dari setiap tag yang terdapat pada Tabel 2. Gambar 3 memperlihatkan jalur redundan untuk nilai $tag \delta = 0$ (merah), 1(biru), 2 (jingga) dan 3(hijau) yang masing-masing dengan koneksi (0,0), (5,6),(3,5) dan (1,4).



Gambar 4 . Jalur redundan jaringan Gamma Original dengan $tag \delta = 0, 1, 2$ dan 3.

Gambar 4 memperlihatkan jalur redundan untuk nilai $tag \delta = 4$ (merah), 5 (biru), 6 (hijau) dan 7 (biru muda) yang masing-masing dengan koneksi (0,4), (1,6),(5,3) dan (3,2).



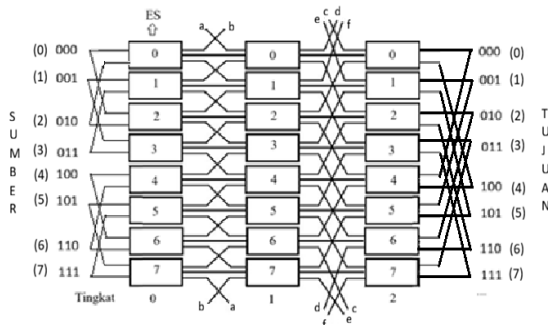
Gambar 5 . Jalur redundan Gamma Original dengan tag $\delta = 4, 5, 6$ dan 7.

Dari Gambar 4 dan 5 terlihat bahwa jalur alternatif pada Gamma Original tidak seluruhnya totally disjoint. Sebagian pasangan jalur masih berbagi ES internal. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa penambahan jumlah jalur redundan saja belum cukup untuk menjamin penurunan blocking: konflik pada ES yang sama dapat tetap memblokir beberapa alternatif secara bersamaan.

2.2 Jaringan Gamma yang Dimodifikasi (GM)

A. Jaringan GM dengan 2 Disjoint Path (2DP)

Jaringan Gamma yang dimodifikasi (GM) dengan 2 disjoint path (2DP) pada tulisan ini diadopsi dari jaringan MGN (*Modified Gamma Network*) [11]. Jaringan MGN pada dasarnya adalah jaringan Gamma Minus yang dimodifikasi. Selain pengurangan jumlah tingkat, pada MGN juga dilakukan perbaikan koneksi pada bagian Input dan Output-nya. Desain topologi jaringan Gamma MGN ini diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Jaringan Gamma MGN berukuran 8x8

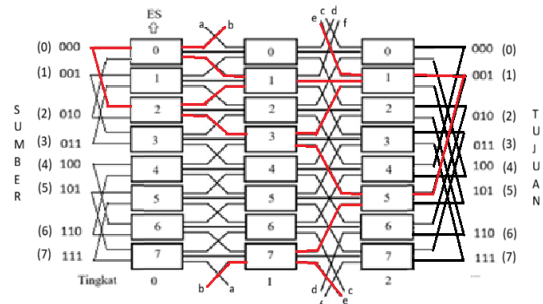
Dari Gambar 6 tampak bahwa jaringan MGN memiliki n jumlah tingkat, sedangkan pada GIN terdapat $n+1$ jumlah tingkat. Jaringan MGN menggunakan ES berukuran 2×3 dan ES 3×2 masing-masing pada tingkat input dan output. berbeda dengan GIN yang menggunakan ES berukuran 1×3 dan 3×1 pada tingkat input dan output. Untuk ukuran jaringan $N = 8$, jaringan MGN memiliki 3 tingkat, sedangkan GIN memiliki 4 tingkat dengan 8 ES di setiap tingkat untuk kedua jaringan. Pola koneksi antar semua tingkat pada jaringan MGN sama dengan GIN kecuali

terdapat dua terminal input yang terhubung pada ES input dan dua terminal output yang terhubung pada ES output.

Skema perutean yang digunakan di sini menggunakan *distance tag* yang terdiri dari $\{d_0, d_1, d_2, \dots, d_{n-1}\}$ dihitung dengan mengurangi *tag* sumber $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_{n-1}\}$ dari *tag* tujuan $= \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}\}$ pada tingkat yang sesuai $j = \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$. *Distance tag* terdiri dari tiga nilai '0', '1' atau '-1'. Nilai tag '0' menunjukkan link lurus harus diikuti dari tingkat j ke tingkat $j + 1$ sedangkan nilai '1' menunjukkan bahwa link ke bawah harus diikuti dari tingkat j ke tingkat $j + 1$. Sedangkan nilai '-1' menunjukkan bahwa link ke atas harus diikuti dari tingkat j ke tingkat $j + 1$.

Jaringan MGN ini memiliki dua *disjoint path* antara setiap pasangan node Sumber-Tujuan (S-T). Gambar 6 memperlihatkan pola koneksi jaringan Gamma MGN.

1. Jika node sumber 000 ingin berkomunikasi dengan node tujuan 001, pola koneksi yang ditunjukkan oleh garis merah akan diikuti. Oleh karena terminal sumber=000 dan terminal tujuan=001, maka tag jarak dihitung sebagai $t = 001 - 000 = 001$ (bit paling kanan merupakan *least significant bit*).
2. Node sumber 000 terhubung ke dua ES (0 dan 2) pada tingkat 0.
3. Kedua ES ini selanjutnya terhubung ke 3 ES (1, 3 dan 7) pada tingkat 1. Dengan kata lain, ES j pada tingkat 1 terhubung ke ES $j \pm 1$ pada tingkat 2.
4. ES selanjutnya pada tingkat 1 terhubung ke dua ES (1 dan 5) pada tingkat 2 yang terhubung ke *node* output yang dibutuhkan 001. Dengan kata lain ES j pada tingkat 1 terhubung ke ES $j \pm 2$ pada tingkat 2.

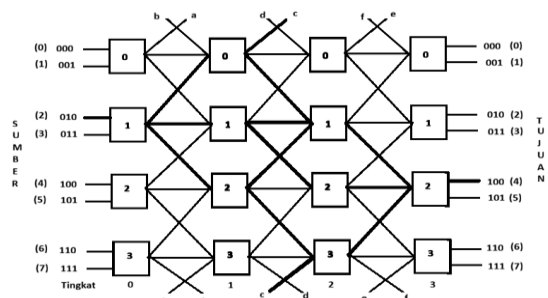


Gambar 7. Pola koneksi antar tingkat jaringan MGN 8x8

2.3 Jaringan GM dengan 3 disjoint Path (3DP)

Desain ini adalah modifikasi dari GIN. Desain GM 3DP ini memiliki total tujuh jalur untuk semua nilai *tag* yang seragam. Dari tujuh jalur tersebut, terdapat tiga *disjoint path* yang meningkatkan kemampuan toleransi kesalahan hingga dua kesalahan. Gambar 8 menunjukkan diagram koneksi dari desain jaringan GM 3DP

untuk $N = 8$. Jaringan ini memiliki jumlah tingkat $\log_2 N + 1$ dan setiap tingkat memiliki jumlah ES sebanyak $N/2$. Dalam desain ini, tingkat 0 dan tingkat 4 masing-masing memiliki ukuran ES 2×3 dan 3×2 , sedangkan tingkat menengah memiliki ES yang berukuran 3×3 di setiap tingkat. Di semua tingkat, setiap ES (ke- j) berisi tiga link keluaran; dari ketiga link tersebut, satu lurus dan dua lainnya tidak lurus (satu mengarah ke atas dan satu mengarah ke bawah). Setiap penghubung lurus dihubungkan ke nomor ES yang sama pada tingkat berikutnya, penghubung lurus ke atas dihubungkan ke ES $j-1$ dan penghubung ke bawah dihubungkan ke ES $j+1$ pada tingkat berikutnya. Jika nilai ES yang diperoleh kurang dari 0 maka ditambah 4. Namun jika lebih besar dari 3, maka harus dikurangi 4 [12].



Gambar 8. Desain GM 3DP. Garis tebal menunjukkan jalur untuk koneksi -D (2,4)

2.4 Pengujian dan Perutean Paket pada Jaringan Gamma Original dan GM

A. Perutean pada Jaringan Gamma Original

Pada bagian ini dibahas mekanisme perutean pada jaringan Gamma Original berukuran 8×8 . Proses perutean dilakukan dengan menerapkan algoritma sederhana sebagai berikut:

- Diasumsikan bahwa koneksi *input-output* (permutasi) terdistribusi secara uniform (*point-to-point*).
- Paket diasumsikan memasuki jaringan secara serentak (simultan).
- Saat pertama kali memasuki jaringan, paket menggunakan *routing tag* pertama sesuai urutan pada Tabel 2.
- Jika dua paket atau lebih memperebutkan ES yang sama, paket dengan alamat sumber terkecil diberikan prioritas untuk melanjutkan transmisi.
- Paket yang kalah dalam kompetisi pada suatu ES dapat melakukan perutean kembali (*rerouting*) menggunakan *routing tag* berikutnya (kedua, ketiga, dan seterusnya).
- Jika paket telah mencoba seluruh *routing tag* yang tersedia dan tetap gagal mencapai tujuan, paket tersebut akan dibuang (*dropped*) dan dapat mencoba kembali pada siklus berikutnya.

B. Perutean pada Jaringan GM 2DP

Pada bagian ini dibahas mekanisme perutean pada jaringan GM 2DP berukuran 8×8 . Proses perutean dilakukan dengan menerapkan algoritma sederhana sebagai berikut:

Diasumsikan bahwa koneksi *input-output* (permutasi) terdistribusi secara uniform (*point-to-point*).

- Paket diasumsikan memasuki jaringan secara serentak (simultan).
- Saat pertama kali memasuki jaringan, paket menggunakan *distance tag* (*tag jarak*) yang merupakan selisih alamat tujuan dengan alamat sumber.
- Jika dua paket atau lebih memperebutkan ES yang sama, paket dengan alamat sumber terkecil diberikan prioritas untuk melanjutkan transmisi.
- Paket yang kalah dalam kompetisi pada suatu ES dapat melakukan perutean kembali (*rerouting*) menggunakan link input kedua dengan menggunakan *distance tag* baru.
- Jika paket telah mencoba *distance tag* baru melalui link input yang kedua namun tetap gagal mencapai tujuan, selanjutnya paket tersebut akan dibuang (*dropped*) dan dapat mencoba kembali pada siklus berikutnya.

2.5 Perutean pada Jaringan GM 3DP

Pada bagian ini dipaparkan mekanisme perutean pada jaringan GM 3DP yang berukuran 8×8 . Proses perutean dilakukan dengan menerapkan algoritma sederhana sebagai berikut:

- Diasumsikan bahwa koneksi *input-output* (permutasi) terdistribusi secara uniform (*point-to-point*).
- Diasumsikan bahwa paket memasuki jaringan secara serentak (simultan).
- Jika dua paket atau lebih memperebutkan link input ES yang sama, paket dengan alamat sumber yang lebih kecil diberikan prioritas untuk melanjutkan transmisi.
- Saat pertama kali memasuki jaringan, paket dari tingkat i menggunakan jalur bawah ($j+1$) menuju ke tingkat $i+1$.
- Jika paket gagal menggunakan jalur $j+1$, selanjutnya paket mencoba merute melalui jalur atas ($j-1$). Jika jalur ini sudah digunakan, maka paket menggunakan jalur lurus (j) menuju tingkat $i+1$.
- Jika ke 3 jalur (bawah, atas dan lurus) gagal, maka paket di-drop dan dapat mencoba kembali pada siklus berikutnya.

2.6 Pengujian Kinerja Probabilitas Blocking

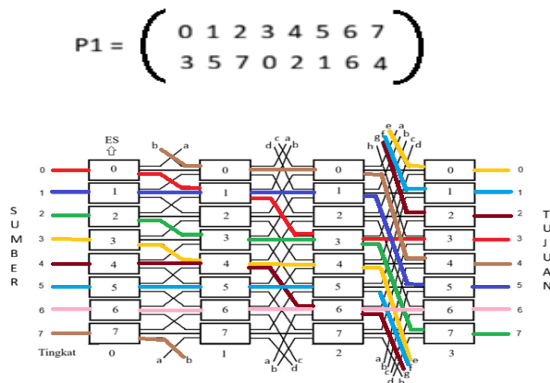
Revisi metodologi menggunakan kriteria evaluasi yang identik untuk ketiga topologi. Oleh karena itu, perbandingan $25\% \rightarrow 12,5\% \rightarrow 0\%$ pada Permutasi 2 dibaca sebagai efek bertambahnya disjoint path dalam skenario uji

yang sama, bukan sebagai perbandingan beban trafik yang berbeda.

Pada bagian ini dibahas pengujian kinerja probabilitas *blocking* jaringan Gamma Original, jaringan GM 2DP dan jaringan GM 3DP. Untuk mendapatkan hasilnya, dilakukan pengujian dengan menggunakan 2 (dua) permutasi. Secara berturut-turut pengujian dilakukan terhadap jaringan Gamma original, jaringan GM 2DP dan jaringan GM 3DP.

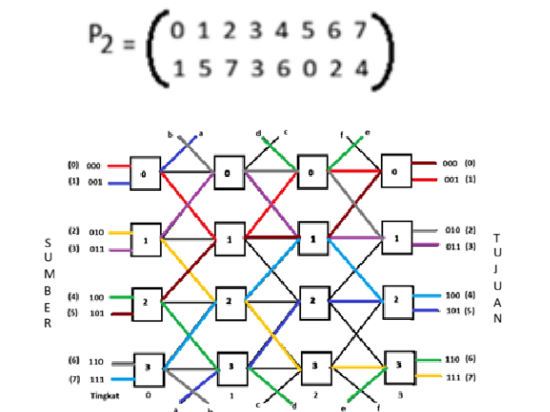
2.7 Pengujian terhadap Jaringan Gamma original

Permutasi 1



Gambar 9. Hasil pengujian jaringan Gamma Original berdasarkan permutasi 1

Permutasi 2



Gambar 10. Hasil pengujian GM 3DP berdasarkan permutasi 2

III. ANALISIS KINERJA

3.1 Jaringan Gamma Original

Pada Permutasi 1, seluruh 8 koneksi pada Gamma Original berhasil, sehingga $P_b=0/8=0\%$. Kondisi ini menunjukkan bahwa permutasi tersebut tidak menghasilkan konflik yang tidak dapat diselesaikan oleh routing tag pertama. Namun, hasil ini belum membuktikan keunggulan reliabilitas karena tidak ada blocking pada semua konfigurasi.

Tabel 3. Hasil Perutean Paket dengan Permutasi 1

Koneksi	Nilai Tag	Jumlah Jalur Redundan	Jalur Redundan yang digunakan	Berhasil/ Gagal
(0,3)	3	5	1	Berhasil
(1,5)	4	2	1	Berhasil
(2,7)	5	5	1	Berhasil
(3,0)	5	5	1	Berhasil
(4,2)	6	3	1	Berhasil
(5,1)	4	2	1	Berhasil
(6,6)	0	1	1	Berhasil
(7,4)	2	3	1	Berhasil

Selanjutnya dari Gambar 10 dapat dilihat bahwa jalur yang dilintasi paket untuk permutasi 2 dengan hasil seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Perutean Paket dengan Permutasi 2

Koneksi	Nilai Tag	Jumlah Jalur Redundan	Jalur Redundan yang digunakan	Berhasil/ Gagal
(0,1)	1	4	1	Berhasil
(1,5)	4	2	2	Gagal
(2,7)	5	5	1	Berhasil
(3,3)	0	1	1	Gagal
(4,6)	2	3	1	Berhasil
(5,0)	3	5	1	Berhasil
(6,2)	4	2	1	Berhasil
(7,4)	5	5	1	Berhasil

Pada Permutasi 2, Gamma Original mengalami 2 kegagalan dari 8 koneksi, sehingga $P_b=2/8=25\%$. Koneksi (1,5) gagal setelah seluruh dua routing tag yang tersedia dicoba, sedangkan (3,3) gagal karena jalur tunggalnya telah terduduki. Hasil ini memperlihatkan perbedaan penting antara jumlah jalur redundan dan jumlah jalur disjoint: dua alternatif yang berbagi ES dapat tetap gagal akibat satu titik konflik yang sama.

3.2 Jaringan GM 2DP

Dari Gambar 10 tampak bahwa seluruh paket dari setiap sumber dengan koneksi input-output (permutasi 1) berhasil mencapai tujuan hanya dengan menggunakan satu jalur *disjoint*. Sehingga Probabilitas *blocking* dengan permutasi 1 sama dengan nol. Tabel 5 memperlihatkan hasil perutean paket menggunakan permutasi 1.

Tabel 5. Hasil Perutean Paket dengan Permutasi 1

Koneksi	Jumlah Jalur Disjoint	Jalur Disjoint yang digunakan	Berhasil/ Gagal
(0,3)	2	1	Berhasil
(1,5)	2	1	Berhasil
(2,7)	2	1	Berhasil
(3,0)	2	1	Berhasil
(4,2)	2	1	Berhasil
(5,1)	2	1	Berhasil
(6,6)	2	1	Berhasil
(7,4)	2	1	Berhasil

Selanjutnya dari Gambar 11 dapat dilihat bahwa jalur yang dilintasi paket untuk permutasi 2 dengan hasil seperti pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Perutean Paket dengan Permutasi 2

Koneksi	Jumlah Jalur Disjoint	Jalur Disjoint yang digunakan	Berhasil/Ga gal
(0,1)	2	1	Berhasil
(1,5)	2	2	Berhasil
(2,7)	2	1	Berhasil
(3,3)	2	2	Gagal
(4,6)	2	1	Berhasil
(5,0)	2	1	Berhasil
(6,2)	2	1	Berhasil
(7,4)	2	1	Berhasil

Pada GM 2DP, koneksi (1,5) dapat berpindah ke jalur disjoint kedua ketika jalur pertamanya mengalami konflik. Hanya koneksi (3,3) yang tetap gagal, sehingga $P_b=1/8=12,5\%$. Dibandingkan Gamma Original pada permutasi yang sama, blocking turun dari 25% menjadi 12,5%, atau penurunan relatif sebesar 50%. Ini merupakan bukti deskriptif bahwa disjointness memberi manfaat tambahan dibandingkan sekadar menambah jalur redundan.

3.3 Jaringan GM 3 DP

Dari Gambar 9 tampak bahwa seluruh paket dari setiap sumber dengan koneksi input-output (permutasi 1) berhasil mencapai tujuan hanya dengan menggunakan satu jalur *disjoint*. Sehingga Probabilitas *blocking* dengan permutasi 1 sama dengan nol. Tabel 7 memperlihatkan hasil perutean paket menggunakan permutasi 1.

Tabel 7. Hasil Perutean Paket dengan Permutasi 1

Koneksi	Jumlah Jalur Disjoint	Jalur Disjoint yang digunakan	Berhasil/Ga gal
(0,3)	3	1	Berhasil
(1,5)	3	1	Berhasil
(2,7)	3	1	Berhasil
(3,0)	3	1	Berhasil
(4,2)	3	1	Berhasil
(5,1)	3	1	Berhasil
(6,6)	3	1	Berhasil
(7,4)	3	1	Berhasil

Selanjutnya dari Gambar 10 dapat dilihat bahwa jalur yang dilintasi paket untuk permutasi 2 dengan hasil seperti pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perutean Paket dengan Permutasi 2

Koneksi	Jumlah Jalur Disjoint	Jalur Disjoint yang digunakan	Berhasil/ Gagal
(0,1)	3	1	Berhasil
(1,5)	3	2	Berhasil
(2,7)	3	1	Berhasil
(3,3)	3	2	Berhasil
(4,6)	3	1	Berhasil

(5,0)	3	2	Berhasil
(6,2)	3	2	Berhasil
(7,4)	3	2	Berhasil

Pada GM 3DP, seluruh 8 koneksi pada Permutasi 2 berhasil, meskipun beberapa koneksi membutuhkan jalur disjoint kedua. Dengan demikian $P_b=0/8=0\%$. Dibandingkan Gamma Original, blocking turun 25 poin persentase, atau penurunan relatif 100% pada skenario ini. Dibandingkan GM 2DP, penurunan tambahan adalah 12,5 poin persentase.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa jumlah disjoint path berpengaruh terhadap probabilitas blocking pada jaringan Gamma 8×8 dalam skenario pengujian yang digunakan. Pada Permutasi 1, Gamma Original, GM 2DP, dan GM 3DP semuanya menghasilkan $P_b=0\%$. Pada Permutasi 2, Gamma Original menghasilkan 25%, GM 2DP 12,5%, dan GM 3DP 0%. Dengan demikian, GM 2DP menurunkan blocking relatif 50% terhadap Gamma Original, sedangkan GM 3DP menurunkannya 100% pada skenario tersebut.

Kontribusi penelitian adalah memberikan evaluasi terkontrol yang membandingkan tiga tingkat disjointness dengan aturan routing, jumlah koneksi, dan pola kedatangan yang sama. Hasil memperlihatkan bahwa disjointness memberikan jalur pemulihan yang lebih efektif ketika terjadi konflik ES dibandingkan jalur redundan yang masih berbagi elemen jaringan. Temuan ini konsisten dengan arah penelitian mutakhir yang menempatkan disjoint path sebagai mekanisme penting untuk meningkatkan fault tolerance dan reliability MIN. [1]–[8]

Keterbatasan penelitian adalah ukuran jaringan hanya 8×8 , jumlah permutasi hanya dua, trafik diasumsikan simultan dan uniform, serta tidak dilakukan variasi probabilitas kegagalan ES/link. Oleh sebab itu, hasil belum cukup untuk menyatakan signifikansi statistik atau generalisasi ke semua pola trafik dan ukuran jaringan. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan permutasi acak dalam jumlah besar, ukuran $N=8, 16, 32$, variasi beban trafik, Monte Carlo simulation, serta evaluasi throughput, latency, rerouting overhead, hardware cost, dan terminal reliability.

Analisis kuantitatif memperlihatkan bahwa manfaat disjoint path paling jelas pada Permutasi 2. Setiap tambahan tingkat disjointness mengurangi blocking 12,5 poin persentase: dari 25% pada Gamma Original menjadi 12,5% pada GM 2DP dan 0% pada GM 3DP. Pada Permutasi 1, seluruh konfigurasi sama-sama 0%, sehingga tidak ada ruang pembeda. Dengan hanya dua observasi permutasi, uji statistik inferensial tidak tepat dilakukan; analisis yang valid adalah effect comparison dan deskripsi hasil per koneksi.

Berdasarkan hasil pengujian, jaringan Gamma Original memiliki jumlah jalur *disjoint* yang bervariasi, yakni antara satu atau dua jalur. Data hasil pengujian juga menunjukkan bahwa koneksi dengan jumlah jalur redundan yang lebih sedikit memiliki probabilitas *blocking* yang lebih tinggi dibandingkan koneksi dengan jalur redundan yang lebih banyak. Dengan kata lain, peningkatan jumlah jalur *disjoint* secara linear memperkecil kemungkinan paket terblokir. Analisis lebih lanjut pada Permutasi 1 menunjukkan bahwa seluruh varian jaringan mampu melewati paket tanpa *blocking*. Namun, pada Permutasi 2, jaringan Gamma Original mengalami dua kegagalan dengan probabilitas *blocking* sebesar 25%. Sementara itu, jaringan GM 2DP mencatat satu kegagalan paket dengan probabilitas *blocking* 12,5%, sedangkan jaringan GM 3DP berhasil meloloskan seluruh paket tanpa kegagalan. Hasil ini menegaskan bahwa ketersediaan jalur *disjoint* berperan signifikan dalam menurunkan nilai probabilitas *blocking* pada jaringan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Muhammad Zulfin, dkk., 2023, *The Effect of Redundant Paths on Internal Blocking of Multistage Interconnection Networks*, The 7th International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM).
- [2] M. Głabowski dan M. D. Stasiak, 2016, *Multiservice Switching Networks with Overflow Links and Resource Reservation*, *Math. Probl. Eng.*, Vol. 2.
- [3] S. Rajkumar dan Neeraj Kumar Goyal, 2015, *Review of Multistage Interconnection Networks Reliability and Fault-Tolerance*, IETE Technical Review.
- [4] A. Khati and S. Bisht, 2025, *Reliability Analysis of Interconnection Networks: A Comprehensive Review of Shuffle-exchange, Benes, and Gamma networks*, in *Reliability Assessment and Optimization of Complex Systems*, Elsevier, pp. 287–308.
- [5] M. Esmaeili and R. Ravanmehr, 2025, *Improving the Reliability of Interconnection Networks Using Replicated 4-Disjoint GIN*, *Journal of Interconnection Networks*, Vol. 25, No. 03.
- [6] A. Q. Ansari, V. Sharma, dan R. Mishra, 2022, *A 3-Disjoint Path Design Of Non-Blocking Shuffle Exchange Network By Extra Port Alignment*, *Journal of Supercomputing*, Vol. 78, No. 12, pp. 14381–14401.
- [7] G. Khanna, S. K. Chaturvedi, dan M. Othman, 2023, *On Design and Performance Analysis Of Improved Shuffle Exchange Gamma Interconnection Network Layouts*, *Journal of Supercomputing*, Vol. 79, No. 11, pp. 11611–11640.
- [8] D S. Parker and C.S. Raghavendra, 1984, *The Gamma Network*, *IEEE Trans. Computers*, Vol. 33, No. 4, pp. 367-373.
- [9] Fahmi Rinaldi, Muhammad Zulfin, Raja Harahap, 2025, *Pengaruh Jalur Redundan Terhadap Probabilitas Blocking Jaringan Multistage Interconnection Network Topologi Gamma*, *Buletin Utama Teknik*, Universitas Islam Sumatera Utara (UISU), Vol. 21, No. 1.
- [10] Indra Gunawan dan Nasser S. Fard, 2012, *Terminal Reliability Assessment of Gamma And Extra-Stage Gamma Networks*, *International Journal of Quality & Reliability Management* Vol. 29, No. 7, pp. 820-831.
- [11] Shilpa Gupta, dan Gobind L. Pahuja, 2021, *Modified Gamma Network: Design and Reliability Evaluation*, *Recent Advances in Computer Science and Communications*, Vol. 14, No.6, pp.1999-2012.
- [12] Vipin Sharma, Rajesh Mishra, Abdul Quaiyum Anshari dan Amit Kumar, 2020, *Reliability Analysis of a Newly Proposed two Disjoint Path Multistage Interconnection Networks*, *Test Engineering And Management*.