

PENGEMBANGAN JARINGAN *SWITCHING* CLOS MENJADI JARINGAN BENES UNTUK MEMPERBAIKI PROBABILITAS *BLOCKING*

Mesakh Marpaung, M. Zulfin

Konsentrasi Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara (USU)
Jl. Almamater, Kampus USU Medan 20155 INDONESIA
e-mail: mesakh_marpaung@yahoo.com

Abstrak

Jaringan Clos adalah jaringan *switching* banyak tingkat yang dibangun untuk mengatasi masalah *cost* yang mahal untuk sistem *switching* telepon. Namun seiring perkembangan interkoneksi prosesor-memori dan pengolahan data, ternyata *cost* dan *blocking* pada jaringan Clos masih harus dikurangi sehingga jaringan Benes dirancang. Dasar kerja jaringan *switching* Benes berasal dari penataan kembali susunan dan jumlah *switch* pada jaringan *switching* Clos. Jaringan *switching* Benes adalah jaringan *switching* banyak tingkat dimana jumlah *input* dan *output* pada setiap *switch*-nya sama ($a=b=2$). Setelah dilakukan analisis probabilitas *blocking* pada jaringan Benes, ditemukan bahwa perbaikan kualitas jaringan dapat terjadi dengan merekonstruksi jaringan Clos menjadi jaringan Benes. Jaringan Clos yang sudah diubah menjadi jaringan Benes memiliki probabilitas *blocking* yang lebih kecil dibanding dengan jaringan Clos yang belum diubah. Untuk jumlah *input* 16, probabilitas *blocking* jaringan Benes adalah 0,327107 sedangkan probabilitas *blocking* jaringan Clos adalah 0,470765. Untuk jumlah *input* 128, probabilitas *blocking* jaringan Benes adalah 0,214282 dan probabilitas *blocking* jaringan Clos adalah 0,459570.

Kata Kunci: Jaringan Clos, jaringan Benes, probabilitas *blocking*

1. Pendahuluan

Perangkat-perangkat keras yang canggih mutlak diperlukan untuk mendukung kemajuan dan perkembangan teknologi informasi dan komunikasi. Terutama perangkat keras yang memiliki kinerja yang handal dengan biaya yang murah. Teknologi ini bertumbuh sangat cepat, sehingga penyedia layanan telekomunikasi harus membenahi sistem dan jaringan *switching* yang digunakan. Jaringan *switching* yang digunakan di dalam mikroprosesor biasanya adalah jaringan *switching* banyak tingkat. Jaringan *switching* Clos dan Benes merupakan contoh bentuk jaringan *switching* banyak tingkat yang dapat digunakan untuk interkoneksi modul memori dan prosesor di dalam *chip* mikroprosesor. Pada tulisan ini dibahas jaringan *switching* Benes untuk memperbaiki probabilitas *blocking* jaringan Clos.

2. Jaringan Interkoneksi Banyak Tingkat

Perkembangan jaringan interkoneksi telah berlangsung selama bertahun-tahun. Jaringan berkembang seiring dengan perkembangan jaringan *switching* telepon, komunikasi

interprosesor, dan interkoneksi prosesor-memori. *Switching* telepon telah ada sejak munculnya telepon sebagai alat komunikasi. Jaringan awal telepon dibangun dari *switch crossbar* elektromekanis ataupun *switch* elektromekanis *step-by-step*. Jaringan interkoneksi berbasis prosesor digunakan pada hampir semua sistem digital yang cukup besar yang memiliki dua komponen untuk berhubungan. Aplikasi paling umum dari jaringan interkoneksi berada pada sistem komputer dan *switch-switch* komunikasi. Pada sistem komputer, aplikasi jaringan interkoneksi tersebut menghubungkan prosesor ke memori dan peralatan masukan/keluaran (*input/output device (I/O)*) menuju pengendali keluaran/masukan. Jaringan interkoneksi tersebut menghubungkan port masukan menuju port keluaran pada *switch-switch* komunikasi dan *router* jaringan [1].

Karakteristik untuk jaringan interkoneksi terdiri dari [2]:

- Topologi. Topologi merujuk pada pengaturan statis dari kanal dan *node* dalam suatu jaringan interkoneksi, yakni jalur yang dijalani oleh paket.
- Teknik *switching*. Secara umum digunakan tiga teknik *switching*, yaitu *circuit switching*,

- packet switching*, dan *message switching*. Tetapi yang sering digunakan adalah *circuit switching* dan *packet switching*.
- Sinkronisasi. Kegiatan pada elemen *switching* dan terminal masukan maupun terminal keluaran (I/O) dikendalikan oleh sebuah *clock* pusat sehingga semuanya bekerja secara sinkron.
 - Strategi pengaturan. Pengaturan sebuah jaringan dapat dilakukan dengan cara terpusat ataupun terdistribusi. Dalam strategi pengaturan terpusat, sebuah pengendali pusat harus memiliki semua informasi global dari sistem pada setiap waktu. Sedangkan strategi pengaturan terdistribusi, pesan-pesan yang dirutekan mengandung informasi perutean yang dibutuhkan.
 - Algoritma perutean. Algoritma perutean tergantung pada sumber dan tujuan dari suatu pesan dan jalur interkoneksi yang digunakan ketika melalui jaringan. Perutean dapat disesuaikan ataupun ditentukan.

Jaringan interkoneksi dapat dibagi menjadi statis atau jaringan langsung (*direct network*), dinamis atau jaringan tidak langsung (*indirect network*), dan hybrid [2].

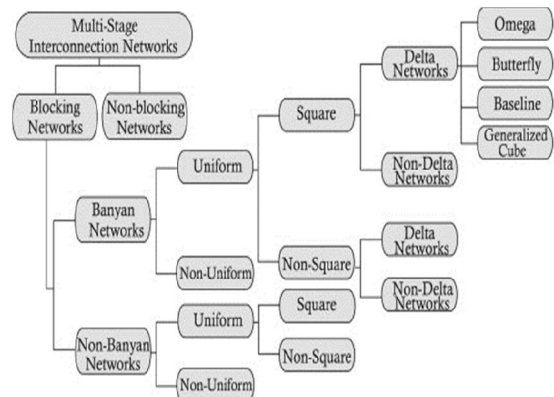
- Jaringan Interkoneksi Statis (Jaringan Langsung). Dalam jaringan interkoneksi statis, jalur diantara terminal yang berbeda dari sistem bersifat pasif dan hanya jalur yang telah ditentukan oleh prosesor pengendali yang dapat digunakan untuk berkomunikasi.
- Jaringan Interkoneksi Dinamis (Jaringan Tidak Langsung). Konfigurasi jalur dalam sebuah jaringan interkoneksi dinamis merupakan fungsi dari kondisi elemen *switching*. Jalur diantara terminal pada jaringan interkoneksi dinamis berubah sesuai dengan perubahan kondisi elemen *switching*.

Penggolongan jaringan interkoneksi banyak tingkat berdasarkan defenisi-defenisi yang telah diberikan ditunjukkan pada Gambar 1. Jaringan interkoneksi banyak tingkat telah digolongkan ke dalam tiga kelas menurut ketersediaan jalur-jalur untuk membangun koneksi baru, yaitu [2]:

- Blocking*. Suatu koneksi antara pasangan masukan/keluaran yang bebas tidak selalu mungkin dikarenakan bertabrakan dengan koneksi yang sudah ada. Dengan menyediakan jalur yang banyak dalam jaringan *blocking*, konflik dapat dikurangi dan toleransi kesalahan dapat ditingkatkan. Jaringan-jaringan *blocking* ini juga dikenal

sebagai jaringan banyak jalur (*multipath network*).

- Non-blocking*. Setiap masukan dapat dihubungkan ke terminal keluaran yang bebas tanpa mempengaruhi koneksi-koneksi yang ada. Membutuhkan tingkat-tingkat tambahan dan memiliki jalur yang banyak antara setiap masukan dan keluaran. Contoh yang populer dari jaringan *non-blocking* adalah jaringan Clos.
- Rearrangible*. Setiap terminal masukan dapat dihubungkan ke setiap keluaran yang bebas. Bagaimanapun, koneksi-koneksi yang ada boleh menggunakan jalur-jalur yang dapat diubah-ubah. Jaringan-jaringan ini juga membutuhkan jalur yang banyak antara setiap masukan dan keluaran, tetapi jumlah jalur dan biaya lebih kecil daripada penggunaan jaringan *non-blocking*.



Gambar 1. Klasifikasi jaringan interkoneksi banyak tingkat berdasarkan defenisi

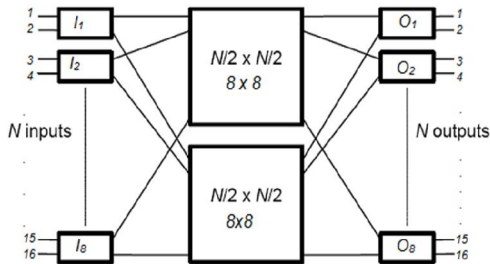
3. Pengembangan Jaringan *Switching* Clos Menjadi Jaringan Benes

Jaringan Clos yaitu jaringan tiga tingkat yang setiap tingkatannya tersusun dari sejumlah *switch crossbar* dimana di antara tingkatan *switch* masukan dengan *switch* keluaran ditambahkan satu tingkat *switch* yang disebut *switch* antara. Jaringan Clos asimetris dikarakterisasi oleh (m,n,r) , dimana m adalah jumlah dari *switch* antara, n adalah jumlah *port* masukan dari masing-masing *switch* masukan, dan r adalah jumlah dari *switch* masukan dan *switch* keluaran [1].

Jaringan Benes adalah jaringan Clos tiga tingkat yang bersifat *rearrangeably non-blocking* dengan $k=2$ dan $a = b = 2$. Dimana k adalah jumlah *switching* antara *switch input* dengan

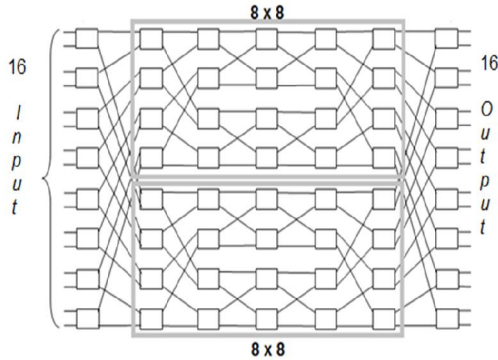
switch output, a ialah jumlah inlet setiap elemen switching dan b adalah jumlah outlet-nya [3].

Bentuk jaringan Clos yang dapat diubah menjadi jaringan Benes adalah jaringan Clos dengan $N=2^n$, dan $r=N/2$ dimana N adalah jumlah input jaringan switching sehingga ditulis jaringan Clos $(2,2,N/2)$ seperti Gambar 2 [3].



Gambar 2. Jaringan Clos 16 input dengan dua switch antara $N/2 \times N/2$

Kemudian dengan menguraikan switch antara menjadi elemen-elemen switching 2×2 maka jaringan switching baru telah didapat yaitu jaringan Benes. Setelah switching antara ini diuraikan menjadi switching-switching yang baru berukuran 2×2 maka semua switch menjadi seragam. Contoh jaringan Benes dengan 16 masukan yang dibangun dari jaringan Clos dapat dilihat pada Gambar 3 [3].



Gambar 3. Pengembangan jaringan Clos tiga tingkat 16 input menjadi jaringan Benes 16×16

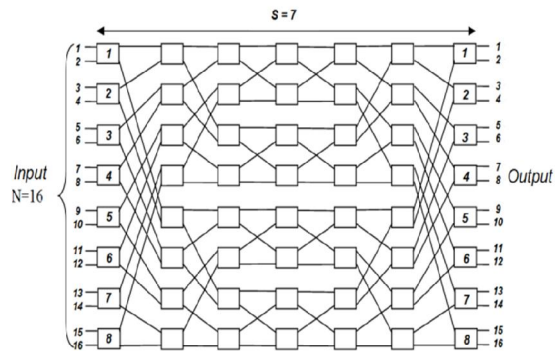
Dari Gambar 3 terlihat bahwa switch antara yang berukuran 8×8 jaringan Clos yang berjumlah 2 diuraikan menjadi 20 buah switching 2×2 baru yaitu terdiri dari 5 tingkat, dan masing-masing tingkat terdiri dari 4 elemen switching

Jumlah tingkat switch yang dibutuhkan adalah $2 \log_2 N - 1$ tingkat yang masing-masing tingkat terdiri dari $N/2$ switch 2×2 , dimana $\log_2 N$ adalah suatu logaritma dengan basis 2. Total elemen switch yang dibutuhkan adalah $N \log_2 N - N/2$ [3]. Perbedaan konstruksi jaringan setelah diubah menjadi Benes seperti Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan konstruksi jaringan Clos dan Benes

Perbedaan	Jaringan Clos	Jaringan Benes
Jumlah input	2^n	2^n
Jumlah tingkat	3	$2 \log_2 N - 1$
Jumlah switch	$(2 \times \frac{N}{2}) + 2$	$N \log_2 N - N/2$
Jumlah switch antara	2	$(\frac{N}{2}) \times (2 \log_2 N - 3)$

Jika jumlah input dan output yang akan dihubungkan adalah 16, maka jaringan Benes dibangun dengan $S = 2 \log_2 16 - 1 = 2 \times 4 - 1 = 7$ tingkat, dan masing-masing tingkat terdiri dari $N/2 = 16/2 = 8$ switch 2×2 , sehingga total elemen switching (switching element) SEs, yang dibutuhkan adalah $SEs = 16 \log_2 16 - 16/2 = 16 \times 4 - 8 = 56$ elemen switching seperti Gambar 4 [3].



Gambar 4. Jaringan Benes dengan 16 masukan

Jaringan Benes terus mengalami perkembangan karena topologi Jaringan Benes rearrangeable bisa juga dibangun dari jaringan-jaringan switching blocking seperti Jaringan Baseline, Banyan, dan Omega. Nabanita Das menuliskan bahwa jaringan Benes dengan masukan (N) yang banyak bisa dibangun dari jaringan $baseline + baseline^{-1}$, $omega + omega^{-1}$, $baseline + omega^{-1}$, $buterfly + buterfly^{-1}$, dan topologi lainnya [4].

4. Probabilitas Blocking Jaringan Switching Benes

Patel dalam papernya merumuskan apabila rata-rata permintaan m di masing-masing a input dari modul crossbar $a \times b$, maka diharapkan jumlah permintaan yang dilewatkan per unit waktu [5]:

$$b - b \left(1 - \frac{m}{b}\right)^a \tag{1}$$

dimana:

a = jumlah inlet yang memasuki suatu elemen switching

b = jumlah *outlet* yang keluar dari suatu elemen *switching*

Membagi persamaan (1) dengan jumlah baris *output* dari modul $a \times b$ akan didapatkan rata-rata permintaan pada masing-masing jalur *output* b :

$$1 - \left(1 - \frac{m}{b}\right)^a \quad (2)$$

Dengan demikian untuk setiap tahap jaringan delta, tingkat *output* setiap permintaan m_{out} adalah fungsi dari jumlah masukan, jadi [5]:

$$m_{out} = 1 - \left(1 - \frac{m_{in}}{b}\right)^a \quad (3)$$

Kemudian Daniel M. Dias dan J. Robert Jump mengaplikasikan persamaan (3) untuk perhitungan probabilitas paket yang dilewatkan melalui tiap tingkatan *switch* pada jaringan delta tanpa *buffer*. Dimisalkan sebuah jaringan delta ($2^n \times 2^n$) tanpa *buffer* dengan mengasumsikan p_k adalah probabilitas paket dilewatkan melalui *link* masukan pada sebuah *switch* di tingkat S_k , dimana $0 \leq k < n$, dan p_n adalah probabilitas paket tiba di sebuah *link* keluaran. Kemudian p_k ($0 \leq k < n$) mempunyai nilai yang sama untuk semua *link* masukan *switch* pada tingkat yang sama, dan p_n nilainya sama untuk semua *link* keluaran *switch* [6].

- 1) Paket yang tiba pada sebuah *link* masukan pada sebuah *switch* adalah tidak dipengaruhi oleh paket yang tiba di *link* masukan lain pada *switch* yang sama.
- 2) p_k ($0 \leq k < n$) nilainya sama untuk semua jaringan delta ($2^n \times 2^n$).

Dimisalkan b adalah jumlah *input/output* dari setiap *switch crossbar* pada setiap tingkat. Untuk jaringan delta dan jaringan Benes berarti $b = 2$. Jadi probabilitas j paket tiba pada *switch* m di tingkat S_k adalah [6].

$$\binom{b}{j} p_k^j (1 - p_k)^{b-j} \quad (4)$$

Didapatkan probabilitas paket yang dilewatkan sampai *link* masukan m yang berasal dari j paket pada *link* keluaran yaitu

$$\left(1 - \left(\frac{b-1}{b}\right)^j\right) \quad (5)$$

Jika disederhanakan menjadi [6]:

$$p_{k+1} = 1 - \left(1 - \frac{p_k}{b}\right)^b \quad (6)$$

p_k = probabilitas paket dilewatkan melalui *link* masukan pada sebuah *switch* di tingkat S_k ditetapkan ($p_0=1$), dan

b = jumlah *input/output switch crossbar* pada tiap tingkat.

5. Analisis Kinerja Jaringan *Switching* Benes Tanpa *Buffer*

Pada analisis ini dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai probabilitas *blocking*. Untuk mendapatkannya, terlebih dahulu ditentukan jumlah *link input* atau *output* jaringan yang akan dicari, kemudian dicari berapa tingkatan elemen *switching* yang dibutuhkan. Dengan memperoleh jumlah tingkatan elemen *switching*-nya, maka probabilitas *blocking* dapat dicari.

- a. Perhitungan probabilitas *blocking* pada jaringan Benes

Dengan menggunakan persamaan (6), maka p_k (probabilitas *blocking switching* sampai tingkat k) dapat dicari, dimana $0 \leq k < n$. Misalkan diambil contoh jaringan Benes dengan *input/output* $N=16$ seperti Gambar 6. Karena jaringan Benes terdiri dari 16 *input/output*, maka jaringan dapat dibangun dengan tingkat elemen *switching* (S) sebanyak:

$$\begin{aligned} S &= 2\log_2 N - 1 \\ &= 2\log_2 16 - 1 \\ &= 2 \times 4 - 1 \\ S &= 7 \text{ tingkat} \end{aligned}$$

Mengetahui jumlah tingkat *switch* ada 7 maka probabilitas *blocking* dapat dihitung dari tingkat pertama sampai ke-7 (p_1 sampai p_7). Untuk menghitung probabilitas *blocking*-nya dilakukan dengan menggunakan persamaan (6) sebagai berikut:

Untuk $k = 0$, maka:

$$\begin{aligned} p_{k+1} &= 1 - \left(1 - \frac{p_k}{b}\right)^b \\ p_{0+1} &= 1 - \left(1 - \frac{p_0}{2}\right)^2 \end{aligned}$$

Probabilitas *blocking* pada tingkat-1 adalah

$$\begin{aligned} p_1 &= 1 - \left(1 - \frac{1}{2}\right)^2 \text{ probabilitas } p_0 = 1 \\ &= 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 \\ &= 1 - 0,25 \\ p_1 &= 0,75 \end{aligned}$$

Didapat probabilitas *blocking* (p_b) jaringan Benes 16×16 pada setiap *switch* di tingkat pertama adalah sebesar 0,75.

Untuk $k = 1$, maka:

$$p_{1+1} = 1 - \left(1 - \frac{p_1}{2}\right)^2$$

Probabilitas *blocking* pada tingkat-2 adalah

$$\begin{aligned} p_2 &= 1 - \left(1 - \frac{0,75}{2}\right)^2 \\ &= 1 - (1 - 0,375)^2 \end{aligned}$$

$$= 1 - 0,390625$$

$$p_2 = 0,609375$$

Demikian seterusnya dihitung probabilitas *blocking* sampai $k = 6$ (tingkat ke-7).

Dari perhitungan diperoleh probabilitas *blocking* (p_b) jaringan Benes 16×16 pada setiap *switch* di tingkat akhir adalah sebesar 0,327107.

Maka jaringan Benes dengan 16 *input/output* dibangun dengan 7 tingkat *switch* yang masing-masing tersusun dari 8 elemen *switching* 2×2 akan memiliki probabilitas *blocking* (p_b) sebesar 0,327107.

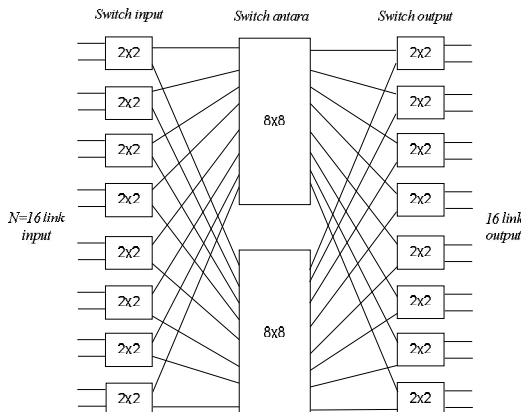
Probabilitas *blocking* untuk *switching* Benes dengan berbagai nilai *input/output* (2^n) dapat dicari. Perhitungan probabilitas *blocking* untuk berbagai nilai *input/output* dengan menggunakan persamaan (6), akan didapatkan data nilai probabilitas *blocking* seperti Tabel 2.

Tabel 2. Probabilitas *blocking* pada jaringan Benes

n	Input (N)	Tingkat switch $2 \log_2 N - 1$	Probabilitas <i>blocking</i> (p_b)
1	2	1	0,75
2	4	3	0,516547
3	8	5	0,399249
4	16	7	0,327107
5	32	9	0,277804
6	64	11	0,241803
7	128	13	0,214282
8	256	15	0,192521

b. Perbandingan probabilitas *blocking* antara jaringan Benes dengan jaringan Clos

Pada analisis sebelumnya telah didapat besar probabilitas *blocking* jaringan Benes 16 *input* yaitu sebesar 0,327107. Pada bagian ini, akan dicari nilai *blocking* pada jaringan Clos dengan 16 *input* seperti jaringan Clos (2,2,8) pada Gambar 5.



Gambar 5. Jaringan Clos 16 *input* tiga tingkat (2,2,8)

Berdasarkan Gambar 5 maka dengan menggunakan persamaan (3), probabilitas *blocking* untuk jaringan Clos (2,2,8) sebagai berikut:

p_b pada tingkat-1 (*switch* 2×2) adalah:

$$p_1 = 1 - \left(1 - \frac{p_0}{b}\right)^a$$

$$= 1 - \left(1 - \frac{1}{2}\right)^2$$

$$= 1 - 0,25$$

$$p_1 = 0,75$$

p_b pada tingkat-2 (*switch* 8×8) adalah:

$$p_2 = 1 - \left(1 - \frac{p_1}{b}\right)^a$$

$$= 1 - \left(1 - \frac{0,75}{8}\right)^8$$

$$= 1 - (1 - 0,09375)^8$$

$$= 1 - 0,454971$$

$$p_2 = 0,545029$$

p_b pada tingkat-3 (*switch* 2×2) adalah:

$$p_3 = 1 - \left(1 - \frac{p_2}{b}\right)^a$$

$$= 1 - \left(1 - \frac{0,545029}{2}\right)^2$$

$$= 1 - (1 - 0,2725145)^2$$

$$= 1 - 0,529235$$

$$p_3 = 0,470765$$

Dari perhitungan didapatkan, probabilitas *blocking* pada tingkat ke-3 (p_b) jaringan *switching* Clos dengan 16 *input/output* adalah sebesar 0,470765.

Probabilitas *blocking* jaringan Clos dengan jumlah *input* yang lain dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Probabilitas *blocking* jaringan Clos dengan 2 buah *switching* antara

Jumlah <i>input/output</i> ($N = 2^n$)	Ukuran <i>Switch</i> Antara ($N/2 \times N/2$)	Probabilitas <i>Blocking</i> (p_b)
2	-	0,75
4	2×2	0,516540
8	4×4	0,484615
16	8×8	0,470765
32	16×16	0,464270
64	32×32	0,461121
128	64×64	0,459570
256	128×128	0,458800

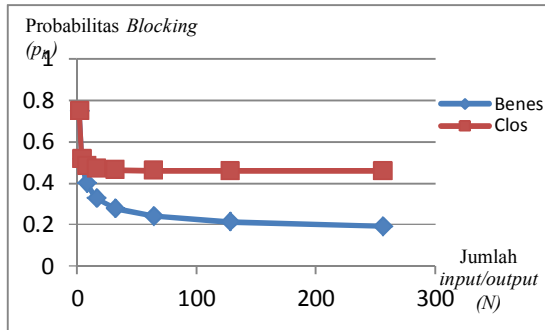
c. Hasil Analisis

Dari hasil perhitungan didapat bahwa dengan jumlah *input/output* 16, probabilitas *blocking* jaringan Benes lebih kecil dibanding

dengan probabilitas *blocking* jaringan Clos yaitu 0,327107 pada Benes dan 0,470765 pada Clos.

Untuk jumlah *input* 128, jaringan Benes juga lebih unggul dengan probabilitas *blocking* yang lebih kecil dibanding jaringan Clos yaitu 0,214282 pada Benes dan 0,459570 pada Clos.

Dari Tabel 2 dan Tabel 3, didapat bahwa probabilitas *blocking* pada jaringan *switching* Benes dan Clos akan terus berkurang apabila jumlah *input/output* semakin banyak. Seperti grafik pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik perbandingan probabilitas *blocking* jaringan Benes dan jaringan Clos dengan jumlah *input/output* yang sama

Pada Gambar 6 terlihat bahwa dengan jumlah *input/output* yang sama, probabilitas *blocking* jaringan Benes lebih kecil dibanding jaringan Clos. Hal ini menunjukkan perbaikan kualitas jaringan *switching* dengan mengubah bentuk jaringan dari jaringan *switching* Clos menjadi jaringan *switching* Benes.

Kesimpulan

Dari hasil analisis yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Perubahan jumlah *input/output* pada jaringan Benes sebanding dengan jumlah tingkat elemen *switching* yang dibutuhkan. Dimana jika jumlah *input/output* jaringan Benes bertambah, maka tingkat elemen *switching* pada jaringan Benes akan semakin bertambah. Untuk *input/output* 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 dan seterusnya maka jumlah tingkat *switching* yang dibutuhkan adalah 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 dan seterusnya.
2. Perubahan jumlah tingkat elemen *switching* berbanding terbalik dengan nilai probabilitas *blocking*. Probabilitas *blocking* pada jaringan *switching* Benes terus berkurang jika jumlah tingkat elemen *switching* semakin besar. Untuk jaringan Benes 7 tingkat dan 13

tingkat maka probabilitas *blocking*-nya adalah 0,327101 dan 0,214282.

3. Terjadi perbaikan kualitas jaringan dengan merekonstruksi jaringan Clos menjadi jaringan Benes. Jaringan Clos yang sudah diubah menjadi jaringan Benes memiliki probabilitas *blocking* yang lebih kecil dibanding dengan jaringan Clos yang belum diubah. Untuk jumlah *input* 16, probabilitas *blocking* jaringan Benes adalah 0,327107 sedangkan probabilitas *blocking* jaringan Clos adalah 0,470765. Untuk jumlah *input* 128, probabilitas *blocking* jaringan Benes adalah 0,214282 dan probabilitas *blocking* jaringan Clos adalah 0,459570.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada Bapak Ir. M. Zulfin, MT atas bimbingan dan masukan yang diberikan dalam menyelesaikan tulisan ini.

Referensi

- [1] Dally, William J. 2004. "*Principles and Practices of Interconnection Networks*". Morgan Kaufmann Publishers: San Francisco.
- [2] Quadri, Imran Rafiq, dkk. Mei 2007. "*Modeling of Topologies of Interconnection Networks based on Multidimensional Multiplicity*". Raport de Recherche, Institut National De Recherche En Informatique Et En Automatique. Hlm. 5-16
- [3] Hunter, David K., 1997 "*Switching Systems*". IEEE Transactions on Computers.
- [4] Das, Nabanita, dkk. 2000. "*O(n) Routing in Rearrangeable Networks*". Journal of System Architecture, Indian Statistical Institute: India.
- [5] Patel, Janak H., 1981. "*Performance of Processor-Memory Interconnections for Multiprocessors*". IEEE Transactions on Computers, vol. C-30, no. 10.
- [6] Dias, Daniel M., 1981. "*Analysis and Simulation of Buffered Delta Networks*". IEEE Transactions on Computers, vol. C-30, no.4.