

## Physical Layer Network Coding Untuk Kanal Relay Dua Arah

Firman Hadi Sukma P

Pasca Sarjana Teknik Elektro-ITS Surabaya  
Kampus ITS, Sukolilo - Surabaya  
email : pratamafirman@yahoo.com

### Abstrak

Jaringan Nirkabel secara umum merupakan broadcast sehingga memiliki banyak masalah jika dibandingkan dengan jaringan kabel. Masalah tersebut adalah throughput rendah, keterbatasan bandwidth, hilangnya sinyal, performansi rendah saat kondisi bergerak, konsumsi power yang tinggi, non-reliable, peka terhadap kondisi lingkungan seperti fading dan interferensi, dan gangguan keamanan. Pada layer fisik dalam jaringan nirkabel, semua data ditransmisikan melalui gelombang elektromagnetik. Transmisi sinyal EM dari pengirim seringkali diterima oleh lebih dari satu node. Pada waktu yang sama, penerima dapat menerima sinyal EM yang ditransmisikan oleh banyak node secara bersamaan. Kondisi ini sering menyebabkan gelombang lain yang bersamaan dianggap sebagai pengganggu. Salah satu metode berbasis Network Coding yang diusulkan untuk mengeksplorasi gelombang Elektromagnetik (EM) adalah Physical Layer Network Coding (PNC). Dalam PNC gelombang EM yang datang bersamaan bisa dijadikan mitra untuk meningkatkan performansi jaringan. Dalam penelitian sebelumnya, penerapan PNC dilakukan dalam kanal flat fading dan tanpa channel coding, karena itu kali ini dicoba untuk menerapkan PNC dalam kanal rayleigh ditambah dengan convolutional code. Dengan menerapkan PNC maka dihasilkan performansi jaringan yang lebih baik daripada model tradisional. Kenaikan performansi diamati melalui parameter BER dan SNR.

### Kata kunci :

Layer fisik, physical layer network coding, jaringan nirkabel, gelombang elektromagnetik

## 1. Pendahuluan

Dalam banyak aplikasi nirkabel, terkadang dibutuhkan untuk meneruskan informasi ke semua node dalam jaringan dengan model komunikasi satu pengirim ke banyak tujuan atau banyak pengirim ke banyak tujuan untuk menyebarkan pesan atau informasi penting seperti pesan bahaya dimedan perang dan operasi bencana, dan lainnya. Contoh sederhana dimana setiap node dalam jaringan melakukan re-broadcast paket yang diterima, tidak memerlukan overhead tetapi memakai banyak kanal bandwidth sebanyak duplikasi paket yang diterima oleh node. Hasilnya, terjadilah broadcast storm yang mengakibatkan loss dan kongesti dalam jaringan.[1]

Salah satu alternatif, meskipun sebenarnya dirancang untuk jaringan kabel, yaitu Network Coding yang dapat bekerja sangat baik dalam kondisi jaringan nirkabel dengan memanfaatkan karakteristik broadcast. Dengan Network coding, node yang mengirimkan atau node perantara tidak hanya sebagai relay tetapi melakukan encoding kepada paket-paket yang diterima untuk dikirimkan kembali sehingga dapat meningkatkan throughput jaringan. Beragam model analisa dan simulasi menunjukkan bahwa network coding dapat meningkatkan efisiensi, throughput, kompleksitas, robustness dan keamanan jaringan.[2]

Pada layer fisik dalam jaringan nirkabel, semua data ditransmisikan melalui gelombang elektromagnetik. Transmisi sinyal EM dari pengirim seringkali diterima oleh lebih dari satu node. Pada waktu yang sama, penerima dapat menerima sinyal EM yang ditransmisikan oleh banyak node secara bersamaan. Salah satu metode berbasis Network Coding yang diusulkan untuk mengeksplorasi gelombang Elektromagnetik(EM) adalah Physical Layer Network Coding (PNC). Secara alamiah operasi network coding terjadi dalam superposisi gelombang EM. Hal ini adalah peristiwa sederhana dalam fisika gelombang ketika banyak gelombang EM datang bersamaan dalam suatu ruang fisik sama maka dapat dijumlahkan.[8]

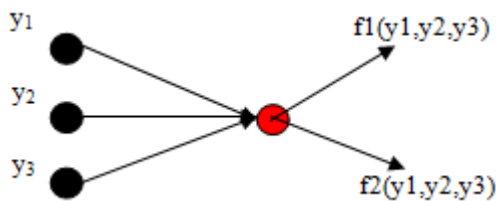
Dalam banyak komunikasi nirkabel saat ini, interferensi diberlakukan sebagai fenomena gangguan. Ketika banyak pemancar mengirimkan gelombang radio ke penerima, maka sebuah penerima dapat menerima sinyal dari satu pemancar dengan baik begitu juga dari banyak pemancar. Gelombang radio dari pemancar lain seringkali dianggap sebagai interferensi yang mengganggu kualitas sinyal. Sebagai contoh dalam jaringan Wi-Fi, ketika banyak node mengirimkan bersama-sama, terjadilah paket collision dan tidak ada satupun paket yang diterima dengan baik.

PNC diajukan untuk berusaha membalikkan situasi ini dengan mengeksplorasi operasi network coding pada gelombang EM sehingga interferensi dapat dimanfaatkan, contohnya dalam kanal relay dua arah (TWRC) PNC dapat menaikkan throughput sampai 100%.[8]

## 2. Tinjauan Pustaka

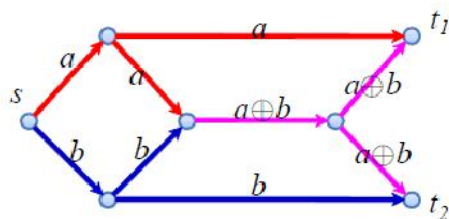
Network Coding adalah konsep yang relatif baru dalam teori informasi. Berbeda dengan skema store and forward yang sudah ada, dimana data di-relay hop tiap hop dari sumber ke tujuan tanpa perubahan,

Network coding berdasarkan kepada operasi pencampuran informasi (kombinasi linier) dari aliran data yang berbeda pada node perantara dalam jaringan. Penerima melakukan decode terhadap paket untuk mengembalikan data asli sesuai yang dikirimkan oleh sumber. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas multicast dapat dicapai dengan menggabungkan paket dari sumber berbeda [5]. Seperti pada gambar.1, setiap node dalam jaringan dapat melakukan beberapa komputasi dan hasil paket outputnya adalah fungsi dari paket inputnya. Secara umum, network coding memungkinkan informasi untuk dicampur pada node



Gambar 1. Ide Dasar Network Coding[5]

Potensi keuntungan dari network coding adalah efisiensi sumber daya (bandwidth dan power), efisiensi komputasi dan ketahanan terhadap perubahan jaringan. Seperti yang dikatakan oleh Ashwede dkk, network coding dapat meningkatkan throughput, dan dalam multicast dapat mencapai data rate yang maksimal sesuai teori. Hal ini digambarkan pada gambar 2 Setiap



Gambar 2. Contoh Network Coding dalam Multicast

Link dalam graph bisa membawa satu bit tiap detik. Menggunakan network coding, kita dapat melakukan multicast untuk sebuah informasi dari sumber node s ke dua penerima  $t_1$  dan  $t_2$  pada rate 2.0 bit/detik, yang tidak dapat dicapai dengan menggunakan routing biasa.

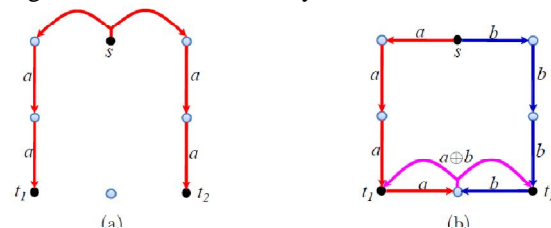
Selain memaksimalkan throughput, network coding juga bisa memaksimalkan efisiensi energi. Sebagai contoh dalam jaringan nirkabel yang ditunjukkan pada gambar 3 diasumsikan bahwa setiap node memiliki perangkat pengirim yang bekerja pada frekuensi yang tetap untuk mampu mengirim ke node tetangga tapi bukan dalam arah diagonal. Dalam pengaturan seperti ini tiap layer fisik dari transmisi memerlukan sejumlah energi.

Dengan menggunakan routing, jumlah transmisi minimal yang dibutuhkan untuk mengirimkan satu message dari s ke  $\{t_1; t_2\}$  adalah lima langkah. Seperti yang digambarkan pada gambar 3 (a) dimana

pada langkah pertama dilakukan broadcast ke dua node. Sedangkan pada gambar 3 (b) menggunakan Network coding, dapat melakukan multicast (2) dua message dalam (9) sembilan langkah transmisi sehingga menghasilkan efisiensi power yang lebih baik.

### Physical Layer Network Coding (PNC)

Konsep PNC dapat dengan mudah diilustrasikan dengan (Two Way Relay Channel) TWRC. TWRC adalah jaringan linear dengan tiga node dimana dua node terletak diujungnya, node 1 dan 2 ingin berkomunikasi dengan node relay R. Tidak terdapat sinyal langsung dalam lintasan antara node 1 dan 2. Sebagai contoh pada jaringan satelit dimana node 1 dan 2 sebagai stasiun bumi, dan relay R adalah satelit.



Gambar 3. (a) Menggunakan routing ,  
 (b) Menggunakan network coding

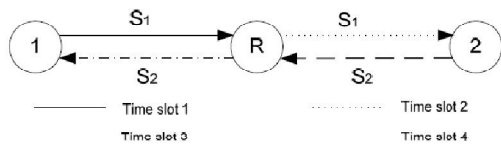
Skema komunikasi half duplex sering digunakan untuk mempermudah dalam mendesain sebuah sistem komunikasi nirkabel. Dengan skema half duplex, node tidak dapat mengirimkan dan menerima pada waktu yang sama. Dengan skema half-duplex, node relay dalam TWRC tidak dapat menerima dari node 1 atau node 2 dan mengirimkan ke node-node itu dalam waktu yang sama. Artinya, setiap paket dari node 1 menuju node 2 (sama juga dengan paket dari node 2 menuju node 2) harus memakai setidaknya dua time-slot untuk sampai di tujuan. Sehingga throughput terbaik yang dihasilkan adalah dua paket untuk setiap dua time slot, satu disetiap arah. Ini artinya  $\frac{1}{2}$  paket per time slot per arah.[8]

Jika pada penelitian sebelumnya[8], penerapan PNC dilakukan pada kanal flat fading yang asumsi ideal, maka perlu dicoba untuk menerapkan PNC dalam kanal Rayleigh yang mendekati kondisi nyata, untuk menambah performansi perlu ditambahkan sebuah channel coding, dimana dalam hal ini adalah convolutional code

### Skema tanpa Network Coding

Skema yang digambarkan dalam gambar 4 adalah tanpa network coding, dengan prinsip sederhana untuk menghindari terjadinya network coding. Dibutuhkan total empat time slot untuk saling mengirimkan paket antara node 1 dan 2. Prinsip ini dikenal sebagai skema tradisional. Pada time-slot 1, node 1 mengirim paket S1 ke relay R; pada time-slot 2, relay R meneruskan S1 ke node 2; dalam time-slot 3,

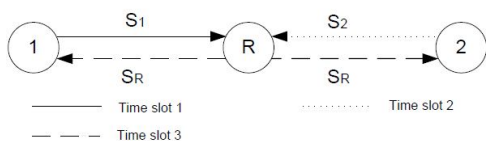
node 2 mengirimkan paket S2 ke relay R dan pada time-slot 4 relay R meneruskan S2 ke node 1.



Gambar 4. Tanpa Network Coding

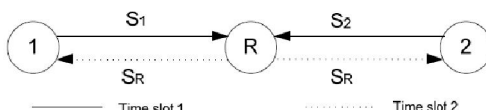
**Skema Tanpa Physical Layer Network Coding**

Cara sederhana dengan langsung menambahkan network coding dapat mengurangi jumlah time-slot menjadi tiga. Dengan mengurangi menjadi tiga time-slot dari empat time-slot, maka konvensional network coding dapat meningkatkan throughput sebesar 33% dari skema tradisional.



Gambar 5. Network Coding Standar

**Skema Physical Layer Network Coding**



Gambar 6. Physical Layer Network Coding

Gambar 6 menjelaskan konsep ini. Pada time-slot pertama, node 1 dan 2 mengirimkan S1 dan S2 bersamaan ke relay R. Berdasarkan superposisi gelombang EM membawa S1 dan S2, relay R mengkodekan  $S_R = S_1 \oplus S_2$ . Kemudian pada time-slot kedua, relay R menyebarkan  $S_R$  ke node 1 dan node 2.

PNC diharapkan dapat mengurangi jumlah time-slot menjadi dua. Dalam hal ini mengijinkan node 1 dan 2 untuk mengirimkan paket secara bersamaan dan memodifikasi operasi network coding secara alamiah pada gelombang EM, dengan melakukan ini PNC mampu menaikkan performansi 100% dibandingkan dengan skema tradisional.

**PNC Mapping**

Kunci utama dalam PNC adalah bagaimana R membentuk  $S_R = S_1 \oplus S_2$  dari superposisi gelombang EM. Proses ini disebut dengan "PNC Mapping". Secara umum, Mapping PNC adalah proses pemetaan dari gelombang EM yang diterima ditambah noise menjadi beberapa paket untuk diteruskan oleh relay. Semua mapping PNC membagi kunci yang dibutuhkan oleh node 1 dan node 2 untuk dapat menghasilkan informasi dari node lain berdasarkan paket yang dihasilkan oleh relay R dan informasi node itu sendiri. Kunci utama

dalam PNC adalah bagaimana R membentuk  $S_R = S_1 \oplus S_2$  dari superposisi gelombang EM. Proses ini disebut dengan "PNC Mapping". Secara umum, Mapping PNC adalah proses pemetaan dari gelombang EM yang diterima ditambah noise menjadi beberapa paket untuk diteruskan oleh relay. Semua mapping PNC membagi kunci yang dibutuhkan oleh node 1 dan node 2 untuk dapat menghasilkan informasi dari node lain berdasarkan paket yang dihasilkan oleh relay R dan informasi node itu sendiri.

Untuk membahas lebih dalam proses PNC maka diasumsikan PNC mapping adalah  $S_R = S_1 \oplus S_2$ . Semua node menggunakan modulasi QPSK untuk mengirimkan sinyal, level simbol dan fasa carrier dianggap saling sinkron dan menggunakan power control sehingga paket dari node 1 dan 2 sampai di relay R dengan fasa dan amplituda yang sama. Untuk sementara, noise diabaikan dulu. Pada satu bagian periode simbol, node 1 dan 2 memodulasi simbol dengan RF pada frekuensi  $\omega$ , maka dituliskan node  $i$  mengirimkan sinyal  $\text{Re}[(a_i + jb_i)e^{j\omega t}]$ . Sinyal kombinasi bandpass yang diterima oleh R selama satu simbol periode adalah:

$$Y_R(t) = s_1(t) + s_2(t) = [a_1 \cos(\omega t) - b_1 \sin(\omega t)] + [a_2 \cos(\omega t) - b_2 \sin(\omega t)] = (a_1 + a_2) \cos(\omega t) - (b_1 + b_2) \sin(\omega t) \dots\dots\dots(1)$$

dimana  $s_i(t)$ ,  $i \in \{1,2\}$  adalah sinyal bandpass yang dikirimkan oleh node  $i$ ; dan  $a_i \in \{-1,1\}$  dan  $b_i \in \{-1,1\}$  berkaitan dengan hasil bit dari modulasi QPSK. Untuk QPSK,  $a_i = 1$  dihubungkan dengan bit 0, dan  $a_i = -1$  dihubungkan dengan bit 1, dalam sinyal in-phase; begitu juga dengan  $b_i$  dalam sinyal quadrature-phase. Melalui pemahaman ini, operasi XOR dapat menjadi aritmatika perkalian; contohnya  $a_1 \oplus a_2 \cong a_1 a_2$  dan  $b_1 \oplus b_2 \cong b_1 b_2$ .

Komponen baseband in-phase (I) dan quadrature (Q) dihubungkan dengan persamaan (1) menjadi:

$$Y_R^{(I)} = a_1 + a_2 \dots\dots\dots(2)$$

$$Y_R^{(Q)} = b_1 + b_2$$

Relay R tidak bisa menemukan informasi simbol yang dikirimkan oleh node 1 dan 2 dari bentuk (4). Karena  $Y_R^{(I)}$  dan  $Y_R^{(Q)}$  memberikan dua persamaan dengan empat variable yang tidak diketahui;  $a_1, b_1, a_2, b_2$ .

Dalam PNC, relay R tidak membutuhkan nilai-nilai dari empat variable itu; tetapi hanya membutuhkan untuk mengirimkan  $a_1 \oplus a_2$  dan  $b_1 \oplus b_2$ , untuk menghasilkan PNC Mapping  $s_R \cong a_1 \oplus a_2 + j(b_1 \oplus b_2) \cong a_R + jb_R$ . Sebagian persamaan,  $a_1 \oplus a_2$  dan  $b_1 \oplus b_2$  bisa didapat dari  $Y_R^{(I)}$  dan  $Y_R^{(Q)}$ . Maka bisa ditulis fungsi dari PNC Mapping  $f(\cdot, \cdot)$  seperti  $s_R = f(Y_R^{(I)}, Y_R^{(Q)})$ . Pada tabel 1 ditunjukkan PNC mapping untuk

komponen in-phase  $a_R$ ; begitu juga dengan bR untuk kompone quadrature. Untuk QPSK,  $a_R = a_1 a_2$  dapat di samakan bahwa -1 jika  $a_1 \neq a_2$ , dan menjadi 1 jika  $a_1 = a_2$ . Ada tiga kemungkinan nilai untuk  $Y_R^{(I)} = a_1 + a_2 : 0, 2$  dan  $-2$ . Karena  $Y_R^{(I)} = 0$  ketika  $a_1 \neq a_2$  dan  $Y_R^{(I)} = -2$  atau  $2$  ketika  $a_1 = a_2$ , PNC mapping dapat ditulis sebagai berikut :

$$a_R = \begin{cases} -1 & \text{jika } Y_R^{(I)} = 0 \\ 1 & \text{jika } Y_R^{(I)} = -2 \text{ atau } 2 \end{cases}$$

Tabel 1. PNC Mapping

Symbol from node 1: $a_1$	Symbol from node 2: $a_2$	Composite symbol received at relay R: $y_R^{(I)} = a_1 + a_2$	Mapping to symbol to be transmitted by relay R: $a_R$
1	1	2	1
1	-1	0	-1
-1	1	0	-1
1	1	2	1

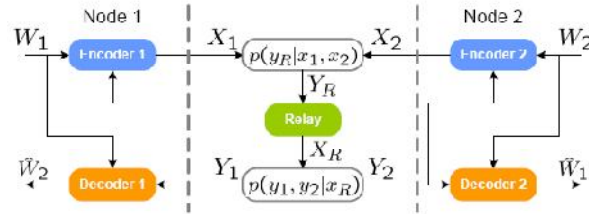
**Kanal Relay Dua Arah**

Penggunaan model transmisi relay telah menunjukkan dapat memberikan keuntungan nyata dalam meningkatkan performansi jaringan, termasuk mampu mewujudkan *spatial diversity* melalui *node* kooperatif dan memperluas jangkauan tanpa memerlukan power pemancar yang besar.[6] Hal ini menjadi pilihan menarik untuk digunakan dalam seluler, jaringan ad-hoc dan komunikasi militer. Ada dua protocol relay yang paling umum digunakan, yaitu Decode and Forward (DF) dan Amplify and Forward (AF). Gambar 7 menjelaskan dari model kanal relay dua-arah ini.

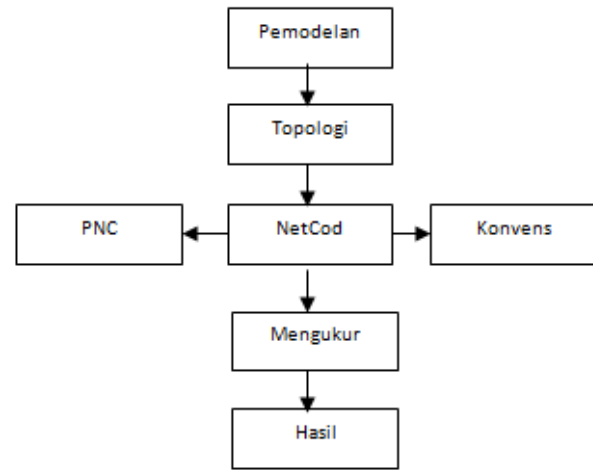
Fungsi relay adalah menghubungkan node 1 dan node 2 yang tidak memiliki hubungan langsung. Jika diperhatikan pada gambar 7, informasi  $W_1$  dilewatkan melalui encoder 1 sehingga berubah menjadi *codeword*  $X_1$ . Sedangkan informasi  $W_2$  dilewatkan melalui encoder 2 sehingga berubah menjadi *codeword*  $X_2$ .

**3. Metode Penelitian**

Dalam penelitian ini menggunakan konsep *Network Coding* yang mampu mengkombinasikan banyak informasi yang diterima secara bersamaan untuk dengan melakukan *encoding* pada *node intermediate* untuk diteruskan menjadi informasi baru yang sudah terkodekan. Untuk itu, secara khusus pada penelitian ini mengusulkan penerapan *network coding* secara langsung pada kanal radio di *physical layer*. Dikenal sebagai skema *Physical Layer Network Coding (PNC)*.



Gambar 7. Model Kanal Relay dua Arah

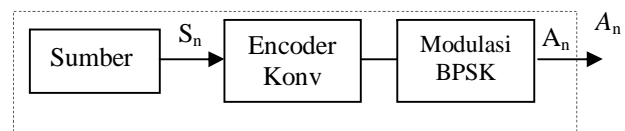


Gambar 8. Langkah Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8. Tahap pertama menentukan model dari sistem, tahap kedua menentukan parameter sistem yang digunakan, tahap ketiga membuat simulasi dengan menggunakan *software* Matlab. Tahap keempat analisa kinerja dari sistem. Tahap terakhir adalah validasi membandingkan hasil yang diperoleh untuk mengetahui seberapa besar dampak (gain) dari penggunaan PNC.

**Model Sistem**

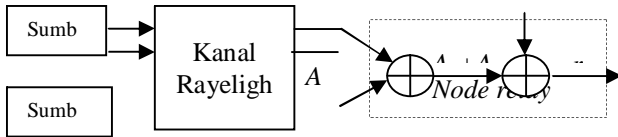
Dari model tersebut, bahwa sumber informasi akan melalui channel coding terlebih dahulu sebelum dikirimkan, *channel coding* yang digunakan adalah *convolutional code*. Lalu dilakukan modulasi BPSK untuk dikirimkan melalui kanal rayleigh. Secara umum maka skema yang diusulkan dalam penelitian ini adalah seperti gambar 9



Gambar 9. Model Node Pengirim

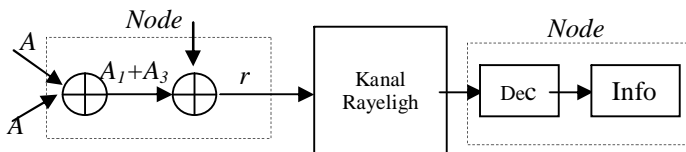
A Noise





Gambar 10. Model Pengiriman

Setelah dilakukan proses penjumlahan pada *node relay*, maka sinyal informasi  $r$  dikirimkan secara *broadcast* kepada semua *node*. Skema proses pengiriman dari *node relay* di gambar 10 dan penerima di gambar 11



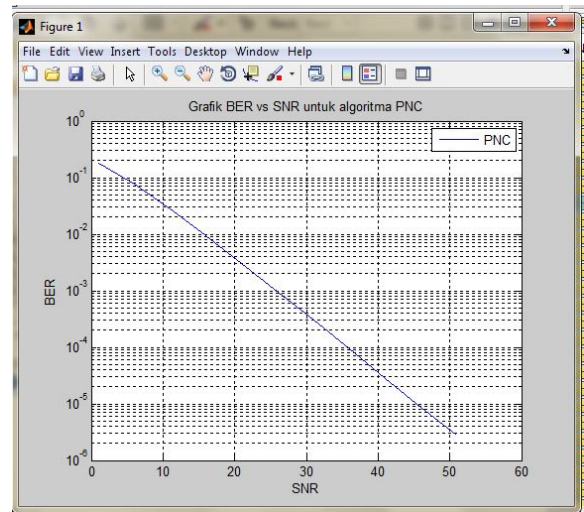
Gambar 11 Model Penerima

#### 4. Hasil dan Pembahasan

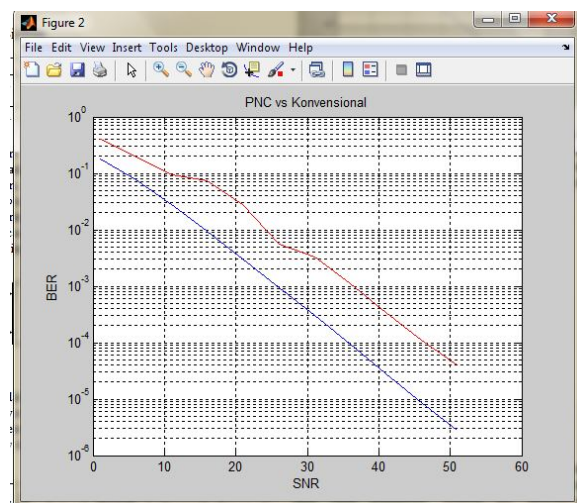
Untuk hasil dari penerapan PNC, didapat hasil grafik seperti di gambar 12. Pada penelitian ini dilakukan uji coba terhadap nilai SNR (signal to noise ratio) dari 1 sampai 51 dB.

Dari gambar 12, terlihat secara ilmiah peningkatan SNR memberikan efek BER yang lebih baik. Untuk melihat perbedaan dengan sistem konvensional maka dapat diperhatikan perbandingannya dalam gambar 13.

Terlihat perbedaan yang begitu berbeda setelah dibandingkan dengan metode konvensional tanpa PNC. Grafik berwarna merah adalah nilai BER vs SNR tanpa menggunakan PNC, maka bisa diperhatikan memberikan perbaikan yang begitu signifikan sampai mendekati 3dB. Sebuah model komunikasi tanpa PNC terlihat meskipun SNR sudah dinaikkan sampai 50dB tapi perbaikan untuk nilai BER (Bit error rate) tidak mencapai nilai  $10^{-5}$ . Tetapi jika digunakan algoritma PNC saat nilai SNR terus dinaikkan sampai 50dB maka perbaikan BER hampir mendekati nilai  $10^{-6}$ . Terlihat efektifitas penggunaan algoritma PNC yang diterapkan dalam model kanal relay dua arah dalam penelitian ini jika dibandingkan dengan model konvensional.



Gambar 12. Hasil BER vs SNR untuk PNC



Gambar 13. Perbandingan PNC vs Konvensional

Hal ini disebabkan, karena dalam model konvensional sinyal lain yang datang dianggap sebagai interferensi, sedangkan pada PNC dilakukan penggabungan dua sinyal yang datang bersamaan di sisi *node relay* (intermediate) dan dilakukan pengiriman messagenya bersamaan. Maka inilah yang membuat performansi sistem dengan menggunakan PNC menjadi lebih baik. Sebuah channel coding dapat ditambahkan untuk meningkatkan nilai BER, maka sebuah convolutional code ditambahkan dalam model PNC dipenelitian ini, Hasil perbandingannya dapat dilihat digambar 14.

Garis berwarna hijau menunjukkan performansi setelah ditambahkan convolutional code, terlihat terjadi perbaikan performansi berupa peningkatan nilai BER tapi tidak terlalu signifikan. Ini terjadi



Gambar 14. Hasil Penambahan convolutional code

karena pemberian convolutional code terjadi dilayer data, sehingga perbaikan hanya terjadi sedikit. Dalam sebuah sistem, sekecil apapun peningkatkan nilai BER tentu sangat berarti sebab lingkungan propagasi tidak dapat diprediksi dengan sempurna.

## 5. Kesimpulan dan Saran

Penerapan Physical Layer Network Coding (PNC) memberikan performansi yang lebih baik dibandingkan dengan model konvensional. Pada sistem konvensional dengan peningkatan SNR sampai 50dB nilai BER tidak sampai pada  $10^{-5}$  sedangkan setelah menerapkan PNC maka pada peningkatan SNR yang sama perbaikan nilai BER hampir mendekati nilai  $10^{-6}$ . Perbaikan yang begitu signifikan terlihat jelas, sebab dalam PNC dilakukan penggabungan dari kedua sinyal yang datang pada node relay(intermediate) dan melakukan pengiriman secara broadcast. Tentu berbeda dengan model konvensional yang menganggap sinyal yang lain sebagai pengganggu. Perbaikan yang terlihat begitu signifikan antara model konvensional dengan PNC tentu memberikan sebuah potensi besar untuk dikembangkan. Tetapi saat dilakukan penambahan convolutional code pada skema PNC, perbaikan terjadi tetapi tidak begitu tampak, ini bisa terjadi sebab penambahan convolutional code diterapkan pada layer data.

Penelitian di bidang PNC masih banyak memberikan tantangan yang perlu dilakukan lagi, salah satunya jika penambahan node relay dan user ditambah. Karena dalam penelitian ini masih diujicoba dalam model yang sangat dasar untuk menunjukkan perbaikan yang ditimbulkan oleh algoritma PNC.

## Daftar Pustaka

- [1] C. Fragouli, D. Katabi, A. Markopoulou, M. Médard, and H. Rahul, 2007 "Wireless Network Coding: Opportunities and Challenges", IEEE Military Communications Conference
- [2] C. Fragouli, J. Y. Boudec, and J. Widmer, "Network Coding: An Instant Primer", 2006, ACM Special Interest Group on Data Communication, Computer Communication Review, pages 63-68, Vol. 36, No. 1
- [3] E. Ahmed, A. Eryilmaz, M. Médard, and A. E. Ozdaglar, 2007 "On the Scaling Law of Network Coding Gains in

- Wireless Networks", IEEE Military Communications Conference
- [4] M . Ghaderi, D. Towsley, J. Kurose, 2008, "Reliability Gain of Network Coding in Lossy Wireless Networks", IEEE International Conference on Computer Communications, pages 1-23
- [5] Nazer,B, 2011,"Reliable Physical Layer Network Coding",Proceeding IEEE vol 99, pp. 438-460
- [6] R. Ahlswede, N. Cai, S. R. Li, and R. W. Yeung,2000 "Network Information Flow," IEEE Transactions on Information Theory.
- [7] R. Khalili, M. Ghaderi, J. Kurose and D. Towsley, 2008, "On the Performance of Random Linear Network Coding in Relay Networks", IEEE Military Communication, pages 1-7
- [8] S. Ni, Y. Tseng, Y. Chen, and J. Sheu, 1999 "The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network" IEEE/ACM Mobile Computing and Networking,
- [9] S.-Y. R. Li, Q. T. Sun and Z. Shao, 2011, "Linear Network Coding: Theory and Algorithms," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 3, pp. 372-387
- [10] Shengli Zhang, Soung-Chang Liew, Patrick P.Lam, 2006 "Physical Layer network coding" Dept. of Information Engineering, the Chinese University of Hong Kong, HK SAR, China

## Biodata Penulis

**Firman Hadi Sukma P,ST**, memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro (ST), Program Studi Telekomunikasi IT Telkom lulus tahun 2007. Saat ini sedang menyelesaikan program Master Teknik jurusan Telekomunikasi Multimedia di ITS-Surabaya.