

**Jurnal Politeknik Caltex Riau**<https://jurnal.pcr.ac.id/index.php/elementer/>

| e- ISSN : 2460-5263 (Online) | p- ISSN : 2443-4167 (Print) |

## **Kinerja Teknik Predistorsi Pada Sistem Komunikasi Kooperatif Dual-Hop Kanal Tak Simetris**

**Muhammad Naufal Saniar<sup>1</sup>, Yoedy Moegiharto<sup>2</sup>, Arifin<sup>4</sup>, Muhamad Milchan<sup>3</sup>**<sup>1</sup>Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Teknik Telekomunikasi, email : [naufal.saniar@gmail.com](mailto:naufal.saniar@gmail.com)<sup>2</sup>Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Teknik Telekomunikasi, email : [yomoegiharto@pens.ac.id](mailto:yomoegiharto@pens.ac.id)<sup>3</sup>Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Teknik Telekomunikasi, email : [arifin@pens.ac.id](mailto:arifin@pens.ac.id)<sup>4</sup>Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Teknik Telekomunikasi, email : [milchan@pens.ac.id](mailto:milchan@pens.ac.id)

### **Abstrak**

*Pada makalah ini akan dilakukan evaluasi penerapan teknik predistorsi baik di sumber dan di relay pada sistem transmisi kooperatif dengan protokol amplify and forward (AF). Model predistorster dan penguat daya tinggi (HPA) di sumber adalah kaskade Wiener-Hammerstein, sedang model predistorster dan HPA di relay adalah inverse Rapp dan model Rapp. Penerapan teknik predistorsi tersebut diterapkan pada kondisi kanal tak simetris, model Ricean fading dan Rayleigh fading. Evaluasi terhadap kinerja teknik predistorsi ditunjukkan dengan nilai bit error rate (BER) di tujuan. Dari hasil simulasi dapat ditunjukkan bahwa penerapan teknik predistorsi di sumber dan di relay menghasilkan kinerja paling baik. Dan penerapan pada kanal tak simetris hasil simulasi menunjukkan bahwa kondisi kanal jalur relay-tujuan (R-D) dan sumber-tujuan (S-D) memiliki pengaruh besar terhadap sinyal yang diterima di tujuan, memberikan kinerja paling baik bila model kanal-kanal tersebut bersifat Ricean fading.*

**Kata kunci:** Teknik predistorsi

### **Abstract**

*In this paper, we will evaluate the application of predistortion techniques both at the source and relay in a cooperative transmission system with an amplify and forward (AF) protocol. The predistorster and high power amplifier (HPA) models at the source are the Wiener-Hammerstein cascade, while the predistorster and HPA models in the relay are the inverse Rapp and Rapp models. The application of this distortion technique is applied to asymmetric channel conditions, Ricean fading and Rayleigh fading models. Evaluation of the performance of the distortion technique is indicated by the bit error rate (BER) at the destination. From the simulation results, it can be shown that the application of the distortion technique at the source and at the relay produces the best performance. And the application of the simulation results on unsymmetrical channels shows that the channel conditions of the destination-relay (R-D) and source-destination (S-D) channels have a major influence on the signal received at the destination, providing the best performance if the channel model is Ricean fading.*

**Keywords:** predistortion techniques

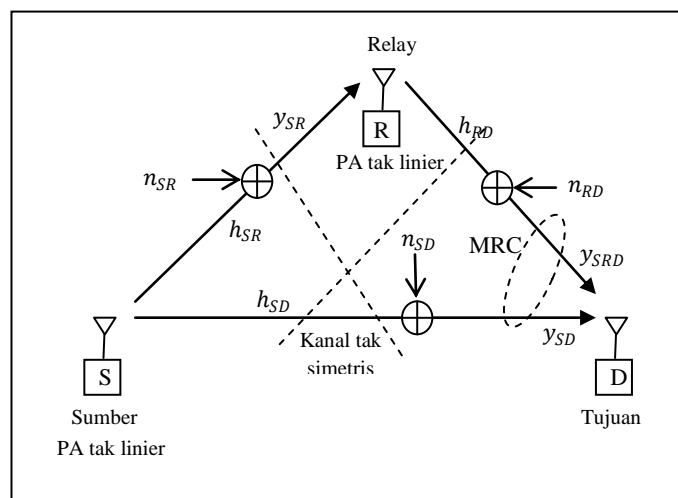
## 1. Pendahuluan

Sistem komunikasi kooperatif merupakan sebuah paradigma baru yang siap diaplikasikan pada jaringan-jaringan nirkabel [1]-[4]. Idea dasar dari komunikasi kooperatif semua pengguna bergerak (mobile users) atau node dalam sebuah jaringan nirkabel dapat bekerja sama mengirim sinyal ke sebuah tujuan. Pengguna bergerak dapat dianggap sebagai relay-relay yang akan menerima sinyal dari sebuah atau lebih sumber dan meneruskan sinyal tersebut ke sebuah tujuan. Pada setiap relay dapat dilakukan pemrosesan sinyal sesuai metode yang digunakan, misal metode amplify and forward (AF) atau metode decode and forward (DF). Masing-masing replika sinyal dari masing-masing relay menghasilkan sebuah diversitas kooperatif yang dapat memperbaiki kinerja sistem dan kekebalan sistem dari efek kanal multipath secara signifikan.

Dalam beberapa scenario praktis, jalur-jalur relay mengalami kondisi pelemahan yang tidak sama, misal sebuah jalur base station memiliki kondisi kanal model Ricean karena terdapat komponen line-of-sight (LoS) yang kuat, sementara jalur-jalur relay ke mobile user mengalami kondisi kanal model Rayleigh fading [5]. Kinerja metode AF dan DF dengan mengukur outage probability [6] dan bit error probability rata-rata sudah diteliti pada makalah [7]-[8]. Kinerja transmisi dual-hop dengan kondisi kanal campuran antara model kanal Rayleigh and Rician Fading dievaluasi pada makalah [9] dan multi relay [10]. Tetapi pada makalah [9] tidak dibahas pengaruh tak linier piranti penguat daya di relay maupun di sumber. Pengurangan efek tak linier penguat daya di relay diteliti pada [11][12], tanpa penerapan teknik predistorsi di sumber. Juga proses penghapusan distorsi tak linier PA di relay dilakukan di penerima tujuan. Pada makalah ini akan dievaluasi kinerja teknik predistorsi model Wiener pada model HPA Hammerstein di sumber dan teknik predistorsi untuk model memoryless PA model Rapp di relay. Kinerja teknik predistorsi juga dievaluasikan pada kanal tak simetris antara jalur sumber-relay, sumber-tujuan dan relay-tujuan.

## 2. Perancangan Sistem

Diagram jaringan komunikasi kooperatif dua-hop satu relay dengan kanal tak simetris dapat ditunjukkan seperti gambar 1. Sumber dan relay menggunakan satu buah antena, sehingga dianggap sebuah half-duplex system. Sumber diasumsikan sebuah base station, sehingga dimungkinkan melakukan proses yang lebih kompleks dengan model HPA dengan memory. Sedangkan relay diasumsikan sebagai sebuah access point dengan bentuk phisik yang lebih kecil, sehingga HPA yang digunakan dianggap jenis SSPA, model memoryless Rapp.



**Gambar 1. Diagram jaringan komunikasi kooperatif dengan kanal tak simetris.**

## 2.1 Transmisi kooperatif

Di sumber sinyal OFDM mengalami proses linierisasi atau predistorsi sebelum dilewatkan pada sebuah penguat daya tinggi (high power amplifier, HPA) tak linier dengan memory, dan outputnya akan dipancarkan melalui satu buah antenna,  $x(t)$ . Sinyal tersebut diterima oleh sebuah relay dan sebuah tujuan, kedua sinyal tersebut dapat dituliskan dalam ranah waktu seperti

$$y_{SR}(t) = \sqrt{P_S} h_{SR}(t)x(t) + n_{SR}(t) \quad \dots (1)$$

$$y_{SD}(tk) = \sqrt{P_S} h_{SD}(t)x(t) + n_{SD}(t) \quad \dots (2)$$

$P_S$  adalah daya pancar sinyal di sumber.  $h_{SR}, n_{SR}, h_{SD}, n_{SD}$  masing-masing adalah respon kanal dan noise AWGN pada jalur sumber-relay (SR) dan sumber-tujuan (SD). Di relay sinyal yang diterima dari sumber dikuatkan oleh faktor penguat  $G$ ,

$$x_R(t) = G y_{SR}(t) = G \left( \sqrt{P_S} h_{SR}(t)x(t) + n_{SR}(t) \right) \quad \dots (3)$$

dengan

$$G = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{|h_{SR}|^2 P_S + \sigma_{SR}^2}} \quad \dots (4)$$

$P_R$  adalah daya pancar sinyal di relay, dan  $\sigma_{SR}$  varians noise AWGN  $n_{SR}$ .

Kemudian dikirimkan ke tujuan,  $y_{SRD}(t)$ , yang dapat dinyatakan seperti,

$$\begin{aligned} y_{SRD}(t) &= h_{RD}(t)x_R(t) + n_{RD}(t) \quad \dots (5) \\ &= h_{RD}(t)(G y_{SR}(t)) + n_{RD}(t) \\ &= h_{RD}(t)(G \{ \sqrt{P_S} h_{SR}(t)x(t) + n_{SR}(t) \}) + n_{RD}(t) \\ &= h_{RD}(t) \left( G \sqrt{P_S} h_{SR}(t)x(t) + G n_{SR}(t) \right) + n_{RD}(t) \\ &= G h_{RD}(t) \left( \sqrt{P_S} h_{SR}(t)x(t) \right) + G h_{RD}(t)n_{SR}(t) + n_{RD}(t) \quad \dots (6) \end{aligned}$$

$h_{RD}, n_{RD}$  masing-masing adalah respon kanal dan noise AWGN pada jalur relay-tujuan (RD).

Atau dituliskan seperti,

$$y_{SRD}(t) = h_{SRD}(t)x(t) + n_{SRD}(t) \quad \dots (7)$$

dengan,  $h_{SRD}(t) = G \sqrt{P_S} h_{SR}(t)h_{RD}(t)$  dan,

$$n_{SRD}(t) = G h_{RD}(t)n_{SR}(t) + n_{RD}(t)$$

Di tujuan, kedua sinyal dari sumber  $y_{SD}(t)$  dan dari relay  $y_{SRD}(t)$  digabung dengan menggunakan metode MRC,

$$y_{SD}(t) = y_{SD}(t) + y_{SRD}(t) \quad \dots (8)$$

Bila di relay sinyal dilewatkan ke penguat daya (PA) tak linier model memoryless, maka sinyal output PA dapat dituliskan seperti,

$$w(t) = T[x_R(t)] \quad \dots (9)$$

$T[\cdot]$  merupakan fungsi memoryless PA. Menurut teorema Bussgang, output dari sembarang system tak linier merupakan hasil penjumlahan dari replika sinyal input yang teredam dan noise sinyal [13], maka output PA dapat dituliskan dalam ranah waktu diskrit seperti,

$$\begin{aligned} T[x_R(t)] &= w(t) = Kx_R(t) + d(t) \\ w(t) &= KGy_{SR}(t) + d(t) \quad \dots (10) \end{aligned}$$

$K$  sebuah fixed gain dan  $d(t)$  sebuah distorsi tak linier dengan mean nol dan tak terkait dengan sinyal input  $x_R(n)$ . Sehingga sinyal yang dikirim dari relay setelah PA tak linier,  $y_{SRD}(t)$ , dapat dinyatakan seperti,

$$y_{SRD}(t) = h_{RD}(t)w(t) + n_{RD}(t) \quad \dots (11)$$

$$\begin{aligned} &= h_{RD}(t)(KGy_{SR}(t) + d(t)) + n_{RD}(t) \\ &= KGh_{RD}(t) \left( \sqrt{P_S} h_{SR}(t) x(t) \right) + KGh_{RD}(t)n_{SR}(t) + h_{RD}(t)d(t) + n_{RD}(t) \quad \dots (12) \\ &= h_{SRD}(t) x(t) + n_{SRD}(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{dengan, } h_{SRD}(t) &= KG\sqrt{P_S} h_{SR}(t)h_{RD}(t) \text{ dan,} \\ n_{SRD}(t) &= KGh_{RD}(t)n_{SR}(t) + h_{RD}(t)d(t) + n_{RD}(t) \end{aligned}$$

Dan nilai SNR di destinasi sesuai persamaan (8) dapat dinyatakan seperti.

$$\gamma_D(t) = \gamma_{SD}(t) + \frac{\gamma_{SR}(t)\gamma_{RD}(t)}{\gamma_{SR}(t) + \gamma_{RD}(t) + 1} \quad \dots (13)$$

## 2.2 Teknik Linierisasi

Teknik linierisasi atau predistorsi dilakukan sebelum sinyal lewat HPA tak linier untuk mengkompensasi sifat-sifat tak linier HPA, sehingga dapat menaikkan daerah kerja linier HPA dan menghilangkan distorsi tak linier. Pada penelitian ini dipilih model HPA memoryless (model Rapp) di relay, dan model Hammerstein dengan memory dan predistorsi model Wiener.

Hubungan input output HPA model Rapp dapat dinyatakan dalam fungsi konversi modulasi AM/AM seperti berikut,

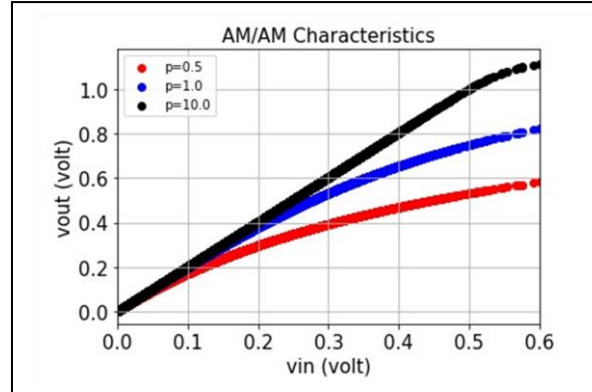
$$x(t) = y(t) \frac{A}{\left[ 1 + \left( \frac{Ay(t)}{Y_0} \right)^{2p} \right]^{\frac{1}{2p}}} \quad \dots (14)$$

$$x(t) = y(t)d(t)$$

dengan

$$d(t) = \frac{A}{\left[ 1 + \left( \frac{Ay(t)}{Y_0} \right)^{2p} \right]^{\frac{1}{2p}}}$$

Dan Rapp tidak menghasilkan distorsi fasa,  $\phi[x(t)] = 0$ .  $x(t)$  adalah sinyal output PA,  $\phi[x(t)]$  perubahan fasa. Model Rapp mencakup tiga parameter, gain linier sinyal kecil  $A$ , level saturasi PA,  $Y_0$  dan faktor penghalus kelinieran menuju level saturasi  $p$ . Untuk nilai  $p$  yang berbeda-beda fungsi konversi AM/AM model Rapp dapat ditunjukkan seperti gambar 2.

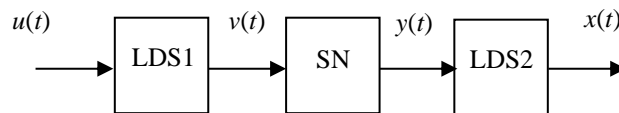


**Gambar 2. Fungsi konversi AM/AM model**

Untuk mengurangi dampak tak linier oleh PA di relay, akan diterapkan sebuah predistorsi yang bersifat kebalikan dari lipat tak linier PA, dituliskan seperti berikut,

$$y(t) = x(t) \frac{A}{\left[1 - \left(\frac{Ax(t)}{X_0}\right)^{2p}\right]^{\frac{1}{2p}}} \quad \dots (15)$$

Sedang di source hubungan input output predistorter model Wiener dan HPA model Hammerstein ditunjukkan pada gambar 3 dan dituliskan seperti persamaan berikut,



**Gambar 3. Struktur model PD-PA Wiener-Hammerstein.**

Output dari model kaskade Wiener-Hammerstein data dituliskan seperti,

$$x(t) = B(q^{-1})u(t - m - n) + [1 - A(q^{-1})]v(t - n) +$$

$$\sum_{k=2}^r f_k v^k(t - n) + [D(q^{-1}) - 1]y(t - n) + [1 - C(q^{-1})]x(t) \quad \dots (16)$$

dengan,

$$y(t) = \sum_{k=1}^r f_k v^k(t) \quad \dots (17)$$

dan

$$v(t) = q^{-m}B(q^{-1})u(t) + [1 - A(q^{-1})]v(t) \quad \dots (18)$$

$u(t)$  dan  $v(t)$  masing-masing adalah sinyal input dan output,  $A(q^{-1})$  dan  $B(q^{-1})$  adalah polinomial-polinomial scalar pada operator unit delay  $q^{-1}$ .

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na}$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + a_{nb}q^{-nb}$$

$q^m$  menyatakan delay murni dari LDS1.

### 2.3 Kanal multipath fading

Amplitudo-amplitude pelemahan (fading) kanal dapat dimodelkan dengan distribusi Rician atau Rayleigh tergantung pada keberadaan specular signal component. Pelemahan bersifat Rayleigh jika terdapat banyak jalur pantulan (reflective path) dan tidak terdapat jalur propagasi line-of-sight (LOS). Jika jalur LOS cukup dominan maka pelemahannya terdistribusi model Rician.

Amplitudo pelemahan  $r_i$  pada waktu ke  $i$  dapat dinyatakan seperti,

$$r_i = \sqrt{(x_i + \beta)^2 + y_i^2} \quad \dots (19)$$

$\beta$  adalah amplitudo specular component,  $x_i$  dan  $y_i$  masing-masing adalah cuplikan proses acak Gaussia dengan mean nol dan varians sebesar  $\sigma_0^2$ . Perbandingan antara specular atau komponen LOS dengan komponen-komponen sinyal yang tersebar (the scattered components), dinamakan factor  $K$  Rician yang dinyatakan seperti,

$$K = \beta^2 / 2\sigma_0^2 \quad \dots (20), \text{ bila nilai } K = 0, \text{ maka model Rician menjadi model Rayleigh.}$$

Bila satu jalur mengalami fading model Rayleigh (misal jalur dari sumber ke tujuan, S-D) maka nilai SNR di titik tujuan,  $\gamma_{SD}$  terdistribusi eksponensial dengan probability density function (PDF) seperti,

$$p_{\gamma_{SD}}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}} e^{-\gamma/\bar{\gamma}_{SD}} \quad \dots (21)$$

Bila jalur sumber ke relay, S-R, mengalami fading model Rician, nilai SNR terdistribusi menurut sebuah noncentral  $\chi^2$  distribution dan dinyatakan seperti,

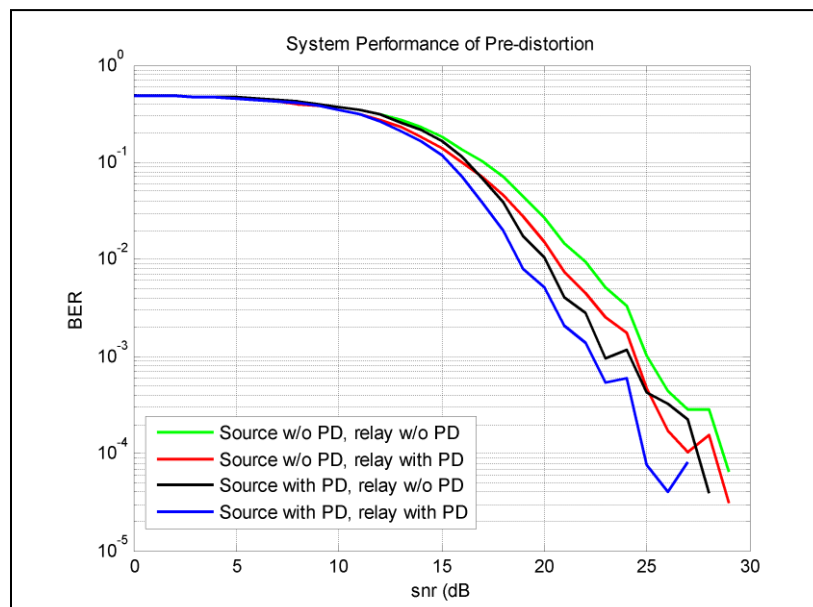
$$p_{\gamma_{SR}}(\gamma) = \frac{(K+1)e^{-K}}{\bar{\gamma}_{SR}} e^{-(K+1)\gamma/\bar{\gamma}_{SR}} I_0 \left( 2\sqrt{\frac{K(K+1)\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}} \right) \quad \dots (22)$$

$I_0$  menyatakan fungsi Bessel orde nol.

### 3. Hasil Simulasi

Hasil simulasi kinerja teknik predistorsi pada sistem komunikasi kooperatif dengan menerapkan protocol AF dengan menggunakan MATLAB ditunjukkan dalam nilai BER untuk beberapa scenario.

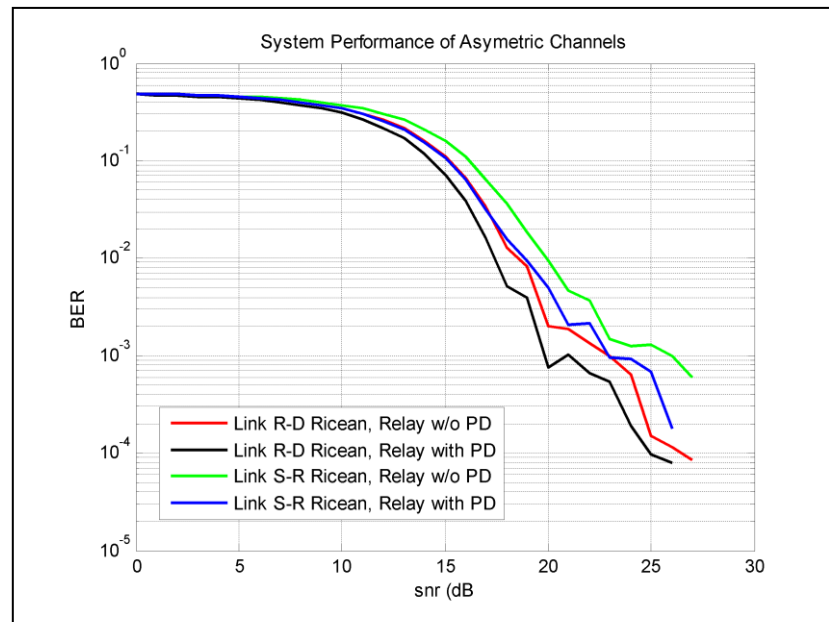
- Skenario pertama mengevaluasi aspek penerapan teknik predistorsi di sumber dan relay pada kanal simetris. Hasil simulasi untuk skenario pertama ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Kinerja teknik predistorsi di sumber dan di relay.

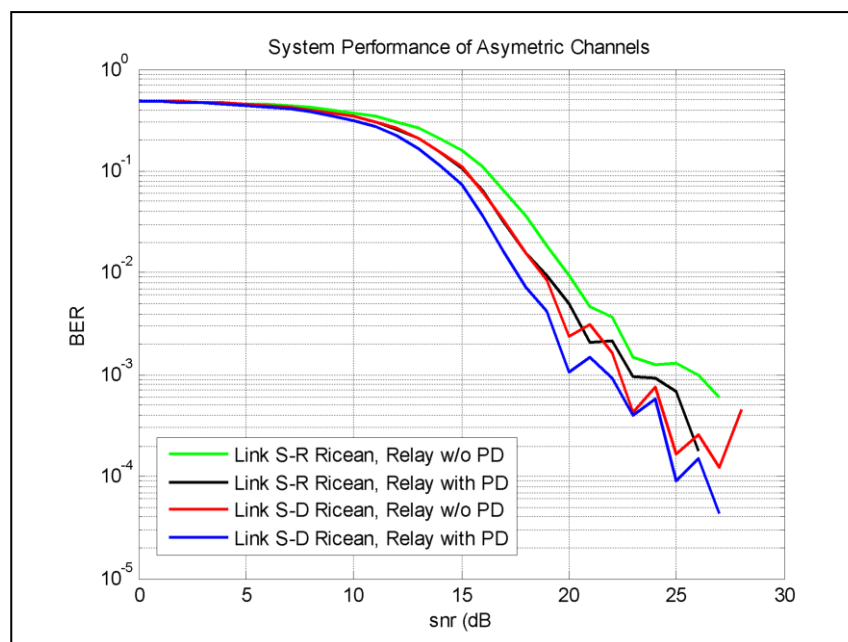
Dari gambar diatas dapat ditunjukkan bahwa penerapan predistorsi di sumber memberikan kinerja yang lebih baik dibanding tanpa predistorsi, (garis kurva hijau dengan garis hitam) untuk relay dengan PA tak linier tanpa PD. Juga pada relay dengan menerapkan teknik predistorsi (garis kurva merah dengan garis biru). Dan penerapan teknik predistorsi di sumber dan di relay akan menghasilkan kinerja yang paling baik.

- b. Skenario kedua menerapkan pada kondisi kanal tak simetris. Hasil simulasi untuk scenario b, ditunjukkan pada gambar 5,6,7.



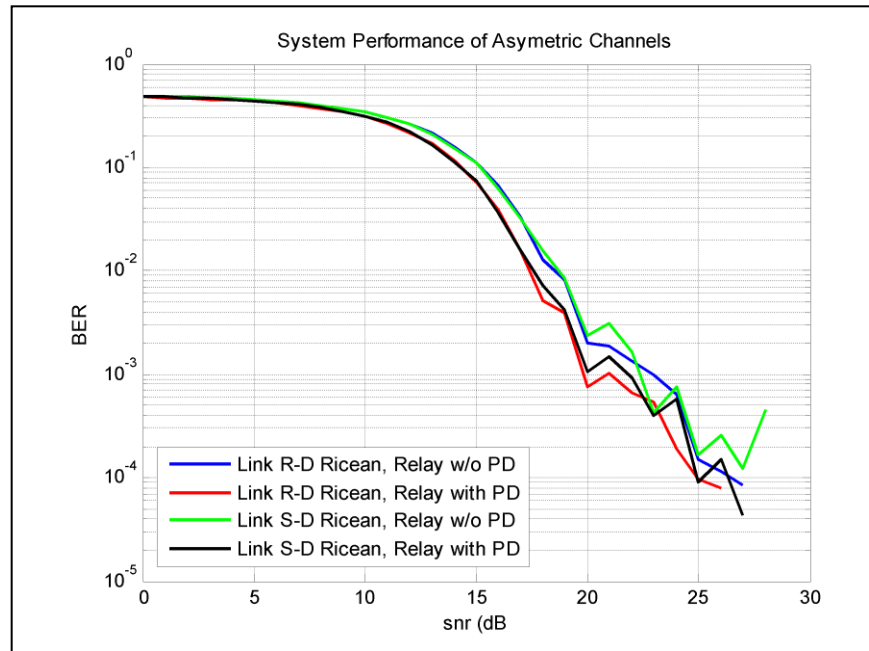
**Gambar 5. Kinerja sistem pada kanal tak simetris antara jalur relay-tujuan (R-D) dengan sumber-relay (S-R).**

Pada gambar 5 kondisi kanal jalur R-D Ricean menghasilkan kinerja lebih baik dibanding kanal S-R, mengartikan bahwa kondisi kanal di jalur relay-tujuan (R-D) lebih berpengaruh dibanding kondisi kanal jalur sumber-relay (S-R). Pada nilai BER =  $10^{-3}$  nilai SNR yang dibutuhkan oleh link S-R Ricean dengan teknik predistorsi sekitar 23 dB (kurva biru) sedang oleh link R-D hanya hampir 20 dB (kurva hitam).



**Gambar 6. Kinerja sistem pada kanal tak simetris antara jalur sumber-relay (S-R) dengan sumber-tujuan (S-D).**

Pada gambar 6 kondisi kanal jalur S-D Ricean menghasilkan kinerja lebih baik dibanding kanal S-R, mengartikan bahwa kondisi kanal di jalur sumber-tujuan (R-D) lebih berpengaruh dibanding kondisi kanal jalur sumber-relay (S-R). Untuk nilai BER =  $10^{-3}$  nilai SNR yang dibutuhkan oleh link S-R Ricean dengan teknik predistorsi sekitar 23 dB (kurva hitam) sedang oleh link S-D hanya 20 dB (kurva biru).



**Gambar 7. Kinerja sistem pada kanal tak simetris antara jalur relay-tujuan (R-D) dengan sumber-tujuan (S-D).**

Pada gambar 7 kondisi kanal jalur R-D Ricean menghasilkan kinerja sedikit lebih baik dibanding kanal S-D, mengartikan bahwa kondisi kanal di jalur sumber-tujuan (R-D) lebih berpengaruh dibanding kondisi kanal jalur sumber-tujuan (S-R). Pada nilai BER =  $10^{-3}$  nilai SNR yang dibutuhkan oleh link S-D Ricean dengan teknik predistorsi sekitar 20 dB (kurva hitam) sedang oleh link R-D hanya hampir 20 dB (kurva merah).

Dari ketiga gambar tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa kanal jalur relay-tujuan (R-D) sedikit lebih baik pengaruhnya terhadap kualitas sinyal yang diterima ditujuan dibanding kanal jalur sumber-tujuan (S-D), dan lebih dominan dibanding jalur sumber-relay (S-R), sekitar 3 dB.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa penerapan teknik predistorsi di sumber dan relay menghasilkan kinerja paling baik dibanding bila menerapkan predistorsi hanya di satu titik (sumber atau relay) ditunjukkan pada kurva biru gambar 4. Kanal jalur menuju ke tujuan baik dari sumber maupun dari relay (S-D) dan (R-D) lebih besar pengaruhnya terhadap kualitas sinyal yang diterima dibanding kanal jalur sumber ke relay (S-R)



## 5. Daftar Pustaka

- [1] Laneman, J. N., & Wornell, G. W. "Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks", *IEEE Transactions on Information Theory*, 49, 2003, pp. 2415– 2525.
- [2] Laneman, J. N., Tse, D. N. C., & Wornell, G. W., "Cooperative diversity in wireless networks: 892 Efficient protocols and outage behavior", *IEEE Transactions on Information Theory*, 50(12)2004, pp. 3062– 3080.
- [3] Sendonaris, A., Erkip, E., & Aazhang, B., "User cooperation diversity-Part I: System description. *IEEE Transactions Communications*", 51, 2003, pp. 1927–1938.
- [4] Sendonaris, A., Erkip, E., & Aazhang, B., "User cooperation diversity-Part II: Implementation aspects and performance analysis", *IEEE Transactions on communications*, 51, 2003, pp. 1939–1948.
- [5] Y. Kim and H. Liu, "Infrastructure relay transmission with cooperative MIMO," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, July 2008, pp. 2180-2188.
- [6] Y. Zhu, Y. Xin, and P.-Y. Kam, "Outage probability of Rician fading relay channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, July 2008, pp. 2648-2652.
- [7] J. Adeane, M. R. D. Rodrigues, and I. J. Wassell, "Characterization of the performance of cooperative networks in Rician fading channels," in *Proc. ICT 2005*, Cape Town, South Africa, May 2005.
- [8] A. Ribeiro, X. Cai, and G. B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links, May 2005, p. 1264-1273.
- [9] Suraweera, Himal & Louie, Raymond & Li, Yonghui & Karagiannidis, George & Vucetic, Branka, "Two Hop Amplify-and-Forward Transmission in Mixed Rayleigh and Rician Fading Channels", *IEEE Communications Letters*. 13. 2009, pp. 227-229.
- [10] J. Zhang and R. Qiu, "Performance analysis of amplify and forward protocol in the asymmetric channel" 2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), Hangzhou, China, 2017, pp. 933-938.
- [11] Fernandes, C.A.R., Costa, D.B., de Almeida, André L.F., " Performance analysis of cooperative amplify-and-forward orthogonal frequency division multiplexing systems with power amplifier non-linearity," *IET Communications*, Vol. 8, Iss. 18, Dec. 2014, pp. 3223–3233.
- [12] E. Balti and M. Guizani, "Impact of non-linear high-power amplifiers on cooperative relaying systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 5, Jul. 2017, pp. 4163–4175.
- [13] D. Dardari, V. Tralli, and A. Vaccari, "A theoretical characterization of nonlinear distortion effects in OFDM systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 10, pp. 1755–1764, Oct. 2000.