
Jurnal ***Rekayasa Elektrika***

VOLUME 13 NOMOR 1

APRIL 2017

Efisiensi Daya Protokol Quantize and Forward pada Sistem Komunikasi Kooperatif Multi-Relay 57-64

Nasaruddin, Rony Kurnia, dan Ramzi Adriman

JRE	Vol. 13	No. 1	Hal 1-64	Banda Aceh, April 2017	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	----------	---------------------------	--------------------------------------

Efisiensi Daya Protokol Quantize and Forward pada Sistem Komunikasi Kooperatif Multi-Relay

Nasaruddin¹, Rony Kurnia², dan Ramzi Adriman¹

¹Jurusan Teknik Elektro dan Komputer, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Darussalam, Banda Aceh 23111

²PT. Telkom Akses, Banda Aceh 23111

e-mail: nasaruddin@unsyiah.ac.id

Abstrak—Salah satu teknik diversitas yang efektif untuk mengatasi *fading* pada kanal nirkabel adalah sistem komunikasi kooperatif, dimana sumber mengirim informasi melalui beberapa *relay* untuk diteruskan ke tujuan. Sistem komunikasi kooperatif telah menunjukkan dapat meningkatkan kinerja sistem dan menurunkan tingkat konsumsi energi. Tetapi sistem komunikasi kooperatif sangat tergantung pada mekanisme *relay* yang digunakan yaitu protokol *relay* diantaranya *quantize and forward* (QF) dan *amplify and forward* (AF). Penelitian sebelumnya, efisiensi energi pada protokol AF telah dikaji pada sistem kooperatif *single-relay*, tetapi *multi-relay* lebih praktis. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada efisiensi daya pada sistem komunikasi kooperatif *multi-relay* menggunakan protokol QF. Metode penelitian yang digunakan adalah analisis matematis dan simulasi komputer untuk *outage probability* dan efisiensi daya pada jaringan *multi-relay* QF. Hasil simulasi didapatkan bahwa sistem *multi-relay* QF dapat menyediakan efisiensi daya yang tinggi, tetapi efisiensi tersebut berkurang ketika rasio jarak bertambah. Efisiensi daya dapat ditingkatkan dengan menambah jumlah relay yang digunakan pada sistem. Perbandingan efisiensi daya pada protokol QF dan AF juga telah disimulasikan, dimana efisiensi daya *multi-relay* QF lebih tinggi dibandingkan dengan protokol AF pada rasio jarak dan daya transmit. Dengan demikian, sistem *multi-relay* QF dapat menyediakan kinerja dan tingkat efisiensi yang tinggi pada sistem komunikasi kooperatif.

Kata kunci: *efisiensi daya, quantize and forward (QF), protokol relay, komunikasi kooperatif, multi-relay*

Abstract—One of effective diversity techniques to combat fading on wireless channel is a cooperative communication system in which a source sends information through several relays and then forward it to a destination. A cooperative communication system has shown increased the system performance and reduced the energy consumption. However, it depends on the used relay mechanism that is relay protocols such as quantize and forward (QF) and amplify and forward (AF). In the previous research, energy efficiency of AF relay has investigated for a single-relay cooperative system, but multi-relay is more practical. Therefore, this research focuses on power efficiency in multi-relay cooperative communication system using QF protocol. The research method used is mathematical analysis and computer simulation for outage probability and power efficiency in the multi-relay QF. Simulation result found that multi-relay QF system could provide a high power efficiency, but the efficiency is reduced when the distance ratio increases. Power efficiency can be increased by adding the number of relays in the system. A comparison of power efficiency for QF and AF protocols has simulated, in which power efficiency of multi-relay QF is higher than that of multi-relay AF at distance ratio and power transmit. Thus, multi-relay QF system can provide high performance and power efficiency in the cooperative communication system.

Keywords: *power efficiency, quantize and forward (QF), relay protocol, cooperative communications, multi-relay*

Copyright © 2017 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi nirkabel merupakan moda komunikasi yang sangat populer, karena sistem tersebut menyediakan beberapa kemudahan yaitu fleksibilitas dan mobilitas yang tinggi, layanan multimedia dan kehandalan sistem yang terus meningkat [1]. Namun demikian, daya baterai pada sisi perangkat bergerak terbatas dan konsumsi daya yang besar pada sisi jaringan merupakan dua tantangan yang sedang dihadapi. Dampak dari masalah ini adalah meningkatnya emisi CO₂ yang dapat membahayakan lingkungan hidup [2]. Saat ini, perkembangan sistem

komunikasi nirkabel sedang difokuskan pada jaringan masa depan 5G untuk meningkatkan kecepatan data dan *latency* yang rendah [3]. Beberapa syarat atau isu utama untuk jaringan 5G diantaranya adalah pengurangan konsumsi energi, daya tahan baterai yang tinggi dan penerapan sistem kooperatif. Untuk mendukung jaringan tersebut, model atau mekanisme sistem komunikasi yang ramah lingkungan merupakan faktor penting yang harus dipertimbangkan.

Kanal nirkabel merupakan kanal komunikasi yang rentan terhadap gangguan *noise* dan *multipath fading* yang terjadi selama proses transmisi informasi dari sumber ke

tujuan, sehingga mempengaruhi kinerja sistem. Disamping itu, pengaruh *multipath fading* pada sinyal informasi dapat meningkatkan konsumsi daya pada sistem [4]. Untuk mengurangi dampak dari *fading*, teknik diversitas pada sistem komunikasi nirkabel telah diperkenalkan yaitu *multi-input multi-output* (MIMO) yang telah membuktikan dapat meningkatkan kehandalan sistem [5]. Tetapi, MIMO punya beberapa tantangan dalam penerapannya yaitu ukuran perangkat yang terbatas, biaya perangkat bergerak mahal dan pemrosesan sinyal yang membutuhkan konsumsi daya yang tinggi [6]. Alternatifnya, sistem komunikasi kooperatif bisa diterapkan sebagai teknik diversitas untuk mengatasi permasalahan diatas, dimana sebuah sumber dapat mengirimkan sinyal ke beberapa perangkat disekitarnya, yang disebut *relay*, untuk diteruskan ke tujuan [7, 8]. Pada sistem komunikasi kooperatif, penerima dapat menerima beberapa replika sinyal informasi yang dikirimkan oleh sumber melalui satu atau lebih *relay*. Sinyal replika yang dikirim dari berbagai lintasan secara bersamaan ke penerima dapat mengurangi pengaruh *fading* dan pengaruhnya lebih kecil dari sinyal langsung (transmisi satu lintasan saja). Sistem komunikasi kooperatif dapat membentuk sebuah sistem antena jamak secara *virtual* tanpa dibatasi oleh ukuran, konsumsi energi dan biaya dari peralatan bergerak. Sehingga, sistem komunikasi kooperatif menjadi salah satu solusi untuk efisiensi energi dengan kinerja sistem yang tinggi.

Protokol pada sistem komunikasi kooperatif merupakan aspek penting dalam pemrosesan sinyal informasi yang dikirim oleh sumber ke *relay*. Ada beberapa protokol utama yaitu: *Amplify and Forward* (AF) [9, 10], *Decode and Forward* (DF) [11], *Quantize and Forward* (QF) [12], dan *Compress and Forward* (CF) [13]. Gabungan dari beberapa protokol utama di atas membentuk protokol *relay* hibrid, seperti gabungan protokol AF dan DF [14], AF dan QF [15]. Pemilihan protokol, topologi jaringan *relay* dan sumber energi akan mempengaruhi tingkat konsumsi dan efisiensi energi dari sistem secara keseluruhan.

Paper ini mengkaji efisiensi daya protokol *relay* QF pada jaringan kooperatif *multi-relay*. Sejauh ini belum ada kajian yang menganalisis tingkat efisiensi daya pada protokol QF, dimana penelitian-penelitian sebelumnya lebih diarahkan pada analisis kinerja dan tingkat kompleksitas [12, 15]. Sedangkan efisiensi daya protokol AF dan DF telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [16, 17]. Namun demikian, motivasi penelitian ini bukan hanya belum ada kajian pada protokol QF tetapi protokol ini menawarkan beberapa keuntungan lain yaitu: kinerja lebih baik dibandingkan protokol AF, kompleksitas lebih rendah dibandingkan dengan DF karena protokol QF tidak menggunakan proses pengkodean (*encoding*) dan pendekodean (*decoding*) pada *relay*, dan bisa digunakan sebagai *relay* digital seperti DF. Kemudian penelitian sebelumnya hanya mempertimbang efisiensi daya pada DF dan AF untuk *single-relay* pada jaringan kooperatif. Secara praktis, sebuah sumber dapat mengirimkan sinyal melalui beberapa *relay* didekatnya. Dengan demikian, penelitian ini juga mempertimbangkan jaringan *multi-relay* untuk

menganalisis tingkat efisiensi daya menggunakan protokol QF. Pada jaringan *multi-relay*, jarak transmisi antara sumber dan tujuan dibagi dalam dua jarak transmisi yang lebih pendek sehingga dapat mengurangi daya transmisi. Kemudian, sifat *broadcast* alami dari kanal nirkabel dapat menghemat daya dengan transmisi untuk beberapa *relay* secara bersamaan. Metode penelitian untuk mendapatkan tingkat efisiensi daya adalah analisis matematis berdasarkan model jaringan kooperatif *multi-relay* menggunakan protokol QF dan kemudian dilakukan simulasi komputer. Simulasi komputer dilakukan dengan mempertimbangkan parameter yang mempengaruhi efisiensi daya seperti daya transmit dan jarak sumber ke *relay* dan tujuan. Hasil simulasi yang didapatkan menunjukkan bahwa jumlah *relay* yang digunakan dapat meningkatkan efisiensi daya. Selanjutnya, efisiensi daya jaringan *multi-relay* QF hanya dibandingkan dengan jaringan *multi-relay* AF, karena kedua protokol ini tidak menggunakan proses pengkodean pada *relay* seperti protokol DF.

II. STUDI PUSTAKA

Arsitektur jaringan kooperatif terdiri dari beberapa model yaitu: jaringan kooperatif *single-relay*, *multi-hop relay* dan *multi-relay*. Jaringan kooperatif *single-relay* adalah sebuah jaringan yang terdiri sebuah sumber, satu *relay* dan sebuah tujuan. Jaringan *multi-hop relay* terdiri dari sebuah sumber, beberapa *relay* yang tersusun secara seri dimana informasi diteruskan dari satu *relay* ke *relay* lainnya dalam beberapa hop, dan sebuah tujuan. Sedangkan jaringan kooperatif *multi-relay* adalah model jaringan yang menjadi fokus dari penelitian ini dan dijelaskan secara detil pada bagian ini.

Model jaringan kooperatif *multi-relay* merupakan sebuah jaringan yang terdiri dari sebuah sumber, beberapa *relay* yang tersusun secara paralel dengan jarak yang berbeda, dan sebuah tujuan, seperti pada Gambar 1. Model ini juga sering disebut dengan jaringan *multi-relay dual-hop*, dimana sebuah sumber mengirim informasi melalui *hop* pertama ke beberapa *relay*, dan kemudian beberapa *relay* yang menerima informasi tersebut akan meneruskan ke tujuan pada *hop* kedua. Mekanisme penyampaian informasi dari sumber dibagi dalam 2 tahap sebagai berikut:

1. Tahap pertama

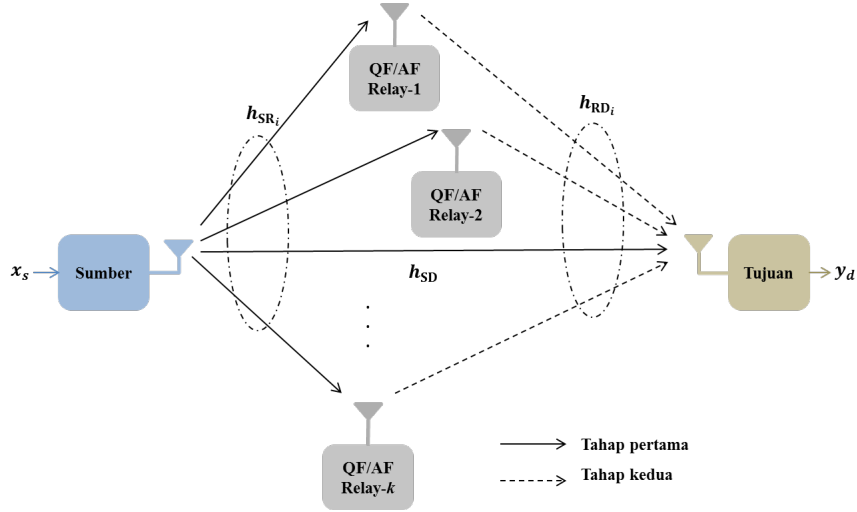
Sinyal informasi dari sumber, x_s , dikirimkan secara langsung ke tujuan (*direct link*) dan di-*broadcast* ke beberapa *relay* yang berada didekatnya. Sinyal yang dikirim langsung ke tujuan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$y_{SD} = \sqrt{P_s} x_s \times h_{SD} + n_{SD}, \quad (1)$$

dan sinyal yang di-*broadcast* ke *relay* i , dimana $i=1,2,\dots,k$, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$y_{SR_i} = \sqrt{P_s} x_s \times h_{SR_i} + n_{SR_i}, \quad (2)$$

dimana x_s adalah sinyal informasi dari sumber, merupakan daya sinyal dari sumber yang dipancar ke tujuan, dan



Gambar 1. Model sistem komunikasi kooperatif multi-relay: sumber, k relay dan tujuan

$relay$, h_{SD} dan h_{SR_i} merupakan koefisien kanal *fading* pada masing-masing kanal sumber-tujuan dan sumber- $relay-i$, dan n_{SD} dan n_{SR_i} merupakan *noise* Gaussian pada masing-masing kanal sumber-tujuan dan sumber- $relay i$.

2. Tahap kedua

Pada tahap ini, setiap *relay* akan memproses sinyal yang diterimanya dan meneruskan ke tujuan. Untuk memproses dan meneruskan informasi, *relay* membutuhkan mekanisme yang disebut dengan protokol. Pada penelitian ini, protokol *relay* yang difokuskan adalah QF, tetapi sebagai pembandingnya juga mempertimbangkan protokol AF. Protokol QF melakukan proses kuantisasi sinyal yang diterima dari sumber sebelum diteruskan ke tujuan. Sedangkan protokol AF, sinyal yang diterima oleh *relay* akan dikuatkan terlebih dahulu dan kemudian diteruskan ke tujuan. Protokol AF hanya dapat digunakan untuk sistem *relay* analog, tetapi protokol QF bisa digunakan pada *relay* analog dan digital [15]. Sinyal terkuantisasi pada protokol QF untuk *relay i* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \hat{y}_{R_i} &= Q(y_{SR_i}) \\ &= Q(\sqrt{P_S} x_S \times h_{SR_i} + n_{SR_i}), \end{aligned} \quad (3)$$

dimana \hat{y}_{R_i} merupakan sinyal informasi yang telah dikuantisasi pada *relay* untuk diteruskan ke tujuan dan $Q(\cdot)$ adalah notasi untuk proses kuantisasi. Sinyal yang diterima oleh *relay* dikuantisasi secara *uniform* dan proses kuantisasi sinyal pada *relay* dapat dinyatakan sebagai berikut [18]:

$$\Delta = (y_{R_i, \max} - y_{R_i, \min}) / L, \quad (4)$$

$$L = 2^b, \quad (5)$$

$$j = \text{round}\left(y_{R_i} - \frac{y_{R_i, \min}}{\Delta}\right), \quad (6)$$

$$\hat{y}_{R_i} = y_{R_i, \min} + j\Delta, \quad j = 0, 1, \dots, L-1, \quad (7)$$

dimana Δ adalah interval kuantisasi, L merupakan level

kuantisasi, dan b adalah jumlah bit kuantisasi pada *relay i*. Pada *relay* AF, sinyal informasi yang diterima oleh *relay* akan dilakukan penguatan dan dapat dinyatakan pada persamaan berikut [10]:

$$y_{R_i} = \sqrt{P_{R_i}} \beta_i h_{R_i, D} x_S + n_{R_i, D}, \quad (8)$$

dimana β_i merupakan koefisien penguatan dari *relay i* dan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\beta_i = \sqrt{\frac{P_{R_i}}{(P_S |h_{SR_i}|^2 + N_0)}}, \quad (9)$$

dimana P_{R_i} adalah daya transmit dari *relay i*, P_S adalah daya sumber, $n_{R_i, D}$ merupakan *noise* yang dibangkitkan pada link *relay i* dengan tujuan dan N_0 merupakan *noise* varian dari kanal, dimana diasumsikan menjadi Gaussian dengan $\mathcal{N}(0,1)$ dan tidak tergantung pada sinyal x_S .

Pada tujuan, sinyal langsung dan semua sinyal yang dikirim oleh k *relay*, baik protokol QF maupun AF, akan digabung dengan menggunakan metode *Maximum Ratio Combining* (MRC). MRC merupakan teknik penggabungan diversitas, dimana sinyal langsung (y_{SD}) dan sinyal-sinyal dari k *relay* ditambahkan secara bersamaan pada penerima (tujuan). Sinyal output dari MRC dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$y_D = y_{SD} + \sum_{i=1}^k y_{R_i}, \quad (10)$$

dimana y_{SD} dan y_{R_i} merupakan sinyal informasi yang dikirimkan melalui jaringan *direct* dan jaringan *multi-relay*.

Pada umumnya, kinerja jaringan kooperatif ditentukan dengan mengukur *outage probability* [19]. Jaringan dalam kondisi *outage* bisa dikategorikan dalam 2 (dua) berikut:

- Lintasan langsung dari sumber ke tujuan dan sumber ke *relay* dalam kondisi *outage*.
- *Relay* mampu menerima sinyal dan meneruskan ke tujuan, tetapi akumulasi SNR dari sumber dan *relay* pada tujuan tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan minimum *threshold*.

Kondisi *outage* dapat diartikan sebagai suatu keadaan dimana sistem gagal mengirimkan informasi dari sumber ke tujuan pada lingkungan kanal *fading*. *Outage probability* untuk kanal *Rayleigh Fading* dapat dinyatakan sebagai berikut [19]:

$$P_{\text{out}} = \int_0^{\gamma_{\text{th}}} P_{\gamma}(\gamma) d\gamma. \quad (11)$$

Outage probability juga dapat ditentukan dengan kondisi

$$P_{\text{out}} = P_r[\gamma < \gamma_{\text{th}}], \quad (12)$$

dimana γ merupakan nilai rata-rata SNR dan γ_{th} adalah nilai *threshold* SNR.

Pada penelitian ini, nilai *outage probability* tergantung protokol *relay* yang digunakan pada jaringan kooperatif, yaitu protokol QF dan AF. Nilai *outage probability* dapat ditentukan dengan menghitung nilai mutual informasi untuk masing-masing protokol. Mutual informasi untuk protokol QF pada jaringan *multi-relay* dapat dihitung dengan persamaan berikut [20], [15]:

$$I_{\text{QF}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \gamma_{\text{SD}} + \sum_{i=1}^k \frac{\gamma_{\text{SR}_i}}{1 + N_{qi}} \right), \quad (13)$$

dimana γ_{SD} adalah nilai SNR yang dihasilkan melalui lintasan langsung dari sumber ke tujuan, dan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\gamma_{\text{SD}} = \frac{P_s |h_{\text{SD}}|^2}{\sigma_{\text{SD}}^2}, \quad (14)$$

γ_{SR_i} adalah nilai rata-rata SNR yang didapatkan pada lintasan sumber ke *relay* i seperti persamaan berikut:

$$\gamma_{\text{SR}_i} = \frac{P_s |h_{\text{SR}_i}|^2}{\sigma_{\text{SR}_i}}, \quad (15)$$

σ_{SD} adalah koefisien kanal dari link langsung dan σ_{SR_i} adalah koefisien kanal dari link sumber ke *relay* i .

Maka, nilai *outage probability* untuk protokol QF pada jaringan *multi-relay* dapat dinyatakan sebagai berikut [21], [15]:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^{\text{QF}} &= P\{I_{\text{QF}} < R\} \\ &= P\left\{ \gamma^{\text{QF}} < \left(2^{(k+1)R} - 1 - \sum_{i=1}^k \frac{\gamma_{\text{SR}_i}}{1 + N_{qi}} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

dimana N_{qi} adalah *noise* kuantisasi pada *relay* yang dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$N_{qi} = \frac{\gamma_{\text{SR}_i} \sigma_{\text{SD}}^2}{\sigma_{\text{R,D}}^2}, \quad (17)$$

dimana $\sigma_{\text{R,D}}^2$ adalah koefisien kanal dari link *relay* i ke tujuan.

Untuk protokol AF, nilai rata-rata mutual informasi untuk jaringan *multi-relay* adalah:

$$I_{\text{AF}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \gamma_{\text{SD}} + \sum_{i=1}^k \gamma_{\text{SR}_i} \right), \quad (18)$$

dimana γ_{SD} adalah nilai SNR dari lintasan langsung seperti pada persamaan (14) dan

$$\gamma_{\text{SR}_i} = \frac{P_s |h_{\text{SD}} \beta_i h_{\text{SR}_i}|^2}{|h_{\text{SR}_i} \beta_i|^2 \sigma_{\text{SR}_i}^2 + \sigma_{\text{SD}}^2}. \quad (19)$$

Kemudian, nilai probabilitas *outage* untuk protokol *multi-relay* AF adalah [7, 20, 21]

$$P_{\text{out}}^{\text{AF}} = P\{I_{\text{AF}} < R\} = P\left\{ \gamma^{\text{AF}} < \left(\frac{2^{(k+1)R} - 1}{\gamma_{\text{th}}} \right) \right\}. \quad (20)$$

III. METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah analisis matematis dan simulasi komputer. Ada 2 (dua) bagian penting dari metode penelitian ini adalah sebagai berikut:

A. Analisis Efisiensi Daya

Pada sistem komunikasi nirkabel, salah satu faktor penting adalah ketersediaan daya pada perangkat sistem, khususnya peralatan bergerak. Sehingga sistem komunikasi dengan daya yang efisien menjadi fokus pengembangan saat ini. Untuk itu, penelitian ini mengkaji tingkat efisiensi daya pada jaringan *multi-relay* QF dan sebagai pembandingnya juga dianalisis pada jaringan *multi-relay* AF.

Efisiensi daya pada jaringan *multi-relay* dianalisis berdasarkan perbandingan konsumsi daya pada jaringan kooperatif *multi-relay* dengan transmisi informasi melalui lintasan langsung. Konsumsi daya dibutuhkan untuk memenuhi persyaratan *Quality of Service* (QoS) dari sebuah jaringan. Dalam hal ini, QoS diukur berdasarkan kebutuhan data rate (R) dan nilai *outage probability* (P_{out}) yang dihasilkan oleh jaringan tersebut [22]. Konsumsi daya pada sebuah jaringan juga sangat bergantung dari daya transmit dan jarak transmisinya. Maka, daya terima pada tujuan dapat dinyatakan sebagai berikut [23]:

$$P_r = P_s d^{-\alpha}, \quad (21)$$

dimana P_s adalah daya transmit dari sumber, d adalah jarak transmisi, dan α adalah eksponen *path loss*, umumnya $\alpha > 2$. Maka normalisasi daya transmit dari lintasan langsung dari sumber ke tujuan [17, 22] adalah

$$P_{\text{SD}} = d_{\text{SD}}^{\alpha} \left(\frac{2^R - 1}{P_{\text{out,SD}}} \right). \quad (22)$$

Berdasarkan nilai $P_{\text{out}}^{\text{QF}}$ pada persamaan (16) dan jarak lintasan langsung dan masing-masing *relay*, maka jumlah total normalisasi konsumsi daya dari jaringan *multi-relay* QF adalah sebagai berikut:

$$P_{\text{QF}} = \sqrt{\frac{1}{2} d_{\text{SD}}^{\alpha} \sum_{i=1}^k (d_{\text{SR}_i}^{\alpha} + d_{\text{R,D}}^{\alpha}) \left(\frac{2^{(k+1)R} - 1 - \sum_{i=1}^k \frac{\gamma_{\text{SR}_i}}{1 + N_{qi}}}{P_{\text{out}}^{\text{QF}}} \right)}. \quad (23)$$

Kemudian, menggunakan nilai $P_{\text{out}}^{\text{AF}}$ pada persamaan (20) dan jarak masing link pada jaringan, total normalisasi konsumsi daya pada jaringan *multi-relay* AF adalah

$$P_{AF} = \sqrt{\frac{1}{2} d_{SD}^\alpha \sum_{i=1}^k (d_{SR_i}^\alpha + d_{R_iD}^\alpha) (2^{(k+1)R} - 1)} P_{out}^{AF}. \quad (24)$$

Menggunakan nilai konsumsi daya pada persamaan (22)-(24), maka nilai efisiensi daya untuk jaringan *multi-relay* QF dan AF dapat dihitung sebagai berikut:

$$\varepsilon_{QF} (\%) = \frac{P_{SD} - P_{QF}}{P_{SD}} \times 100, \quad (25)$$

dan

$$\varepsilon_{AF} (\%) = \frac{P_{SD} - P_{AF}}{P_{SD}} \times 100. \quad (26)$$

B. Simulasi Komputer

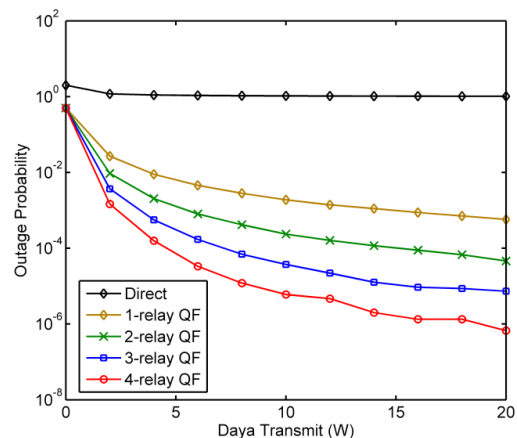
Untuk menghitung tingkat efisiensi daya dari jaringan kooperatif *multi-relay*, penelitian ini melakukan pendekatan simulasi komputer menggunakan Bahasa Pemrograman Matlab dan berdasarkan beberapa parameter dari model jaringan pada Gambar 1. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan satu sumber dimana informasi sumber (x_s) dibangkitkan secara acak sebanyak bit. Sinyal informasi dimodulasikan dengan *binary phase shift keying* (BPSK) dengan normalisasi *data rate* $R=1$ bps. Modulasi BPSK merupakan tipe modulasi yang paling sederhana untuk diterapkan pada simulasi. Penelitian ini hanya mempertimbangkan modulasi ini karena efisiensi daya yang dikaji tidak berdasarkan tipe modulasi. Kemudian, jumlah *relay* pada simulasi adalah 1- 4 *relay* untuk kedua protokol QF dan AF. Sinyal informasi dari beberapa *relay* dan dari lintasan langsung digabungkan pada tujuan dengan metode MRC. Pada simulasi, jarak sumber ke tujuan (lintasan langsung) dinyatakan dalam rasio [24], dan diset dalam range 0,1-1,0. Sedangkan posisi *relay* berada ditengah antara sumber dan tujuan dengan jarak yang berbeda. Sehingga jarak sumber ke *relay* bertambah ketika rasio jarak sumber ke tujuan bertambah. Kanal antara sumber ke *relay* dan *relay* ke tujuan dimodelkan dengan model *path loss* yang tergantung dengan jarak, dimana nilai *path loss* eksponen pada simulasi sebesar $\alpha=3$. Kemudian, parameter kanal yang dipertimbangkan pada simulasi adalah *noise* AWGN dan koefisien *fading*, dimana kedua parameter ini dibangkitkan secara acak dalam range (0, 1).

Untuk mensimulasikan nilai *outage probability* dan efisiensi daya, parameter yang penting adalah jarak sumber ke tujuan dan daya transmit. Daya transmit yang digunakan pada simulasi disesuaikan dengan objek hasil yang ingin didapatkan. Untuk nilai *outage probability*, nilai daya transmit diset antara 1-20 W untuk melihat karakteristik kinerjanya. Sedangkan untuk efisiensi daya, daya transmit yang digunakan antara 1-10 W [25], karena daya transmit $P_s > 10$ tingkat efisiensi yang dapat disediakan akan semakin kecil.

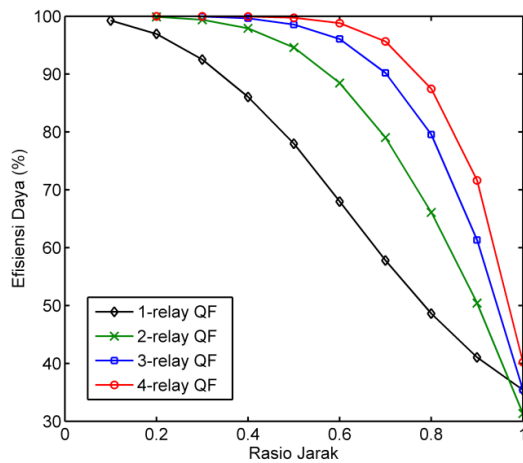
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi komputer telah dilakukan untuk mendapatkan tingkat efisiensi daya pada jaringan *multi-relay* menggunakan protokol QF sebagai fokus utama dari penelitian ini. Hasil simulasi yang didapatkan juga dibandingkan dengan jaringan *multi-relay* AF untuk mendapatkan nilai efisiensi daya yang ditingkatkan dengan menggunakan protokol QF. Namun demikian, simulasi pertama yang dilakukan adalah *outage probability* dari jaringan *multi-relay* QF karena efisiensi daya dihitung berdasarkan parameter ini. Disamping itu, simulasi *outage probability* digunakan untuk mendapatkan hubungan antara *outage probability* dan efisiensi daya pada jaringan *multi-relay* QF.

Gambar 2 merupakan hasil simulasi *outage probability* terhadap daya transmit dari jaringan *multi-relay* QF. Nilai *outage probability* semakin kecil ketika daya transmit bertambah, karena semakin besar daya transmit yang digunakan oleh sumber maka semakin baik kualitas sinyal yang diterima oleh tujuan. Sebagai contoh jaringan dengan 2-*relay* QF, ketika daya transmit 10 W, *outage probability* yang dihasilkan adalah sebesar $1,899 \times 10^{-3}$, sedangkan pada saat daya transmit 16 W, *outage probability* semakin kecil yaitu $8,74 \times 10^{-4}$. Hal ini berarti bahwa tingkat kegagalan transmisi informasi dari sumber ke tujuan akan semakin kecil. Selanjutnya, nilai *outage probability* dapat diminimalkan dengan menambah jumlah *relay* pada jaringan. *Outage probability* merupakan probabilitas dimana sistem gagal mengirim informasi ke tujuan, sehingga nilai probabilitas ini dihitung pada tujuan dengan mempertimbangkan semua komponen pada jaringan seperti yang telah dibahas pada studi pustaka. Pertambahan jumlah *relay* dalam jaringan dapat memperkecil *outage probability*. Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa *outage probability* akan semakin berkurang, sebagai contoh, pada daya transmit yang sama 10 W, *outage probability* dari jaringan *multi-relay* QF dengan 2-, 3- dan 4-*relay* QF adalah masing-masing $1,899 \times 10^{-3}$, $2,353 \times 10^{-4}$, $3,73 \times 10^{-5}$ dan $6,0 \times 10^{-6}$. Karakteristik hasil *outage probability* dapat dibuktikan bahwa tujuan menerima banyak replika



Gambar 2. Outage probability terhadap daya transmit pada sistem *multi-relay* QF



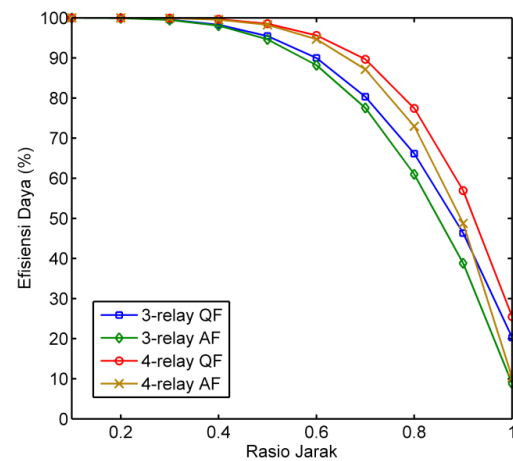
Gambar 3. Efisiensi daya terhadap rasio jarak dari sistem multi-relay QF

informasi yang sama dari beberapa *relay* dan digabungkan dengan teknik MRC, sehingga tingkat kesuksesan menerima informasi semakin tinggi. Dengan demikian, daya transmit dapat diminimalkan berdasarkan outage probability yang dihasilkan pada jaringan *multi-relay* untuk target outage tertentu, misalnya nilai $outage_{10^{-4}}$, maka jaringan dengan 3 dan 4-*relay* QF masing-masing membutuhkan daya transmit 8 W dan 5 W.

Berdasarkan hasil simulasi outage probability pada Gambar 2, nilai efisiensi daya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (25). Hasil simulasi efisiensi daya terhadap rasio jarak transmisi dapat dilihat pada Gambar 3, dimana jarak *relay* berada diantara sumber dan tujuan. Dari hasil simulasi ada dua hal yang bisa dianalisis yaitu (i) ketika jarak antara sumber ke tujuan dekat (dengan rasio kecil) menggunakan beberapa *relay* di jaringan kooperatif, tingkat efisiensi daya akan semakin tinggi bahkan bisa mencapai 100% dibandingkan dengan daya yang digunakan pada transmisi langsung. Rasio jarak pada penelitian ini adalah perbandingan jarak sumber ke *relay* (d_{SR}) dengan jarak sumber ke tujuan (d_{SD}). Sedangkan rasio jarak *relay* ke tujuan (d_{RD}) adalah $1 - d_{SR}$. Kemudian efisiensi daya akan semakin berkurang ketika rasio jarak transmisi dari sumber ke tujuan semakin besar. Hal ini secara konsep komunikasi adalah *valid*, karena tingkat konsumsi daya akan semakin besar ketika jarak transmisinya bertambah.

Dengan demikian, efisiensi daya akan semakin berkurang; dan (ii) pada jaringan *multi-relay*, penambahan jumlah *relay* dapat meningkatkan efisiensi daya. Sebagai contoh, pada rasio jarak sumber ke tujuan sebesar 0,6 efisiensi daya untuk 1-*relay* hingga 4-*relay* QF adalah masing-masing 58,76%, 79,96%, 91,12% dan 96,21%. Dari hasil simulasi juga didapatkan bahwa peningkatan efisiensi daya tidak begitu signifikan untuk jumlah *relay* lebih dari 3, misalnya 4-*relay* QF pada jaringan hanya bertambah 5,09% dari jumlah 3-*relay* QF.

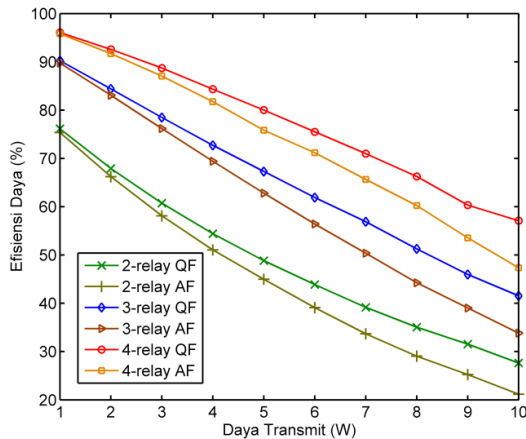
Protokol *relay* merupakan mekanisme inti pada jaringan kooperatif, baik *single-relay* maupun *multi-relay*. Pada simulasi, penelitian ini juga membandingkan tingkat efisiensi daya jaringan *multi-relay* protokol QF dengan



Gambar 4. Perbandingan efisiensi daya terhadap rasio jarak antara sistem multi-relay QF dan AF

protokol AF, dan dihitung berdasarkan persamaan (25) dan (26). Perbandingan hanya dilakukan untuk protokol QF dan AF, karena kedua protokol ini bisa digunakan pada *relay* analog dan tidak butuh pengkodean (encoding) dan pendkodean (*decoding*) pada *relay* seperti protokol DF. Gambar 4 merupakan hasil simulasi perbandingan efisiensi daya pada jaringan *multi-relay* QF dan AF dengan 3- dan 4-*relay*. Secara umum, karakteristik efisiensi daya sama dengan pada Gambar 3, tetapi efisiensi daya jaringan *multi-relay* QF lebih tinggi dibandingkan dengan jaringan *multi-relay* AF. Namun demikian, pada jarak transmisi dengan rasio 0,5, efisiensi daya untuk kedua protokol QF dan AF adalah hampir sama. Efisiensi daya QF lebih tinggi dibanding protokol AF ketika rasio jarak transmisi $> 0,5$. Sebagai contoh, pada rasio jarak 0,8, efisiensi daya untuk 3- dan 4-*relay* QF adalah masing-masing 66,13% dan 77,43%, sedangkan untuk 3- dan 4-*relay* AF adalah masing-masing 60,98% dan 72,95%. Adapun perbaikan efisiensi daya yang dihasilkan oleh *multi-relay* QF adalah 5,15% untuk jaringan 3-*relay* dan 4,48% untuk jaringan 4-*relay*. Selanjutnya pada rasio jarak maksimum 1,0, perbaikan efisiensi jaringan 4-*relay* QF lebih signifikan adalah sebesar 15,13% dibandingkan dengan jaringan 4-*relay* AF. Hasil ini menunjukkan bahwa penguatan *relay* (β_i) pada protokol AF masih efektif untuk menjaga efisiensi daya pada jaringan hingga rasio jarak transmisi $\leq 0,5$. Ketika rasio jarak $> 0,5$, dengan posisi *relay* ditengah antara sumber dan tujuan, maka jarak sumber dengan *relay* akan semakin jauh sehingga pengaruh *noise* dan *fading* akan semakin besar pada *relay* AF menyebabkan peningkatan konsumsi daya. Sebaliknya, proses kuantisasi sinyal pada *relay* QF mengkonsumsikan daya lebih kecil karena pengaruh *noise* dan *fading* bisa dikurangi dengan proses ini.

Perbandingan efisiensi daya terhadap daya transmit pada jaringan *multi-relay* protokol QF dan AF juga telah disimulasikan, dimana hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5. Secara umum, efisiensi daya kedua protokol *relay* menunjukkan bahwa efisiensi daya berkurang ketika daya transmit bertambah. Indikasi ini merupakan fenomena



Gambar 5. Perbandingan efisiensi daya terhadap daya transmit antara sistem multi-relay QF dan AF

umum pada setiap skema transmisi yang menunjukkan penurunan tingkat efisiensi daya [26]. Kemudian, jumlah *relay* yang digunakan mempengaruhi tingkat efisiensi daya pada jaringan yaitu semakin banyak *relay* yang digunakan pada jaringan maka efisiensi daya yang didapatkan akan semakin tinggi. Sebagai contoh, ketika daya transmit sebesar 6 W, tingkat efisiensi daya dari jaringan 2 hingga 4-*relay* QF adalah masing-masing sebesar 43,43%, 61,81% dan 75,25%. Sedangkan perbaikan efisiensi daya yang dihasilkan oleh protokol QF adalah rata-rata 5% dibandingkan dengan protokol AF.

V. KESIMPULAN

Paper ini telah menganalisis tingkat efisiensi daya pada jaringan kooperatif *multi-relay* menggunakan protokol *quantize and forward* (QF). Model jaringan *multi-relay* untuk protokol QF dan *amplify and forward* (AF) telah dipaparkan dengan analisis matematis dari parameter-parameter sumber, *relay* dan tujuan. Efisiensi daya pada penelitian ini dihitung berdasarkan nilai *outage probability*, rasio jarak lintasan langsung dan daya transmit. Untuk mengevaluasi efisiensi daya, simulasi komputer telah dilakukan dengan mempertimbangkan parameter-parameter jaringan untuk protokol QF dan AF. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kinerja *outage* dari jaringan *multi-relay* QF semakin kecil ketika jumlah *relay* yang digunakan pada jaringan bertambah. Efisiensi daya dari jaringan *multi-relay* QF berkurang ketika rasio jarak lintasan langsung bertambah jauh. Selanjutnya, efisiensi daya *multi-relay* QF dapat ditingkatkan dengan menambah *relay* yang digunakan pada jaringan. Kemudian, simulasi perbandingan efisiensi daya protokol QF dan AF pada jaringan *multi-relay* juga dilakukan, dimana efisiensi daya QF lebih tinggi dibandingkan dengan protokol AF dengan rasio jarak transmisi $> 0,5$. Perbandingan efisiensi daya QF dan AF untuk variable daya transmit juga telah dievaluasi, semakin besar daya transmit yang digunakan maka semakin kecil efisiensi daya yang dapat disediakan pada jaringan. Hasil simulasi ini juga menunjukkan

bahwa efisiensi daya jaringan *multi-relay* QF lebih tinggi dibandingkan dengan protokol AF. Dengan demikian, jaringan kooperatif *multi-relay* QF dapat menyediakan beberapa keuntungan dibandingkan dengan protokol AF yaitu: dapat digunakan pada *relay* digital, tingkat kompleksitas rendah, kinerja yang baik, dan efisiensi daya yang tinggi. Untuk ke depan, metode power control pada protokol QF dapat dikaji lebih lanjut sehingga tingkat efisiensi daya yang dapat disediakan oleh jaringan akan lebih optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian Hibah Tim Pascasarjana yang berjudul “Green Communications Pada Sistem Komunikasi Kooperatif Nirkabel” yang didanai oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Tahun 2017.

REFERENSI

- [1] M. B. Johnson, “Effectively integrating broadband communications within wireless multimedia systems,” in *Proc. IEEE international Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, 2012, pp. 1-5.
- [2] F. Chuan and L. Anqing, “Key techniques in green communication,” in *Proc. International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, 2011, pp. 1360-1363.
- [3] M. Agiwal, A. Roy and N. Saxena, “Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey,” in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, thirdquarter 2016.
- [4] S. Wang and J. Nie, “Energy Efficiency Optimization of Cooperation Communication in Wireless Sensor Networks,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 1-8, 2010.
- [5] W.B. Daniel, W. F. Keith, M.C. Amanda, “MIMO Wireless Communication,” *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 97-126, 2005.
- [6] S. Ghacham, G. Aniba, Z. Guennoun, H. Chafnaji, “Cooperative networks: Overview of State-of-the-art and Trends Toward Green Cooperative Networks,” in *Proc. International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, 2012, pp. 997-1001.
- [7] J. N. Laneman, C. Tse, G.W. Wornell, “Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, 2004.
- [8] A. Sendonaris, E. Erkip, B. Aazhang, “User Cooperation Diversity. Part I. System Description,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927-1938, 2003.
- [9] C. Conne and I. Kim, “Outage Probability of Multi-Hop Amplify-and-Forward Relay Systems,” *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 9, no. 3, pp. 1139-1149, 2010.
- [10] Nasaruddin, Melinda, Elizar, “Optimized Power Allocation for Cooperative Amplifyand-Forward with Convolutional Codes,” *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, no. 8, pp. 6243-6253, 2014.
- [11] A.S. Avestimehr and D.N.C. Tse, “Outage Capacity of the Fading

- Relay Channel in the Low SNR Regime*,” IEEE Transaction on Information Theory, vol. 53, no. 4, pp. 1401-1415, 2007.
- [12] I. Avram, N. Aerts, M. Moeneclaey, “A Novel Quantize-and-Forward Cooperative System: Channel Parameter Estimation Techniques,” in Proc. *Future Network and Mobile Summit Conference*, 2010.
- [13] A.H. Mohammed, B. Dai, B. Huang, M. Azhar, “A Survey and Tutorial of Wireless *Relay* Network Protokols based on Network Coding,” Elsevier Journal Network and Computer Applications, vol. 36, no. 2, pp. 593-610, 2013.
- [14] X. Bao and J. Li, “Efficient Message *Relaying* for Wireless User Cooperation: DecodeAmplify-Forward (DAF) and Hybrid DAF and Coded-Cooperation,” IEEE Trans. Wireless Commun, vol. 6, no. 11, pp. 3975–3984, 2007.
- [15] Nasaruddin, Yusnidar, Elizar, “Performance Evaluation of Amplify-Quantize and Forward Protocol for Multi-*relay* Cooperative Networks,” The ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications, vol. 15, no. 1, pp. 8-18, 2017.
- [16] K. El-Darymli, “Amplify-and-Forward cooperative *relaying* for a linear Wireless Sensor Network,” in Proc. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2010, pp. 106-112.
- [17] Z. Sheng, B. J. Ko and K. K. Leung, “Power Efficient Decode-and-Forward Cooperative *Relaying*,” in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 1, no. 5, pp. 444-447, October 2012.
- [18] Nasaruddin and R. Kurnia, “Hamming Coding for Multi-*relay* Cooperative Quantize and Forward Networks,” in Proc. *IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, pp. 315-319, 2016.
- [19] M.O. Hasna and M.S. Alouini, “Harmonic mean and end-to-end performance of transmission system with *relays*,” IEEE Trans. Communications, vol 52, no. 1, pp. 130-135, Jan. 2004.
- [20] A. Sendonaris, E. Erkip and B. Aazhang, “User cooperation diversity. part II. implementation aspects and performance analysis,” IEEE Trans. Communications, vol. 51, no. 11, pp. 1939-1948, Nov. 2003.
- [21] H.H. Sneessens, L. Vandendorpe and J.N. Laneman, “Adaptive compress-and-forward *relaying* in fading environments with or without wyner-ziv coding,” in Proc. *IEEE ICC* 2009, pp.1-5, 2009.
- [22] Z. Sheng and C. H. Liu, *Energy Efficient Cooperative Wireless Communication and Networks*, Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [23] E.E.B. Adam, L. Yu, R. Haruna, and A.A. Mohammed, “Performance Analysis of Best *Relaying* Protocol Selection with Interferences at *Relays*,” Radioengineering, vol. 23, no. 2, pp. 570-577, 2014.
- [24] T. Yamada and T. Ohtsuki, “High Power Efficiency Transmission Based on Game Theory for AF Cooperative Communication,” in Proc. *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Quebec City, QC, 2012, pp. 1-5.
- [25] Z. Hadzi-Velkov, N. Zlatanov, T.Q. Duong and R. Schober, “Rate Maximization of Decode-and-Forward *Relaying* Systems With RF Energy Harvesting,” in IEEE Communications Letters, vol. 19, no. 12, pp. 2290-2293, Dec. 2015.
- [26] J. Akhtman and L. Hanzo, “Power Versus Bandwidth-Efficiency in Wireless Communications: The Economic Perspective,” in Proc. *IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*, Anchorage, AK, 2009, pp. 1-5.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

