

Kinerja Konvolusi pada Sistem *Amplify and Forward* dengan Predistorsi dan Seleksi Relai

Annisa Anggun Puspitasari¹, Mareta Dwi Nor Habibah², Ziyadatus Shofiyah³, Ida Anisah⁴, Yoedy Moegiharto⁵

Intisari—Pada makalah ini dilakukan evaluasi kinerja teknik pengodean konvolusi pada sistem komunikasi kooperatif dengan protokol *amplify-and-forward* (AF) dan menerapkan strategi seleksi relai dengan simulasi. Di sisi pemancar (sumber) diterapkan gabungan teknik reduksi *peak to average power ratio* (PAPR) skema *selective mapping* (SLM) dan predistorsi model Hammerstein. Di relai diterapkan juga teknik predistorsi model *inverse Rapp*. Di sisi kanal digunakan relai sebagai antena virtual. Penggunaan relai dalam sistem komunikasi kooperatif dapat diimplementasikan untuk jaringan 4G atau 5G pada penelitian selanjutnya, tetapi tentu membutuhkan *bandwidth* yang besar. Penerapan strategi seleksi relai mampu meningkatkan efisiensi *bandwidth* karena hanya relai terbaik saja yang akan meneruskan informasi dari pengirim ke penerima. Strategi seleksi relai jenis konvensional digunakan untuk mengevaluasi kinerja teknik pengodean konvolusi pada skema multirelai dengan memilih sebuah relai terbaik yang mempertimbangkan nilai *signal to noise ratio* (SNR) pada kanal sumber ke relai dan relai ke tujuan. Relai terbaik tersebut akan meneruskan sinyal dari sumber ke tujuan dengan menggunakan protokol AF. Kinerja sistem dinyatakan dalam nilai probabilitas *bit error rate* (BER). Dari hasil simulasi, dapat ditunjukkan bahwa teknik pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem hingga mencapai 16,59%, baik dengan menggunakan teknik predistorsi maupun tanpa teknik predistorsi. Kemudian, penerapan teknik predistorsi di sisi sumber dan relai mampu menghasilkan kinerja paling baik, yaitu kinerja sistem dapat meningkat hingga mencapai 34%. Selain itu, penerapan strategi seleksi relai jenis konvensional menunjukkan bahwa skema dengan relai terbanyak, yaitu enam relai, mampu menghasilkan kinerja yang paling baik disebabkan semakin banyaknya pilihan jalur yang tersedia.

Kata Kunci—Kode Konvolusi, OFDM, Komunikasi Kooperatif, Protokol AF, Predistorsi, Seleksi Relai.

I. PENDAHULUAN

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) adalah sebuah skema modulasi *multicarrier* yang dapat menghasilkan efisiensi spektral yang tinggi, transmisi data yang tinggi, dan kebal terhadap efek *multipath fading*. Saat ini sistem OFDM sudah diterapkan pada banyak sistem komunikasi nirkabel modern, seperti *wireless local/metropolitan area network standards* (WLAN/WMAN), *European digital audio/video broadcasting* (DAV/DVB), dan juga *long-term evolution*

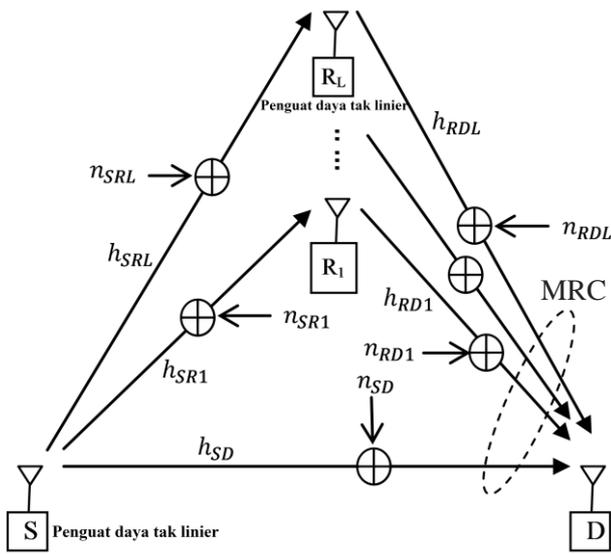
(LTE). Namun, sinyal OFDM memiliki nilai *peak to average power ratio* (PAPR) tinggi karena proses penjumlahan koheren banyak sinyal modulasi *multicarrier*. Nilai PAPR yang tinggi menjadi kelemahan penting pada sistem OFDM, sebab apabila sinyal dilewatkan pada sebuah penguat daya tak linier, akan terjadi distorsi pada sinyal yang dipancarkan sehingga menurunkan kinerja sistem. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan penurunan PAPR atau *input back off* (IBO) yang memadai pada sinyal masukan penguat daya. Akan tetapi, penurunan PAPR dapat menurunkan efisiensi penguat daya, sehingga diperlukan solusi alternatif yaitu menaikkan daerah linier penguat daya dan menaikkan kinerja sistem dengan penerapan teknik predistorsi [1]–[3].

Sementara itu, sistem komunikasi kooperatif pada jaringan nirkabel sudah menjadi judul atau topik penelitian dunia [4], [5]. Model sistem komunikasi kooperatif berupa model relai yang terdiri atas sumber informasi, S, relai-relai, dan penerima tujuan atau destinasi, D. Model transmisi ini telah terbukti mampu menghilangkan peredaman sinyal yang disebabkan oleh pengaruh propagasi *multipath* kanal-kanal nirkabel. Dengan melibatkan sekelompok relai untuk bekerja sama dalam meneruskan sinyal yang diterima dari sumber, model transmisi ini mampu menciptakan sebuah sistem multiantena virtual, yaitu sistem diversitas ruang. Pada sistem diversitas model relai ini terdapat dua protokol dasar, yaitu protokol *amplify-and-forward* (AF) dan protokol *decode-and-forward* (DF). Pada protokol AF, relai menerima sinyal yang sudah terdistorsi oleh kanal sumber-relai (jalur SR) dari sumber informasi S, kemudian menguatkan dan meneruskannya ke destinasi. Kinerja protokol AF sudah dipelajari pada penelitian sebelumnya [6], [7].

Aplikasi OFDM pada sistem komunikasi kooperatif menimbulkan masalah distorsi tak linier juga pada penguat daya tak linier di pemancar. Efek distorsi tak linier penguat daya tak linier pada pemancar relai telah diteliti sebelumnya [8], [9]. Saat ini dikembangkan sebuah strategi seleksi relai untuk meningkatkan kinerja sistem komunikasi kooperatif. Perkembangan strategi seleksi relai dengan protokol AF juga telah dipelajari [10], [11]. Selanjutnya, penelitian tentang kinerja strategi seleksi relai dengan distorsi tak linier penguat daya makin intens dilakukan. Kinerja sistem komunikasi kooperatif protokol AF dan strategi seleksi relai dengan penguat daya tak linier diteliti pada [12]–[14]. Ketiga makalah tersebut tidak menerapkan pengodean kanal pada sumber informasi yang mampu memperbaiki kinerja sistem terhadap pengaruh kanal *multipath*. Selain itu, efek distorsi tak linier hanya ditimbulkan oleh penguat daya tak linier di sisi pemancar relai. Pada makalah ini diterapkan pengodean kanal model konvolusi pada sinyal informasi di sumber dan juga penerapan teknik predistorsi di pemancar sumber dan relai. Di pemancar

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Telekomunikasi, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jalan Raya ITS, Kampus PENS, Sukolilo, Surabaya 60111 (telp: 031-5947280; fax: 031-5946111; e-mail: ¹annisanggun@gmail.com, ²maretadwinh@gmail.com, ³shofiyah.ziya18@gmail.com, ⁴ida@pens.ac.id, ⁵moegiharto@pens.ac.id)

[Diterima: 25 Agustus 2021, Revisi: 7 Desember 2021]



Gbr. 1 Sistem komunikasi kooperatif multirelai.

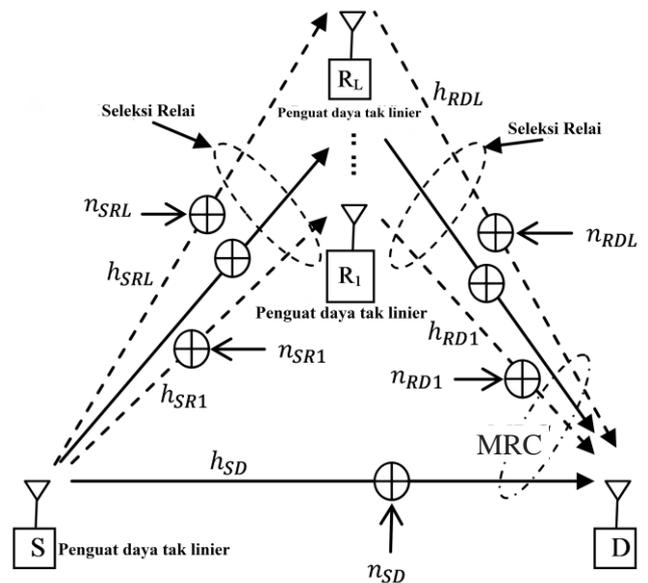
sumber diterapkan susunan kaskade *predistorter*-penguat daya tinggi dengan memori model Hammerstein-Wiener, sedangkan di pemancar relai diterapkan *predistorter inverse Rapp* dan penguat daya tak linier tanpa memori model Rapp. Untuk menurunkan nilai PAPR sinyal OFDM, diterapkan teknik reduksi PAPR skema *selective mapping* (SLM) di pemancar [15]. Hal tersebut bertujuan untuk menurunkan amplitudo sinyal OFDM sehingga membuat penguat daya bekerja di daerah linier. Kinerja sistem dengan penerapan kode konvolusi akan diwujudkan dalam nilai atau kurva *bit error rate* (BER).

II. MODEL SISTEM

A. Sistem Komunikasi Kooperatif dengan Protokol AF

Pada sebuah sistem komunikasi kooperatif dasar terdapat sebuah sumber informasi (S), sebuah penerima tujuan atau destinasi (D), dan beberapa relai *half-duplex* (R). Jika dianggap setiap pemancar sumber, relai, dan destinasi memiliki satu antenna dan di pemancar sumber dan pemancar relai terdapat penguat daya tak linier, maka diagram blok sistem dapat ditunjukkan seperti Gbr. 1.

Kondisi kanal atau *channel state information* (CSI) pada saluran sumber ke relai, relai ke destinasi, dan sumber ke destinasi dinotasikan sebagai h_{SR} , h_{RD} , dan h_{SD} . Masing-masing dari ketiganya dianggap sebagai variabel acak Gaussian kompleks *independent identically distributed* (*i.i.d.*), sedangkan nilai rata-rata adalah nol dan nilai varian sebesar σ^2 . Kondisi atau respons kanal dianggap konstan selama periode transmisi sinyal informasi dan berubah untuk periode transmisi berikutnya, sedangkan kondisi kanal h_{SR} , h_{RD} dianggap dapat dikenali sehingga memungkinkan dipilihnya sebuah relai terbaik dalam strategi seleksi. *Additive noise* pada semua saluran atau kanal dimodelkan dengan variabel acak Gaussian kompleks dengan nilai rata-rata nol dan nilai varian sebesar $\sigma_n^2 = N_0$. Sebagai penyederhanaan, daya yang dipancarkan dari sumber ke setiap relai dianggap sama besarnya dan dinotasikan dengan P_S . Strategi seleksi relai memilih kondisi kanal terbaik



Gbr. 2 Strategi seleksi relai pada sistem komunikasi kooperatif.

pada kanal sumber-relai dan relai-destinasi untuk menentukan sebuah relai terbaik, seperti ditunjukkan pada Gbr. 2.

Terdapat tiga periode untuk proses transmisi kooperatif. Pada periode pertama, dilakukan proses seleksi relai berdasarkan kondisi kanal, yaitu kanal sumber-relai dan kanal relai-destinasi. Periode pertama dianggap berlangsung cepat atau berdurasi pendek, sehingga tidak mengganggu proses transmisi dan penerimaan sinyal informasi secara keseluruhan. Pada periode kedua, sumber memancarkan sinyal informasi ke setiap relai dan destinasi, lalu relai terpilih hasil seleksi akan menerima sinyal informasi tersebut dari sumber. Kemudian pada periode ketiga, relai terpilih hasil seleksi akan menguatkan sinyal yang diterima dan meneruskannya ke destinasi dengan menggunakan protokol AF.

Secara matematis, sinyal yang diterima oleh sebuah relai dapat dituliskan seperti (1).

$$y_{SR} = \sqrt{P_S} h_{SR} x_S + n_{SR} \tag{1}$$

dengan P_S dan x_S adalah daya pancar sumber dan sinyal informasi yang dipancarkan sumber, sedangkan $h_{SR} \sim CN(0, \sigma_{SR}^2)$ dan $n_{SR} \sim CN(0, N_0)$ masing-masing adalah respons kanal dan *additive white Gaussian noise* (AWGN) pada kanal sumber-relai. Di relai, sinyal yang diterima akan dikuatkan dengan nilai penguatan tetap, G , dan sinyal keluaran dari relai dapat dituliskan seperti (2).

$$x_R = G y_{SR} \tag{2}$$

dengan

$$G = \sqrt{\frac{P_R}{P_S |h_{SR}|^2 + N_0}} \tag{3}$$

dan P_R menyatakan daya pancar di relai.

Untuk sistem dengan banyak relai atau multi-relai (L buah), total sinyal keluaran dari L buah relai yang diterima di destinasi dapat dituliskan seperti berikut.

$$y_{RD} = \sum_{l=1}^L y_{RlD}$$

dengan

$$y_{RlD} = h_{RlD} x_{Rl} + n_{RlD} \quad (4)$$

dengan y_{RlD} menyatakan sinyal yang dipancarkan dari relai ke- l menuju destinasi.

Dengan memasukkan (1) dan (2) ke (4), diperoleh persamaan seperti berikut.

$$\begin{aligned} y_{SRlD} &= h_{RlD} G_l y_{SRl} + n_{RlD} \\ &= h_{RlD} \left(\frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{|h_{SRl}|^2 P_S + N_0}} \right) y_{SRl} + n_{RlD} \\ &= h_{RlD} \left(\frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{|h_{SRl}|^2 P_S + N_0}} \right) \{ \sqrt{P_S} h_{SRl} x_s \} + n_{RlD}^* \end{aligned} \quad (5)$$

dengan

$$n_{RlD}^* = \left(\frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{|h_{SRl}|^2 P_S + N_0}} \right) h_{RlD} n_{SRl} + n_{RlD} \quad (6)$$

juga merupakan AWGN dengan nilai varian sebesar $\frac{P_R |h_{RlD}|^2 \sigma_{SRl}^2}{P_S |h_{SRl}|^2 \sigma_{RlD}^2} + \sigma_{RlD}^2$, atau dapat ditulis seperti (7).

$$y_{SRlD} = h_{SRlD} x_s + n_{SRlD} \quad (7)$$

dengan $h_{SRlD} = \sqrt{P_S} \left(\frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{|h_{SRl}|^2 P_S + N_0}} \right) h_{SRl} h_{RlD}$ dan $n_{SRlD} = n_{RlD}^*$. Total sinyal yang diterima oleh destinasi dituliskan seperti pada (8).

$$y_D = y_{SD} + y_{SRD} = y_{SD} + \sum_{l=1}^L y_{SRlD}. \quad (8)$$

Apabila diterapkan strategi seleksi relai dan terpilih relai ke- l sebagai relai terbaik, maka sinyal yang diterima oleh destinasi adalah seperti (5). Nilai *signal-to-noise ratio* (SNR) sesaat sinyal yang diterima dari relai ke- l di destinasi dapat dituliskan seperti (9).

$$y_{SRlD} = \frac{P_S G_l |h_{SRl} h_{RlD}|^2}{\sigma_n^2 (G_l |h_{RlD}|^2 + 1)}. \quad (9)$$

B. Model Penguat Daya Tak Linier

Salah satu model penguat daya tak linier tanpa memori yang banyak diterapkan pada *solid state power amplifier* (SSPA) adalah model Rapp. Untuk mengenali karakteristik penguat daya tak linier, digunakan fungsi transfer AM-AM $g[y(t)]$ dan AM-PM $\phi[y(t)]$. Untuk model Rapp, fungsi ini dapat didefinisikan seperti (10) dan (11) [16].

$$g[y_{PA}(t)] = x(t) \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{Ax(t)}{X_0} \right)^{2p} \right]^{\frac{1}{2p}}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} g[y_{PA}(t)] &= x(t) d(t) \\ d(t) &= \frac{A}{\left[1 + \left(\frac{Ax(t)}{X_0} \right)^{2p} \right]^{\frac{1}{2p}}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\phi[y_{PA}(t)] = 0$$

dengan $g[y_{PA}(t)]$ menyatakan magnitudo sinyal keluaran, $\phi[y_{PA}(t)]$ adalah fase sinyal keluaran, dan $d(t)$ adalah faktor distorsi penguat daya. Penguat daya yang tak linier akan menimbulkan distorsi tak linier pada sinyal keluaran dan pelebaran spektrum sinyal atau *out-of-band radiation*. *Out-of-band radiation* dapat mengganggu spektrum sinyal-sinyal yang berdekatan sehingga perlu dikurangi atau dihilangkan. Strategi yang dapat digunakan untuk menghilangkan efek tak linier tersebut adalah dengan menerapkan teknik predistorsi sebelum penguat daya. *Predistorter* adalah sebuah model fungsi kompleks yang bersifat *inverse* atau kebalikan terhadap sifat-sifat tak linier penguat daya. *Predistorter* akan mengompensasi karakteristik atau sifat tak linier penguat daya, sehingga penguat daya akan menguatkan sinyal secara linier dan menghasilkan sinyal keluaran yang tak terdistorsi. *Predistorter* untuk SSPA model Rapp adalah *inverse* dari karakteristik Rapp, yang dapat dituliskan seperti (12) [17].

$$d^*(t) = \frac{A}{\left[1 - \left(\frac{Ax(t)}{X_0} \right)^{2p} \right]^{\frac{1}{2p}}}. \quad (12)$$

Sinyal keluaran penguat daya setelah diterapkan teknik predistorsi dapat dituliskan seperti (13).

$$g[y_{PD}(t)] = x(t) \cdot d^*(t) \cdot d(t). \quad (13)$$

Selain model tanpa memori, penguat daya juga dapat dimodelkan sebagai penguat daya tinggi (*high power amplifier*, HPA) dengan memori. Salah satu contoh model HPA dengan memori adalah model Wiener dan untuk model ini digunakan predistorsi model Hammerstein yang bersifat *inverse* terhadap karakteristik tak linier model Wiener [18], [19]. Diagram blok koneksi kaskade model Hammerstein dan Wiener ditunjukkan pada Gbr. 3 [20].

Dalam bentuk polinomial, *predistorter* dapat dirumuskan seperti berikut.

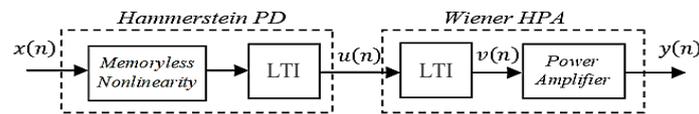
$$u(n) = \sum_{m=0}^M \lambda_m \left(\sum_{p=1}^P \alpha_p x^p(n-m) \right) \quad (14)$$

dengan M menyatakan panjang memori dari *inverse filter* linier dan P adalah pangkat dari ke tak-linieran, dan

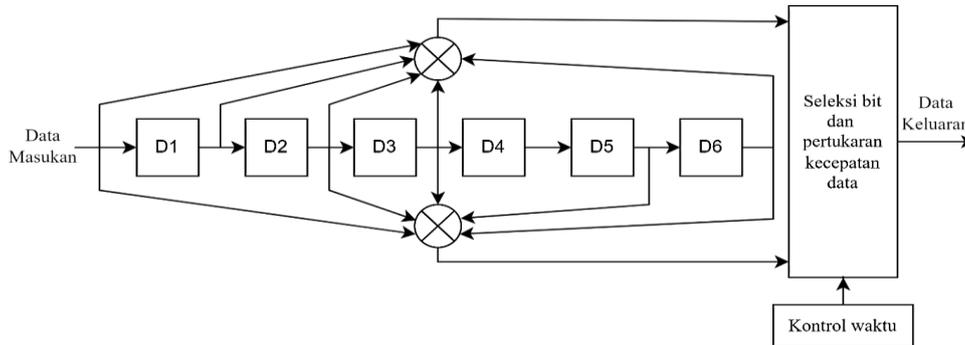
$$v(n) = \sum_{k=0}^K \beta_k \left(\sum_{m=0}^M \lambda_m \left(\sum_{p=1}^P \alpha_p x^p(n-m-k) \right) \right) \quad (15)$$

dengan β adalah koefisien-koefisien filter LTI. Sinyal keluaran dari blok penguat daya dinyatakan seperti (16).

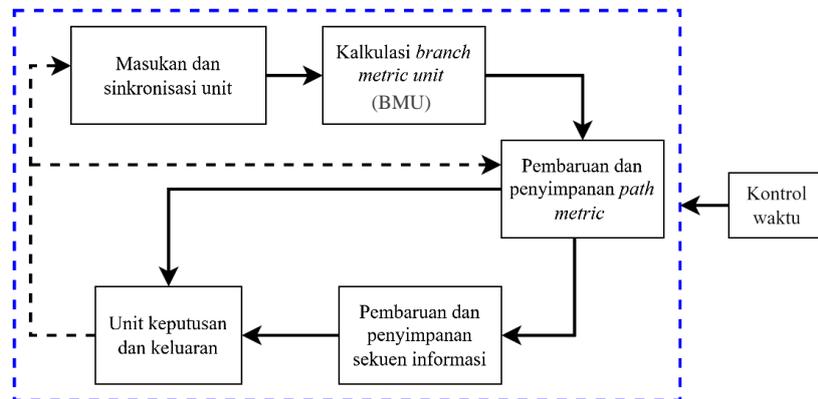
$$y(n) = f(v(n)) = \sum_{q=0}^Q \gamma_{2q-1} (v(n))^{2q-1}. \quad (16)$$



Gbr. 3 Diagram blok koneksi kaskade model Hammerstein-Wiener.



Gbr. 4 Diagram blok encoder konvolusi.



Gbr. 5 Diagram blok decoder model Viterbi.

C. Pengodean Konvolusi

Kode konvolusi terkenal dengan sifatnya yang praktis. Pada kode konvolusi terdapat tiga parameter yang digunakan, yaitu n , m , dan k , yang merupakan jumlah bit keluaran, jumlah register memori, dan jumlah bit masukan [21]. Laju pengodean atau *code rate* merupakan perbandingan antara jumlah bit masukan dengan jumlah bit keluaran, k/n . Diagram blok *encoder* konvolusi ditunjukkan pada Gbr. 4. Sebaliknya, digunakan *decoder* model Viterbi pada sisi penerima untuk memproses sinyal hasil pengodean konvolusi, seperti ditunjukkan pada Gbr. 5.

III. SISTEM YANG DITAWARKAN UNTUK DITELITI

Diagram blok sistem komunikasi kooperatif dengan satu relai terbaik menggunakan protokol AF dan implementasi teknik pengodean kanal serta teknik predistorsi di sumber dan relai ditunjukkan pada Gbr. 6. Deretan bit masukan $x(t)$ dikodekan menggunakan pengodean konvolusi dengan laju $\frac{1}{2}$ dan menghasilkan deretan bit dengan panjang dua kali, $x_c(t)$. Lalu, deretan bit tersebut dipetakan menggunakan skema modulasi QPSK untuk menghasilkan deretan simbol kompleks, $x_{mod}(t)$. Setelah itu, deretan simbol ditransformasi menjadi simbol-simbol OFDM melalui teknik reduksi SLM yang memiliki nilai PAPR terkecil, $x_{OFDM}(t)$. Kemudian, simbol-

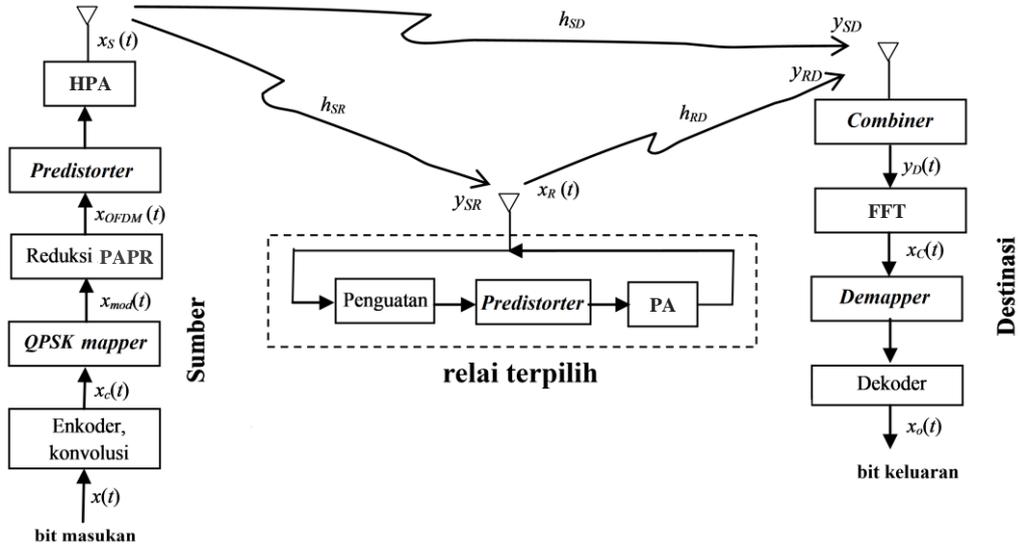
simbol dilewatkan *predistorter* dan HPA tak linier agar dihasilkan sinyal informasi yang dipancarkan sumber, $x_S(t)$, yang diterima oleh sebuah relai terpilih dan sebuah penerima di destinasi.

Model Rapp dipilih sebagai model penguat daya (PA) tak linier tanpa memori di relai dan *predistorter* ditempatkan sebelum penguat daya setelah blok penguatan untuk mengompensasi sifat-sifat tak linier penguat daya. Sistem *bandpass memoryless nonlinear* menggunakan teorema Bussgang dengan sinyal masukan berupa Gaussian kompleks seperti sinyal OFDM, sehingga sinyal keluaran relai terpilih (misalnya relai ke- l) dapat dituliskan seperti (17).

$$\begin{aligned} z_{R_l} &= K_{R_l} x_{R_l} + d_{R_l} \\ z_{R_l} &= K_{R_l} G_l y_{SR_l} + d_{R_l} \end{aligned} \tag{17}$$

dengan $K_{R_l} = \mathbb{E}[z_{R_l} x_{R_l}^* / P_R]$ adalah faktor penguatan, sedangkan d_{R_l} adalah distorsi tak linier bersifat *noise* ranah waktu dengan rata-rata nol, tak terkorrelasi dengan sinyal masukan x_{R_l} dan K_{R_l} . Maka, sinyal yang dipancarkan dari relai terpilih ke- l menuju destinasi dapat dituliskan seperti berikut.

$$\begin{aligned} y_{SR_lD} &= h_{R_lD} z_{R_l} + n_{R_lD} \\ y_{SR_lD} &= h_{R_lD} (K_{R_l} G_l y_{SR_l} + d_{R_l}) + n_{R_lD}, \text{ dan} \end{aligned}$$



Gbr. 6 Sistem yang ditawarkan.

$$y_{SR_l} = \sqrt{P_S} h_{SR_l} x_S + n_{SR_l}$$

$$y_{SR_lD} = h_{R_lD} \{K_{R_l} G_l (\sqrt{P_S} h_{SR_l} x_S + n_{SR_l}) + d_{R_l}\} + n_{R_lD}$$

$$y_{SR_lD} = K_{R_l} G_l h_{SR_l} h_{R_lD} \sqrt{P_S} x_S + K_{R_l} G_l h_{R_lD} n_{SR_l} + h_{R_lD} d_{R_l} + n_{R_lD}$$

$$y_{SR_lD} = h_{SR_lD} \sqrt{P_S} x_S + n_{SR_lD} \quad (18)$$

dengan x_S menyatakan sinyal informasi dari sumber, atau keluaran dari HPA tak linier dengan memori, sehingga $h_{SR_lD} = K_{R_l} G_l h_{SR_l} h_{R_lD}$ dan $n_{SR_lD} = K_{R_l} G_l h_{R_lD} n_{SR_l} + h_{R_lD} d_{R_l} + n_{R_lD}$. SNR sesaat sinyal yang diterima di destinasi dari sumber melalui relai terpilih ke- l dapat dituliskan seperti (19).

$$\gamma_{SR_lD} = \frac{P_S |G_l K_{R_l} h_{SR_l} h_{R_lD}|^2}{N_0 (|G_l K_{R_l} h_{R_lD}|^2 + 1)} \quad (19)$$

atau seperti (20),

$$\gamma_{SR_lD} = \frac{\gamma_{SR_l} \gamma_{R_lD(PA)}}{\gamma_{SR_l} + \gamma_{R_lD(PA)} + 1} \quad (20)$$

dengan SNR sesaat sinyal yang diterima di relai terpilih ke- l dari sumber dan yang diterima di destinasi dari relai terpilih ke- l dengan penguat daya dituliskan pada (21).

$$\gamma_{SR_l} = \frac{P_S |h_{SR_l}|^2}{N_0}, \quad \gamma_{R_lD(PA)} = \frac{G_l^2 K_{R_l}^2 P_R |h_{R_lD}|^2}{N_0} \quad (21)$$

Varian AWGN pada semua kanal atau jalur dianggap sebesar $\sigma_{SD}^2 = \sigma_{RD}^2 = \sigma_{SR}^2 = N_0$.

Pada lingkungan nirkabel tanpa interferensi, strategi seleksi relai jenis konvensional cukup memadai untuk diterapkan. Strategi jenis ini membutuhkan kuat sinyal atau SNR sesaat pada kanal, atau jalur antara sumber ke relai terpilih, $S - R_l$ dan relai terpilih ke destinasi, $R_l - D$, h_{SR_l} , h_{R_lD} . Strategi seleksi relai jenis konvensional dapat dirumuskan seperti (22) [22].

$$L^{th} = \max_{l \in L} \min \{SNR_{SR_l}, SNR_{R_lD}\} = \max_{l \in L} \min \{\gamma_{SR_l}, \gamma_{R_lD}\} \quad (22)$$

Upperbound SNR total di destinasi setelah penggabungan sinyal dari sumber dan dari relai terpilih dapat dituliskan seperti (23) [22].

$$\begin{aligned} \gamma_D &= \gamma_{SD} + \max_{l \in L} \min \{\gamma_{SR_l}, \gamma_{R_lD}\} \\ &= \gamma_{SD} + \max_{l \in L} \min \left\{ \frac{\gamma_{SR_l} \gamma_{R_lD}}{\gamma_{SR_l} + \gamma_{R_lD} + 1} \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

dengan L^{th} menyatakan notasi untuk memilih nilai maksimum dari γ_l dan $\gamma_l = \min(\gamma_{SR_l}, \gamma_{R_lD})$.

PDF dari γ_l dapat dinyatakan seperti $f_{\gamma_l}(\gamma) = 1/\bar{\gamma}_l \exp(1/\bar{\gamma}_l)$, dengan notasi untuk SNR rata-rata dari γ_{SR_l} adalah $\bar{\gamma}_{SR_l}$ dan SNR rata-rata dari γ_{R_lD} adalah $\bar{\gamma}_{R_lD}$. Lalu, $\bar{\gamma}_{SR_l} = \mathbf{E}(|h_{SR_l}|^2) E_S/N_0$ dan $\bar{\gamma}_{R_lD} = \mathbf{E}(|h_{R_lD}|^2) E_S/N_0$, sehingga nilai rata-rata SNR dari γ_l dapat dituliskan seperti (24).

$$\bar{\gamma}_l = \bar{\gamma}_{SR_l} \bar{\gamma}_{R_lD} / \bar{\gamma}_{SR_l} + \bar{\gamma}_{R_lD} \quad (24)$$

Dengan menerapkan penguat daya tak linier di relai, maka (19) dapat dituliskan seperti (25).

$$\gamma_D = \gamma_{SD} + \max_{l \in L} \min \left\{ \frac{\gamma_{SR_l} \gamma_{R_lD(PA)}}{\gamma_{SR_l} + \gamma_{R_lD(PA)} + 1} \right\} \quad (25)$$

BER rata-rata dari strategi seleksi relai dapat dihitung dengan menggunakan PDF $f_{\gamma_D}(\gamma)$ dari γ_D dan dituliskan seperti (26).

$$BER_b(\gamma) = \int_0^\infty Q(\sqrt{\gamma}) f_{\gamma_D}(\gamma) d\gamma \quad (26)$$

dengan Q adalah *error function*.

IV. HASIL SIMULASI

Untuk mengerjakan simulasi, digunakan parameter-parameter seperti berikut.

- Protokol kooperatif: *amplify and forward* (AF).
- Jumlah *subcarrier* sistem OFDM: 256.
- Jenis modulasi: QPSK.

- Model kanal: *Rayleigh fading*.
- Jumlah simbol OFDM: 1.000 simbol.
- Strategi seleksi relai: konvensional.
- Jumlah relai: dua, empat, dan enam buah relai.

Pemilihan relai terbaik tidak tergantung pada jumlah relai, tetapi pada algoritme seleksi relai yang digunakan. Makalah ini menggunakan algoritme seleksi relai jenis konvensional, yaitu relai terbaik dipilih dengan mempertimbangkan nilai SNR dari jalur sumber ke relai dan relai ke destinasi, sehingga digunakan relai sebanyak dua, empat, dan enam hanya untuk melihat perbandingan kinerja BER yang diperoleh.

Kinerja pengodean konvolusi pada sistem yang diteliti terhadap penerapan teknik predistorsi di sumber ditunjukkan pada Gbr. L1 di lampiran. Kinerja dievaluasi untuk dua dan empat jumlah relai dan penerapan strategi seleksi relai. Gbr. L1 menunjukkan kinerja teknik pengodean konvolusi dengan penerapan teknik predistorsi di sumber. Pengamatan dilakukan pada sistem dengan penerapan teknik reduksi SLM dan predistorsi (PD) di relai. Berdasarkan Gbr. L1, pada skema dua relai, BER 10^{-3} pada sistem tanpa predistorsi dan tanpa pengodean konvolusi dicapai pada nilai SNR sebesar 30 dB, sedangkan dengan pengodean konvolusi BER 10^{-3} dicapai pada nilai SNR 22 dB. Hal ini menunjukkan bahwa pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem sebesar 8 dB atau 26,67%. Pada pengamatan BER yang sama, sistem dengan predistorsi dan tanpa pengodean konvolusi membutuhkan SNR sebesar 19,5 dB, sedangkan dengan menambahkan pengodean konvolusi, sistem hanya membutuhkan SNR sebesar 16 dB. Oleh karena itu, pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem sebesar 3,5 dB atau 17,95%. Pada skema empat relai, nilai BER 10^{-4} pada sistem dengan dan tanpa predistorsi tanpa menggunakan pengodean konvolusi dicapai pada SNR, berturut-turut, 20,5 dB dan 30 dB, sedangkan dengan menerapkan pengodean konvolusi, BER 10^{-4} dicapai pada nilai SNR 16,5 dB dan 23 dB. Dengan demikian, diketahui bahwa pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem sebesar 7 dB atau 23,33% untuk sistem tanpa predistorsi, dan sebesar 4 dB atau 19,51% untuk sistem dengan predistorsi.

Kinerja pengodean konvolusi pada sistem yang diteliti terhadap penerapan teknik predistorsi di relai ditunjukkan pada Gbr. L2. Kinerja dievaluasi untuk jumlah relai sebanyak dua dan empat dengan penerapan strategi seleksi relai.

Gbr. L2 menunjukkan kinerja teknik predistorsi di relai dengan dan tanpa penerapan pengodean konvolusi di sumber. Berdasarkan Gbr. L2, pada sistem dua relai, untuk memperoleh nilai BER 10^{-3} pada sistem tanpa predistorsi dan tanpa pengodean konvolusi, dibutuhkan SNR 21,5 dB, sedangkan sistem dengan pengodean konvolusi hanya membutuhkan SNR 18 dB. Oleh karena itu, diketahui bahwa pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem sebesar 3,5 dB atau 16,28%. Namun, dengan menerapkan predistorsi, dapat diperoleh kinerja sistem yang lebih baik karena sistem hanya membutuhkan SNR sebesar 19,5 dB untuk sistem tanpa pengodean konvolusi dan 16 dB untuk sistem dengan pengodean konvolusi. Dengan demikian, sistem dengan pengodean konvolusi dan predistorsi mampu meningkatkan kinerja sistem sebesar 3,5 dB atau 17,95%. Pada sistem empat

relai, nilai BER 10^{-4} pada sistem dengan dan tanpa predistorsi tanpa pengodean konvolusi dicapai pada nilai SNR 20,5 dB dan 30 dB, sedangkan dengan menerapkan pengodean konvolusi BER tersebut dicapai pada nilai SNR 16,5 dB dan 19,5 dB. Dengan demikian, diketahui bahwa pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem sebesar 10,5 dB atau 35% untuk sistem tanpa predistorsi dan sebesar 4 dB atau 19,51% untuk sistem dengan predistorsi.

Kinerja teknik predistorsi di sumber dan relai pada sistem yang diteliti dengan dan tanpa penerapan pengodean konvolusi ditunjukkan pada Gbr. L3 dan Gbr. L4. Kinerja sistem dievaluasi untuk jumlah relai sebanyak dua dan empat dengan penerapan teknik reduksi PAPR SLM dan strategi seleksi relai.

Gbr. L3 menunjukkan bahwa sistem tanpa pengodean konvolusi memiliki kinerja sistem terbaik saat diterapkan teknik predistorsi di sumber dan relai untuk sistem empat relai. Hal itu disebabkan sistem hanya membutuhkan SNR sebesar 21 dB pada BER 10^{-4} , sedangkan sinyal yang lain tidak mampu mencapai nilai BER 10^{-4} . Kemudian pada Gbr. L4 ditunjukkan bahwa untuk mencapai nilai BER 10^{-4} , dengan penerapan pengodean konvolusi dibutuhkan SNR sebesar 16,5 dB pada sistem empat relai. Hal itu menunjukkan pula bahwa pengodean konvolusi mampu meningkatkan kinerja sistem dengan didapatkannya nilai BER yang lebih rendah atau nilai SNR yang lebih rendah pada nilai BER yang sama.

Selain itu, berdasarkan Gbr. L3 dan Gbr. L4 diketahui bahwa kinerja sistem terbaik didapatkan saat diterapkan teknik predistorsi kedua titik, yaitu sumber dan relai. Namun, diketahui pula bahwa penerapan teknik predistorsi di sumber memberikan peningkatan kinerja sistem yang lebih signifikan daripada penerapan teknik predistorsi di relai. Dibuktikan pada Gbr. L3 (sistem tanpa pengodean konvolusi untuk empat relai), dengan pengamatan pada BER 10^{-3} , bahwa penerapan teknik predistorsi di kedua sisi dapat meningkatkan kinerja sistem dibandingkan dengan penerapan di sumber saja, di relai saja, dan tanpa penerapan teknik predistorsi di kedua sisi. Peningkatan tersebut yaitu sebesar 2,5 dB atau 11,76%, 6,5 dB atau 25,74%, dan 9,25 dB atau 33%. Selanjutnya, pada Gbr. L4 (sistem dengan pengodean konvolusi untuk empat relai) juga ditunjukkan bahwa penerapan teknik predistorsi di kedua sisi dapat meningkatkan kinerja sistem. Kinerja sistem meningkat sebesar 3,25 dB atau 16,46% dibandingkan dengan penerapan di sumber saja, 6,5 dB atau 28,26% dibandingkan dengan penerapan di relai saja, dan 8,5 dB atau 34% dibandingkan dengan tanpa penerapan di kedua sisi. Pengamatan dilakukan pada BER 10^{-4} .

Kinerja pengodean konvolusi pada sistem yang diteliti untuk multirelai dengan penerapan strategi seleksi relai ditunjukkan pada Gbr. L5. Ditunjukkan bahwa teknik pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem. Pengamatan dilakukan pada sistem dengan penerapan teknik reduksi SLM, teknik predistorsi di sumber, dan di relai. Sistem terbaik didapatkan dengan penerapan pengodean konvolusi pada enam relai karena hanya membutuhkan SNR sebesar 17,1 dB pada BER 10^{-4} . Sebaliknya, pada pengujian tanpa penerapan pengodean konvolusi, dibutuhkan SNR sebesar 20,5 dB pada nilai BER yang sama. Maka, diketahui bahwa penerapan pengodean

konvolusi dapat meningkatkan kinerja sistem sebesar 3,4 dB atau 16,59%. Selain itu, diketahui pula bahwa dengan menambahkan pengodean konvolusi, sinyal yang didapatkan akan lebih stabil daripada tanpa menerapkannya. Hal itu terjadi karena dengan menggunakan pengodean konvolusi, sinyal yang dikirimkan akan lebih kebal terhadap efek *Rayleigh fading*.

V. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi penerapan teknik gabungan SLM dan predistorsi Hammerstein di sisi sumber dan penambahan predistorsi di sisi relai pada sistem AF dengan strategi seleksi relai, dapat diambil kesimpulan bahwa teknik pengodean konvolusi mampu memperbaiki kinerja sistem hingga mencapai 16,59%, baik dengan penerapan teknik predistorsi maupun tanpa predistorsi. Namun, penerapan teknik predistorsi di kedua sisi (sumber dan relai) mampu menghasilkan kinerja paling baik, yaitu kinerja sistem dapat meningkat sebesar 16,46% dibandingkan dengan penerapan di sumber saja, 28,26% dibandingkan dengan penerapan di relai saja, dan mencapai 34% dibandingkan dengan sistem tanpa penerapan teknik predistorsi. Selain itu, penerapan strategi seleksi relai jenis konvensional menunjukkan bahwa skema dengan relai terbanyak, yaitu enam relai, mampu menghasilkan kinerja yang paling baik karena semakin banyaknya pilihan jalur yang tersedia.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Annisa Anggun Puspitasari dan Mareta Dwi Nor Habibah; metodologi, Annisa Anggun Puspitasari; perangkat lunak, Annisa Anggun Puspitasari dan Mareta Dwi Nor Habibah; validasi, Ida Anisah dan Yoedy Moegiharto; analisis formal, Annisa Anggun Puspitasari; kurasi data, Annisa Anggun Puspitasari; penulisan—penyusunan draf asli, Annisa Anggun Puspitasari dan Mareta Dwi Nor Habibah; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Ida Anisah dan Yoedy Moegiharto; visualisasi, Ziyadatus Shofiyah; pengawasan, Ida Anisah dan Yoedy Moegiharto; administrasi proyek, Ziyadatus Shofiyah.

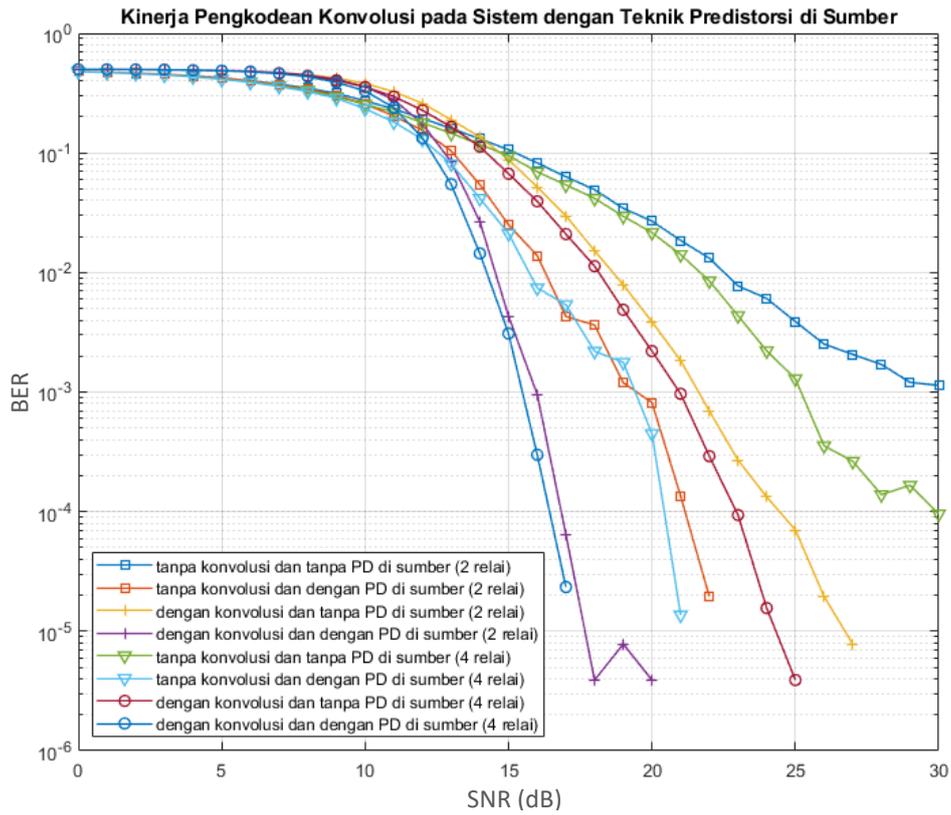
UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Vokasi, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui Program Kreativitas Mahasiswa bidang Riset Eksakta Tahun 2021.

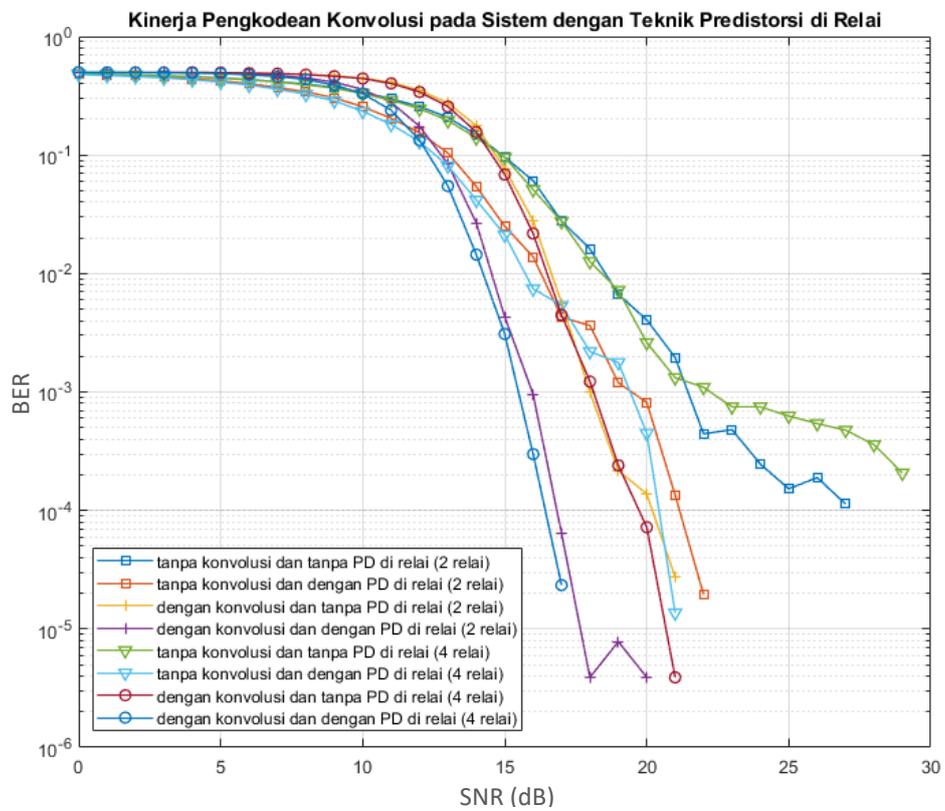
REFERENSI

- [1] J. Jeong, "New Digital Predistortion Technique of RF Power Amplifiers for Wideband OFDM Signals," *IEICE Electron. Express*, Vol. 9, No. 5, hal. 326–332, 2012.
- [2] Z.-Y. Mao, dkk., "A New RF Power Amplifier Linearization Method," *Adv. Comput. Sci. Res.*, Vol. 44, hal. 11–14, 2017.
- [3] E.A. Hussein, "Enhancing the BER and ACLR for the HPA Using Pre-Distortion Technique," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, Vol. 9, No. 4, hal. 2725–2731, 2019.
- [4] M.O. Hasna dan M.S. Alouini, "End-to-End Performance of Transmission Systems with Relays Over Rayleigh-Fading Channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 2, No. 6, hal. 1126–1131, 2003.
- [5] P.A. Anghel dan M. Kaveh, "Exact Symbol Error Probability of a Cooperative Network in a Rayleigh-Fading Environment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 3, No. 5, hal. 1416–1421, 2004.
- [6] M.I. Khalil, S.M. Berber, dan K.W. Sowerby, "Bit Error Rate Performance Analysis in Amplify-and-Forward Relay Networks," *Wireless Netw.*, Vol. 23, No. 3, hal. 947–957, 2017.
- [7] H. Jing, L. Juhu, dan Z. Haiyan, "Performance Analyses of OFDM AF Relaying System in the Presence of Phase Noise with APS and IPS," *J. China Univ. Posts Telecommun.*, Vol. 23, No. 5, hal. 1–9, 2016.
- [8] V. del Razo, dkk., "Nonlinear Amplifier Distortion in Cooperative Amplify-and-Forward OFDM Systems," *2009 IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, 2009, hal. 1–5.
- [9] P.K. Singya, N. Kumar, dan V. Bhatia, "Mitigating NLD for Wireless Networks," *IEEE Microw. Mag.*, Vol. 18, No. 5, hal. 73–90, 2017.
- [10] A.I. Akin dan H. Ilhan, "Relay Selection for AF Based Cooperative Networks," *Int. J. Tech. Res. Appl.*, No. 19, hal. 26–29, 2015.
- [11] A. Adinoyi, dkk., "Performance of Selection Relaying and Cooperative Diversity," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 8, No. 12, hal. 5790–5795, 2009.
- [12] E. Balti dan M. Guizani, "Impact of Non-Linear High-Power Amplifiers on Cooperative Relaying Systems," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 65, No. 10, hal. 4163–4175, 2017.
- [13] S.R.C. Magalhães, C.A.R. Fetnandes, dan L.C.S. Teles, "Relay Selection Methods for Cooperative OFDM Systems with Nonlinear Power Amplifiers," *Proc. IEEE Symp. Comput. Commun.*, 2018, hal. 990–995.
- [14] M. Majidi, A. Mohammadi, A. Abdipour, dan M. Valkama, "Characterization and Performance Improvement of Cooperative Wireless Networks with Nonlinear Power Amplifier at Relay," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 69, No. 3, hal. 3244–3255, 2020.
- [15] R. Nuriadnyana, A. Fahmi, dan B. Syihabuddin, "Perbandingan PAPR Metode CSLM dan SLM pada Pengirim OFDM," *J. Nas. Tek. Elektro Teknol. Inf.*, Vol. 8, No. 1, hal. 53–58, 2019.
- [16] C. Rapp, "Effects of HPA-Nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM Signal for a Digital Sound Broadcasting System," *Proc. 2nd Eur. Conf. Satell. Commun.*, 1991, hal. 179–184.
- [17] M. Shabany dan P.G. Gulak, "Efficient Compensation of the Nonlinearity of Solid-State Power Amplifiers Using Adaptive Sequential Monte Carlo Methods," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, Vol. 55, No. 10, hal. 3270–3283, 2008.
- [18] P.L. Gilabert, G. Montoro, dan E. Bertran, "On the Wiener and Hammerstein Models for Power Amplifier Predistortion," *Asia-Pacific Microw. Conf. Proc. (APMC)*, 2005, hal. 1–4.
- [19] F. Taringou, dkk., "Behaviour Modelling of Wideband RF Transmitters Using Hammerstein-Wiener Models," *IET Circuits, Devices Syst.*, Vol. 4, No. 4, hal. 282–290, 2010.
- [20] H. Karkhaneh, A. Ghorbani, dan H. Amindavar, "Quantifying and Cancellation Memory Effects in High Power Amplifier for OFDM Systems," *Analog Integr. Circuits Signal Process.*, Vol. 72, No. 2, hal. 303–312, 2012.
- [21] C. Yang, dkk., "Error-correcting Performance Comparison for Polar Codes, LDPC Codes and Convolutional Codes in High-performance Wireless," *2019 6th Int. Conf. Inf., Cybern. Comput. Soc. Syst. (ICCS 2019)*, 2019, hal. 258–262.
- [22] N. Kumar dan V. Bhatia, "Performance Analysis of Amplify-and-Forward Cooperative Networks with Best-Relay Selection Over Weibull Fading Channels," *Wireless Pers. Commun.*, Vol. 85, No. 3, hal. 641–653, 2015.

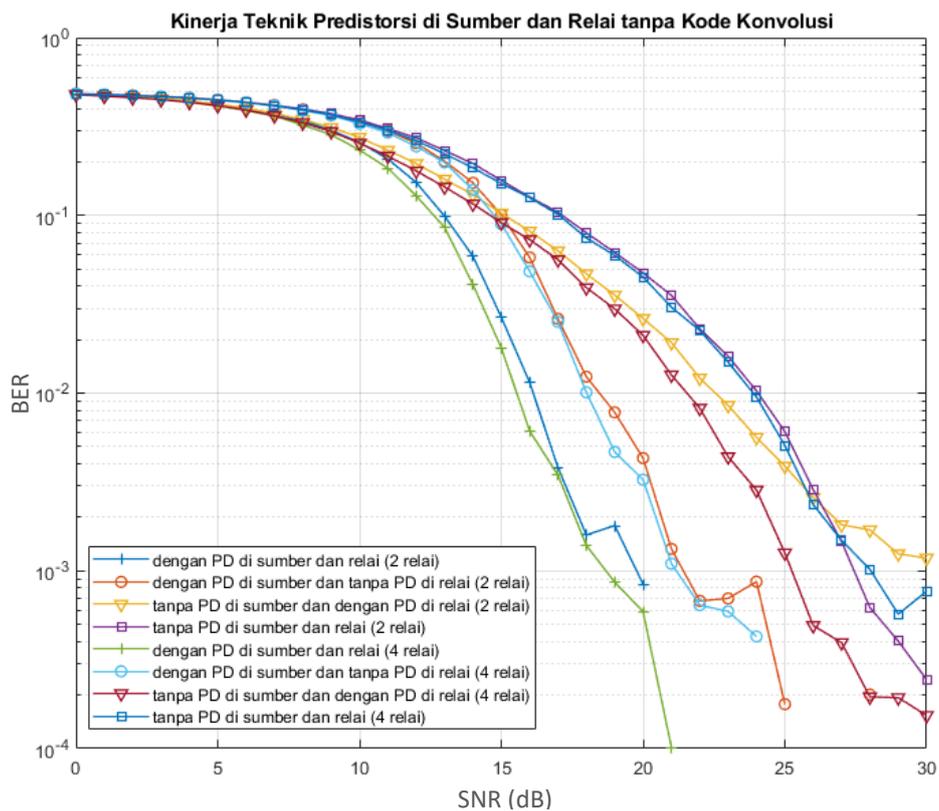
Lampiran



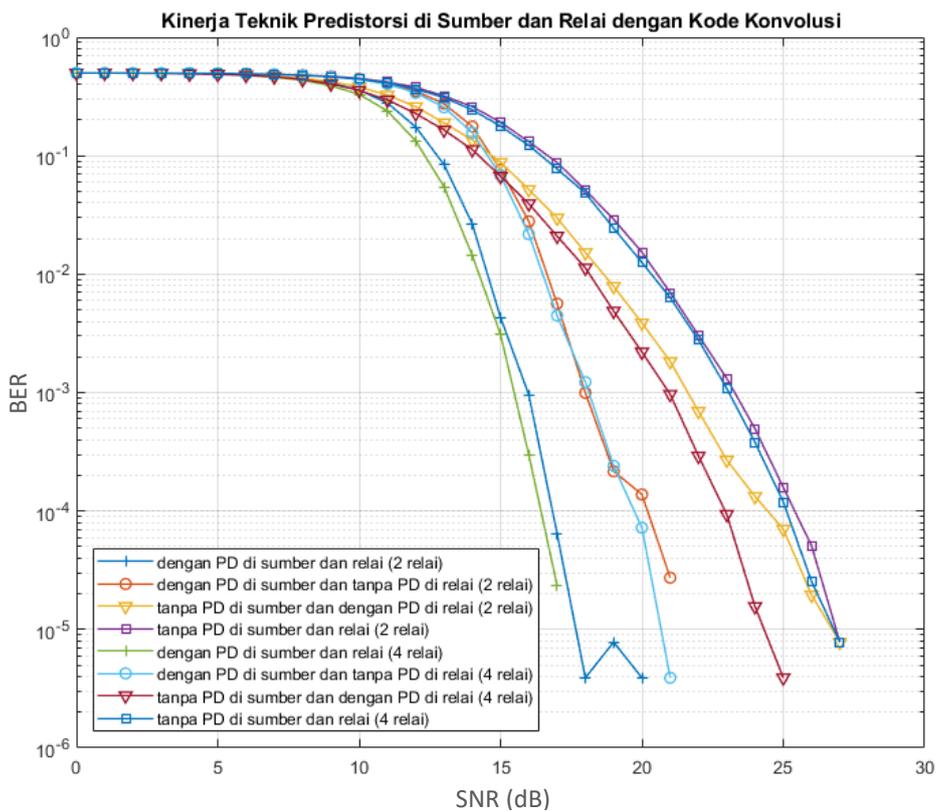
Gbr. L1 Kinerja pengodean konvolusi pada sistem dengan penerapan teknik predistorsi di sumber.



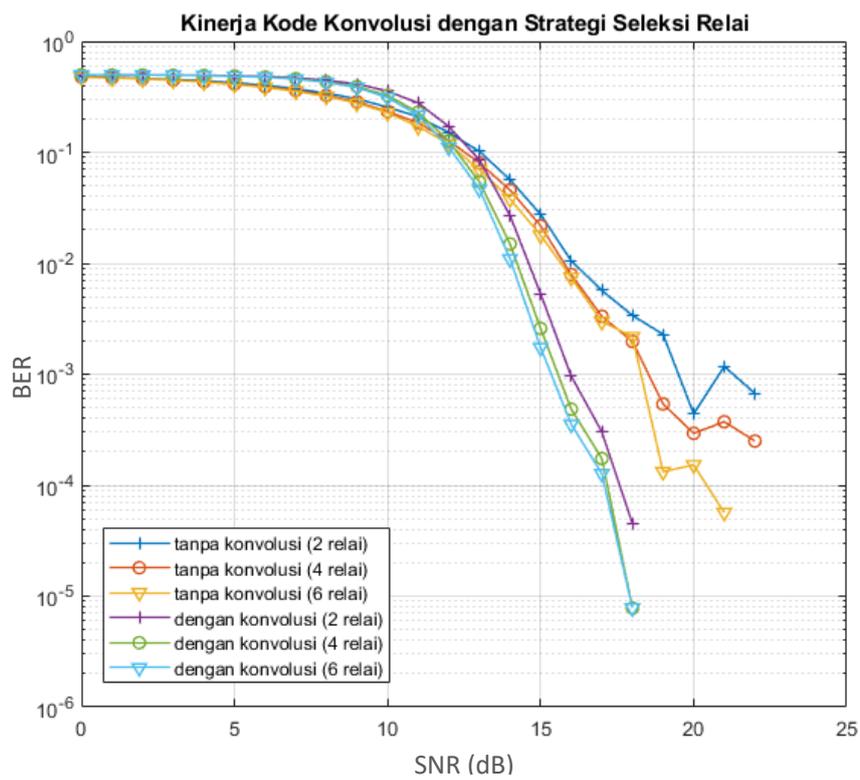
Gbr. L2 Kinerja pengodean konvolusi pada sistem dengan penerapan teknik predistorsi di relai.



Gbr. L3 Kinerja teknik predistorsi di sumber dan relai pada sistem tanpa penerapan pengodean konvolusi.



Gbr. L4 Kinerja teknik predistorsi di sumber dan relai pada sistem dengan penerapan pengodean konvolusi.



Gbr. L5 Kinerja teknik pengodean konvolusi pada sistem.