

KAPASITAS SISTEM NOMA-VLC DENGAN PERUBAHAN METODE ALOKASI DAYA PADA KANAL PROPAGASI NLOS

THE CAPACITY OF NOMA-VLC SYSTEM WITH VARYING POWER ALLOCATION METHODS UNDER NLOS PROPAGATION CHANNELS

Rana Ayunda Salsabila¹, Brian Pamukti, S.T., M.T.², Dr. Nachwan Mufti Adriansyah, S.T., M.T.³

^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung.

¹ranaayunda@student.telkomuniversity.ac.id, ²brianpam@telkomuniversity.ac.id,

³nachwannma@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Salah satu kekurangan dalam sistem *visible light communication* (VLC) yaitu sempitnya *bandwidth* modulasi yang dapat mengurangi kapasitas yang dicapai sistem. Pada penelitian ini, diimplementasikan *non-orthogonal multiple access* (NOMA) untuk meningkatkan kapasitas sistem. NOMA merupakan suatu teknik penggabungan beberapa sinyal yang dilakukan berdasarkan daya tiap *user*. Dalam sistem NOMA, terdapat *superposition coding* pada sisi pengirim dan *successive interference cancellation* (SIC) di sisi penerima.

Tugas Akhir ini membandingkan dua metode alokasi daya, *gain ratio power allocation* (GRPA) yang mempertimbangkan perbedaan kondisi kanal setiap *user* dengan metode alokasi daya *static power allocation* (SPA). Selain itu, dilakukan juga penelitian tentang pengaruh jumlah residu yang terjadi pada proses SIC dan pertambahan jumlah *user* terhadap performansi sistem dengan kondisi kanal NLOS.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan alokasi daya GRPA lebih efektif digunakan dalam sistem NOMA-VLC dibandingkan dengan SPA. Dalam simulasi diperoleh bahwa penggunaan GRPA dapat meningkatkan kapasitas hingga 4.323% dari penerapan alokasi daya SPA. Selain itu, bertambahnya jumlah residu yang terjadi dalam proses SIC dan semakin banyak jumlah *user* dalam sistem NOMA-VLC berdampak pada penurunan performansi sistem.

Kata Kunci: VLC, NOMA, NLOS, Alokasi Daya, SIC

Abstract

One of the drawback in visible light communication (VLC) systems is the narrow modulation bandwidth that decreasing achievable capacity system. In this Final Project, non-orthogonal multiple access is implemented to increase capacity system. NOMA is a multiple access technique that multiplexed some *user's* signals based on power domain. In NOMA systems, there is superposition coding at the transmitter side and successive interference cancellation (SIC) is implemented at the receiver side.

This Final Project comparing two power allocation methods, there are gain ratio power allocation (GRPA) which considering the differences between channel gain for each *user* and static power allocation (SPA). This Final Project also do some research about the effect of total residual interference that may exist during successive interference cancellation (SIC) process and the effect of increasing number of *user* in system performance with NLOS channel propagation.

The result of this research shows that the implementation of GRPA is more effective to use in NOMA-VLC system rather than SPA. By implemented GRPA, the achievable capacity can increased up to 4.323% from the implementation of SPA in the system. Moreover, the increasing of residual interference that may exist during SIC process and total number of *user* give the effect of degrading system performance.

Keywords: VLC, NOMA, NLOS, Power Allocation, SIC

1. Pendahuluan

Kebutuhan akses komunikasi yang lebih cepat dan efisien menjadi salah satu harapan di bidang teknologi telekomunikasi. Radio frekuensi (RF) saat ini digunakan untuk dapat berkomunikasi dikarenakan kecepatan pengiriman yang tinggi sehingga mendukung komunikasi *broadband*. Namun keterbatasan spektrum frekuensi menjadi kekurangan dalam teknologi ini [1]. *Visible light communication* (VLC) merupakan suatu teknologi sistem komunikasi yang memanfaatkan cahaya tampak sebagai media transmisi dengan memanfaatkan panjang gelombang sebesar 380-750 nm. Hal ini menjadikan VLC sebagai teknologi yang mumpuni dalam pengiriman sinyal informasi berkecepatan tinggi dengan kapasitas 10.000 kali lebih besar dibandingkan teknologi RF [2]. Namun, sempitnya *bandwidth* modulasi menjadi permasalahan utama pada VLC yang mengakibatkan berkurangnya kapasitas yang dicapai sistem.

Pada penelitian [3], *orthogonal frequency division multiplexing* (OFDM) dan *orthogonal frequency division*

multiple access (OFDMA) diimplementasikan pada VLC karena mampu meningkatkan kapasitas. Namun, kedua teknik ini tidak dapat langsung diaplikasikan pada VLC karena keterbatasan sinyal modulasi yang hanya dapat memodulasikan sinyal *real* dan positif. Untuk itu pada penelitian [4], *DC-biasing* dan teknik *clipping* diimplementasikan pada OFDM dan OFDMA VLC. Namun kedua teknik ini berdampak pada penurunan efisiensi spektral frekuensi. Pada penelitian [5], [6], *non-orthogonal multiple access* (NOMA) diimplementasikan pada sistem *downlink* VLC. Dilakukan perbandingan beberapa alokasi daya optimal untuk meningkatkan kapasitas diantaranya *static power allocation* (SPA), *gain ratio power allocation* (GRPA), dan *multi factor power allocation* (MFOPA). Didapatkan hasil bahwa perubahan alokasi daya berdampak pada kapasitas yang dicapai oleh sistem NOMA-VLC. Pada NOMA, penggabungan beberapa *user* berdasarkan kepada daya masing-masing *user*, sehingga *user* dengan domain waktu dan frekuensi yang berbeda dapat digabungkan secara bersamaan dan dapat menghemat spectral frekuensi. Terdapat *superposition coding* di sisi pengirim dan diterapkan *successive interference cancellation* (SIC) di sisi penerima dalam sistem NOMA-VLC.

Berdasarkan penelitian NOMA-VLC sebelumnya, penelitian dilakukan dengan mengasumsikan kondisi kanal *user* yaitu *line of sight* (LOS), pada penelitian ini diterapkan NOMA pada sistem *downlink* VLC dengan karakteristik kanal berupa *non-direct line of sight* (NLOS). Penelitian ini membahas tentang perbandingan metode alokasi daya SPA dan GRPA untuk diterapkan dalam sistem NOMA-VLC sehingga menghasilkan performansi sistem yang lebih optimal. Selain itu dilakukan penelitian terhadap pengaruh residu yang terjadi dalam proses SIC atau pembatalan sinyal *user* terhadap kapasitas yang dapat dicapai masing-masing *user*.

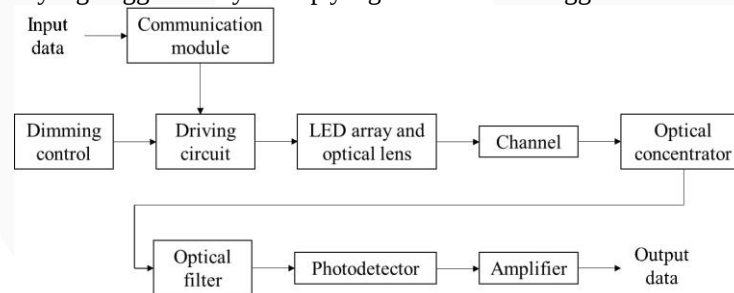
Penelitian ini dilakukan pada ruangan tertutup berukuran 5 x 5 x 3 meter dengan menggunakan satu buah LED yang diletakkan di bagian atas ruangan berposisi (2.5, 2.5, 3). Penelitian dilakukan dengan menggunakan empat *user* dengan karakteristik kanal yang berbeda. Dari hasil penelitian yang dilakukan melalui simulasi dilakukan analisis pada perbandingan alokasi daya terhadap daya terima dan kapasitas sistem.

2. Dasar Teori dan Metodologi

2.1 Visible Light Communication (VLC)

Visible light communication (VLC) merupakan suatu sistem komunikasi nirkabel yang menggunakan cahaya tampak sebagai sinyal *carrier* pada pengiriman data. Rentang spektrum cahaya tampak dalam spektrum gelombang elektromagnetik yang dapat digunakan pada sistem VLC yakni antara 400 THz – 700 THz dengan nilai panjang gelombang yaitu 380 nm – 750 nm [7].

Dalam sistem VLC, *light emitting diode* (LED) selain sebagai penerangan juga digunakan sebagai sumber cahaya yang terletak pada sisi *transmitter* dengan cahaya yang berasal dari LED merupakan sinyal *carrier*. Sementara, terdapat *photodetector* pada sisi *receiver* sistem [8]. Skema pengiriman data pada sistem VLC secara umum ditunjukkan pada Gambar 1. Penggunaan LED sebagai sumber cahaya dalam teknologi VLC memiliki beberapa keuntungan jika dibandingkan dengan lampu lain seperti lampu neon dan lampu pijar diantaranya yaitu kecepatan pengiriman data yang tinggi dan daya hidup yang tahan lama sehingga lebih hemat biaya dan energi [2].



Gambar 1. Blok diagram VLC.

2.2 Kanal Transmisi

Dalam VLC, terdapat dua pemodelan kanal yaitu *line of sight* (LOS) dan *non-line of sight* (NLOS) [9]. Model kanal propagasi *line of sight* (LOS) memungkinkan pengiriman data tanpa adanya penghalang.

2.2.1 Line of Sight (LOS)

Model kanal ini merupakan permoodelan kanal yang sangat baik digunakan dalam penelitian teknologi VLC dikarenakan presentasi kehandalan pengiriman data dapat terjamin dan energi yang berdifusi pada komponen lebih rendah dibandingkan NLOS. Namun model kanal ini sangat jarang ditemukan pada realisasi ruangan yang nyata. *Channel gain* pada model kanal propagasi LOS dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$h_{los} = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), \quad (1)$$

dengan A_r , d , ϕ , ψ masing-masing merupakan area *photodetector*, jarak antara LED dengan *receiver*, sudut penyinaran pada *transmitter*, dan sudut terima pada *receiver*, $T_s(\psi)$ yaitu penguatan pada filter optik, $g(\psi)$ adalah konsentrator optik, dan m yaitu emisi lambertian yang dapat dituliskan dengan

$$m = \frac{\ln 2}{\ln(\cos \phi_{1/2})}, \quad (2)$$

$\phi_{1/2}$ yaitu *semi-angle* atau *full width half maximum* (FWHM) pada LED.

2.2.2 Non-Line of Sight (NLOS)

Pada kanal propagasi *non-line of sight* (NLOS), nilai optikal *path loss* atau redaman yang dihasilkan lebih kompleks dikarenakan beberapa faktor seperti dimensi ruangan, pantulan yang berasal dari langit-langit, dinding dan penyerapan cahaya oleh benda-benda yang ada di dalam ruangan [9].

Dalam sistem VLC, reflektor merupakan suatu permukaan yang dapat memantulkan gelombang cahaya. Reflektor digunakan untuk memaksimalkan iluminasi gelombang cahaya yang sampai pada *receiver*. *Channel gain* yang didapatkan pada kanal propagasi ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$h_{ref} = \frac{A_r(m+1)}{2(\pi d_1 d_2)^2} \rho A_{ref} \cos^m(\phi) \cos(\alpha) \cos(\beta) T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), \quad (3)$$

dengan d_1 merupakan jarak antara lampu dengan reflektor atau cermin, d_2 merupakan jarak antara reflektor dengan *receiver*, A_{ref} merupakan luas area reflektor, α yaitu sudut terima pada reflektor, dan β yaitu sudut pantul reflektor terhadap *user*. *Receiver* yang terkena efek reflektor mendapatkan sinyal cahaya dari dua arah kanal yaitu kanal LOS dengan cahaya langsung terdistribusi ke *receiver*, sehingga daya terima untuk *user* dengan kondisi kanal reflektor atau dapat ditulis dengan

$$P_r = (P_t \cdot h_{los}) + (P_t \cdot h_{ref}), \quad (4)$$

dengan P_t merupakan daya kirim pada LED. Selain itu, pada skenario ruangan umumnya, terdapat benda-benda yang dapat menghalangi dan mengabsorbsikan cahaya. Hal ini menyebabkan *user* yang berada pada daerah yang terhalang oleh suatu benda terkena efek *shadowing*. *Channel gain* yang dapat diperoleh pada *user* ini dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$h_{shd} = \frac{A_r(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\phi) O_{shd} T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi), \quad (5)$$

dengan O_{shd} merupakan probabilitas cahaya yang berhasil sampai pada *user* setelah menembus penghalang.

2.3 Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)

Non-orthogonal multiple access (NOMA) merupakan suatu teknik yang memungkinkan beberapa *receiver* dapat mengakses satu *transmitter* maupun sebaliknya dengan menggabungkan satu atau beberapa sinyal pada domain daya, code, dan lain sebagainya. Pada *power domain* NOMA, satu atau lebih sinyal informasi dapat dikirimkan menggunakan satu *subcarrier* yang sama pada tingkat daya kirim yang berbeda bergantung pada kondisi kanal dengan domain waktu dan frekuensi yang berbeda. Terdapat *superposition coding* di sisi *transmitter* dan di sisi *receiver* diterapkan *successive interference cancellation* (SIC) sebelum proses *decoding* sinyal untuk memisahkan *multi-signal* yang ditransmisikan. Saat ini, penelitian mengenai NOMA mulai dilakukan karena dapat menjadi kandidat yang menjanjikan untuk teknologi komunikasi 5G [10][11].

Dalam sistem *downlink* VLC, penerapan NOMA sangat efisien digunakan dalam penggabungan jumlah *user* yang sedikit, sesuai dengan karakteristik LED sebagai sumber cahaya yang berperan sebagai *small cell* untuk mengakomodasi jumlah *user* yang sedikit di dalam ruangan. Selain itu, dengan menggunakan NOMA, LED dapat mengirimkan sinyal real dan sinyal positif [5]. Pada sisi *transmitter*, sinyal ditransmisikan menggunakan *superposition coding* yang dapat dituliskan dengan

$$x = \sum_{i=1}^N P_i s_i, \quad (6)$$

s_i merupakan sinyal kirim masing-masing *user*. Sementara di sisi *photodetector* yang berfungsi sebagai penerima sinyal, sinyal dideteksi berdasarkan daya terima yang secara matematis dapat dituliskan

$$y_k = h_k \sum_{i=1}^N P_i s_i + n_k, \quad (7)$$

dengan h_k merupakan *channel gain* dan n_k merupakan *zero-mean additive white gaussian noise* (AWGN). Interferensi pada *multi-user* dapat diatasi dengan adanya SIC dengan LED mengalokasikan daya transmisi yang lebih tinggi untuk *user* dengan kondisi kanal yang paling buruk.

2.4 Multi-user Power Allocation

Berdasarkan prinsip NOMA, daya optik yang dipancarkan dari LED dibagikan sesuai alokasi daya berdasarkan kondisi *channel gain* setiap *user*. Pada kondisi kanal yang dapat dituliskan sebagai berikut [8]:

$$\alpha_1 \cdot P_T > \alpha_k \cdot P_T > \dots > \alpha_n \cdot P_T > \alpha_N \cdot P_T, s. t. \sum_{k=1}^N \alpha_k = 1, \quad (8)$$

dengan N merupakan jumlah *user* yang berada dalam jangkauan 1 LED. Berdasarkan (8), maka α atau faktor alokasi daya untuk tiap *user* bernilai

$$0 < \alpha < 1. \quad (9)$$

Terdapat beberapa pemodelan metode *multi-user* power allocation, diantaranya *static power allocation* (SPA) dan *gain ratio power allocation* (GRPA). Pada SPA pengalokasian daya diberikan secara acak untuk setiap *user* yang berada dalam satu cakupan sistem. Sedangkan pada GRPA, pengalokasian daya bergantung kepada nilai *channel gain* yang diperoleh tiap *user*. Pada empat *user* dengan metode alokasi daya GRPA, maka alokasi daya yang didapatkan dengan perhitungan berikut:

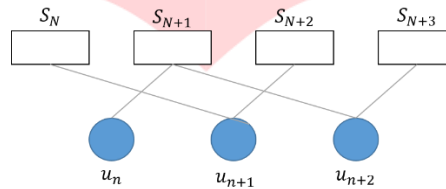
$$\alpha_1 = \frac{h_2 \cdot h_3 \cdot h_4}{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 + h_1 \cdot h_2 \cdot h_4 + h_1 \cdot h_3 \cdot h_4 + h_2 \cdot h_3 \cdot h_4}, \quad (10)$$

$$\alpha_2 = \frac{h_1 \cdot h_3 \cdot h_4}{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 + h_1 \cdot h_2 \cdot h_4 + h_1 \cdot h_3 \cdot h_4 + h_2 \cdot h_3 \cdot h_4}, \quad (11)$$

$$\alpha_3 = \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot h_4}{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 + h_1 \cdot h_2 \cdot h_4 + h_1 \cdot h_3 \cdot h_4 + h_2 \cdot h_3 \cdot h_4}, \quad (12)$$

$$\alpha_4 = \frac{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3}{h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 + h_1 \cdot h_2 \cdot h_4 + h_1 \cdot h_3 \cdot h_4 + h_2 \cdot h_3 \cdot h_4}. \quad (13)$$

2.5 Successive Interference Cancellation (SIC)



Gambar 2. Representasi SIC dalam grafik bipartit.

Pada NOMA-VLC, proses pengiriman informasi dilakukan pada beberapa *user* yang berada pada domain waktu dan frekuensi berbeda sehingga menyebabkan terjadinya interferensi antar *user*. *Successive interference cancellation* (SIC) merupakan suatu teknik *multi-user detection* pada sisi *receiver* untuk memisahkan sinyal *user* ke- n dari sinyal kirim. SIC membatalkan sinyal yang lebih kuat pada suatu *user*, sehingga *user* ke- n mendapatkan sinyalnya sendiri untuk selanjutnya dapat dilakukan proses pengkodean kembali sinyal [12].

Gambar 2 menunjukkan model SIC pada grafik bipartit dengan S_N merupakan *slot* sedangkan U_n adalah sinyal *user*. Pada proses SIC, sinyal yang memiliki alokasi daya yang lebih besar maka akan di gagalkan untuk dapat mengisi *slot*.

2.6 Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR)

Signal to interference plus noise ratio (SINR) merupakan nilai perbandingan antara daya sinyal yang ditransmisikan terhadap interferensi dan *noise* terjadi dalam sistem. Semakin besarnya nilai *noise* N_p dan interferensi I_p yang terjadi dalam pengiriman sinyal maka semakin kecil sinyal yang berhasil diterima S_p [9]. SINR dapat dinyatakan dengan perumusan

$$SINR = \frac{S_p}{I_p + N_p}. \quad (14)$$

Dalam NOMA-VLC, dengan diterapkan proses SIC pada sisi *receiver*, apabila proses tersebut berjalan ranpa residu yang berarti seluruh sinyal *user* lain dengan alokasi daya yang lebih besar berhasil dibatalkan karena sinyal tersebut dianggap sebagai interferensi atau disebut dengan *perfect* SIC dengan SINR untuk *user* ke- n dapat dituliskan dengan

$$SINR_n = \frac{h_n^2 \cdot p_n}{h_n^2 \cdot \sum_{k=n+1}^N p_k + \sigma^2}, \quad (15)$$

h_n, p_n , dan σ^2 masing-masing merupakan *channel gain*, alokasi daya, dan total *noise*. Sedangkan apabila proses SIC menghasilkan residu atau disebut dengan *imperfect* SIC, SINR yang diperoleh didapatkan dari persamaan

$$SINR_n = \frac{h_n^2 \cdot p_n}{h_n^2 \cdot \sum_{k=n+1}^N p_k + \varepsilon \cdot h_n^2 \cdot \sum_{k=1}^{n-1} p_k + \sigma^2}, \quad (16)$$

dengan ε merupakan *interference cancellation factor* atau persentase residu dari proses SIC [6].

2.7 Kapasitas

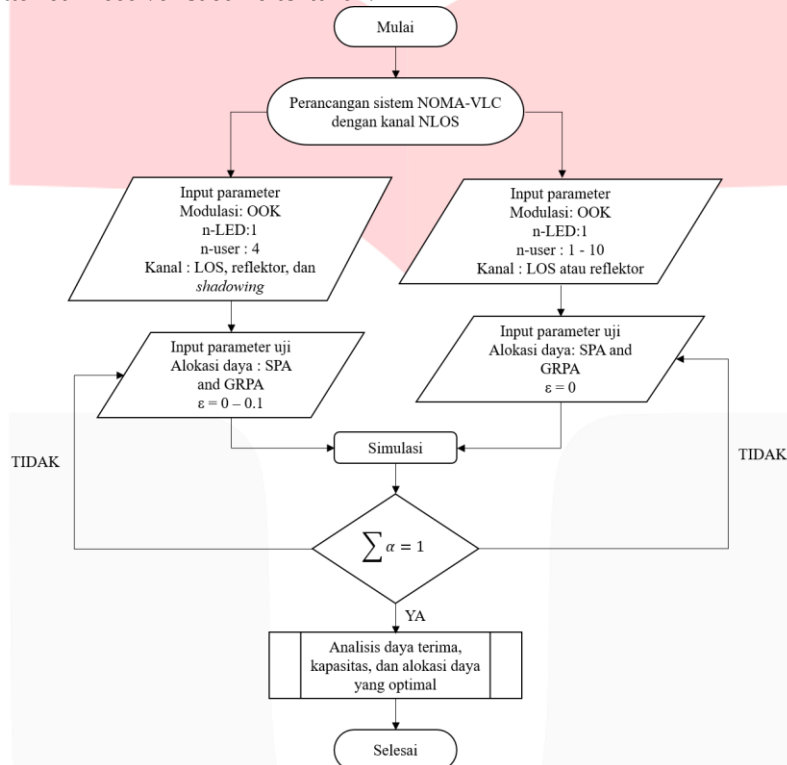
Kapasitas merupakan salah satu parameter yang menyatakan kecepatan bit per detik maksimum yang dikirimkan dari *transmitter* untuk tiap *receiver* dalam proses pengiriman data. Kapasitas dapat diperoleh dari menggunakan Teorema Shannon dengan persamaan sebagai berikut:

$$r = B \cdot \log_2(1 + SINR), \quad (17)$$

dengan B merupakan *bandwidth* dalam sistem VLC.

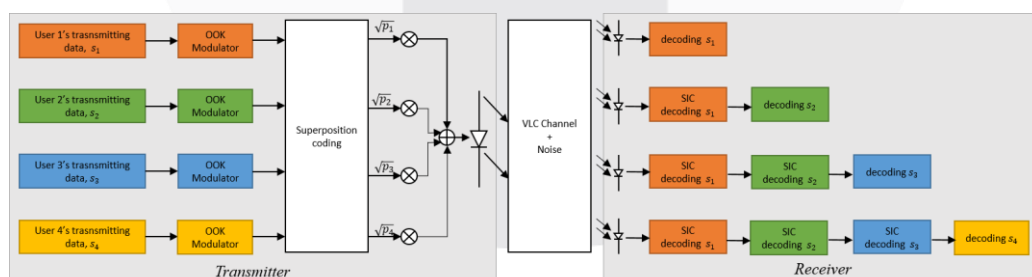
3. Pembahasan

Tugas Akhir ini dilakukan dalam beberapa tahapan, dimulai dengan perancangan sistem NOMA-VLC dengan kanal NLOS dan melakukan simulasi berdasarkan parameter yang sudah ditentukan. Dilakukan analisis alokasi daya optimal melalui daya terima dan kapasitas yang diperoleh dari perbandingan dua metode alokasi daya yaitu SPA dan GRPA menggunakan *software* simulasi komputer dengan mengasumsikan ruangan tertutup kedap cahaya berukuran 5 x 5 x 3 m. menggunakan 1 lampu LED, dan jumlah *user* sebanyak 4 dan 10 dengan jarak antar *transmitter* dan *receiver* sudah ditentukan.



Gambar 3. Diagram alir penelitian sistem NOMA-VLC.

3.1 Blok Diagram Sistem



Gambar 4. Skema NOMA-VLC dengan empat *user*.

Pada blok *transmitter* sistem NOMA-VLC, pengiriman satu atau lebih sinyal digabungkan menggunakan metode *superposition coding* serta terdapat pengalokasian daya dengan mempertimbangkan kondisi kanal masing-masing *user*. Gambar 4 menunjukkan skema NOMA-VLC pada empat *user* dengan kondisi *channel gain* $h_1 < h_2 < h_3 < h_4$ sehingga diperoleh alokasi daya untuk tiap *user* $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4$. Sedangkan pada blok *receiver*, sinyal kirim diterima oleh photodetector untuk selanjutnya diproses menggunakan penerapan SIC untuk memisahkan sinyal *user* ke- n dari sinyal *user* lain. *User* dengan kondisi kanal yang paling baik memiliki proses SIC yang lebih kompleks dikarenakan pengaruh alokasi daya.

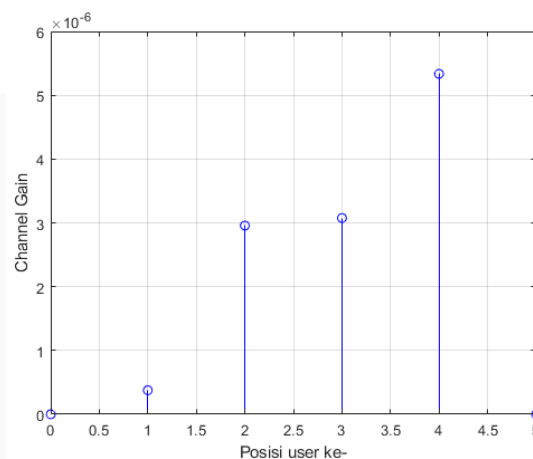
3.2 Desain Simulasi

Dalam pembangunan sistem NOMA-VLC diberikan beberapa parameter *input* pada sistem yang mempengaruhi hasil dari Tugas Akhir yang dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter *input* simulasi.

Parameter	Nilai	
Ruangan	Ukuran	5 x 5 x 3 m
Sumber	Jenis	Lampu LED
	Jumlah	1
	Daya	7 Watt
	Lokasi	(2.5 , 2.5, 3) m
	Bandwidth	20 MHz
Photodetector	Area Detektor	1 cm ²
	FOV	70
	Responsivitas	0.55
	Jumlah user	4 dan 10
Faktor <i>interference cancellation</i>	Persentase	0-10 %

3.3 Hasil dan Analisis



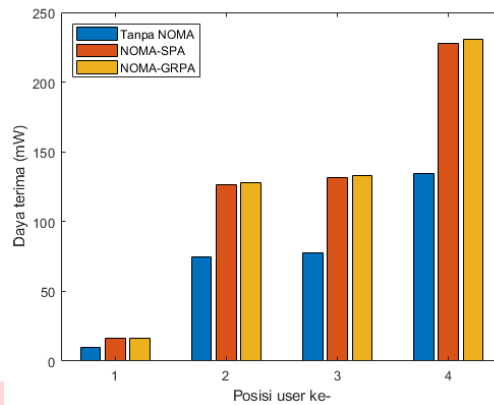
Gambar 5. *Channel gain* yang diperoleh tiap *user* pada skenario 4 posisi *user*.

Proses pengalokasian daya pada *non-orthogonal multiple access* (NOMA) dipengaruhi oleh kondisi kanal yang dapat dilihat dari nilai *channel gain* pada masing-masing *user*. Dengan melakukan simulasi terhadap empat *user* dengan karakteristik kanal dapat dilihat pada Tabel 2 diperoleh *channel gain* sebesar 3.7661×10^{-7} pada *user* ke-1, 2.9564×10^{-6} pada *user* ke-2, 2.9564×10^{-6} pada *user* ke-3, dan 5.3357×10^{-6} pada *user* ke-4 yang ditampilkan pada Gambar 5.

Tabel 2. Skenario 4 *user*.

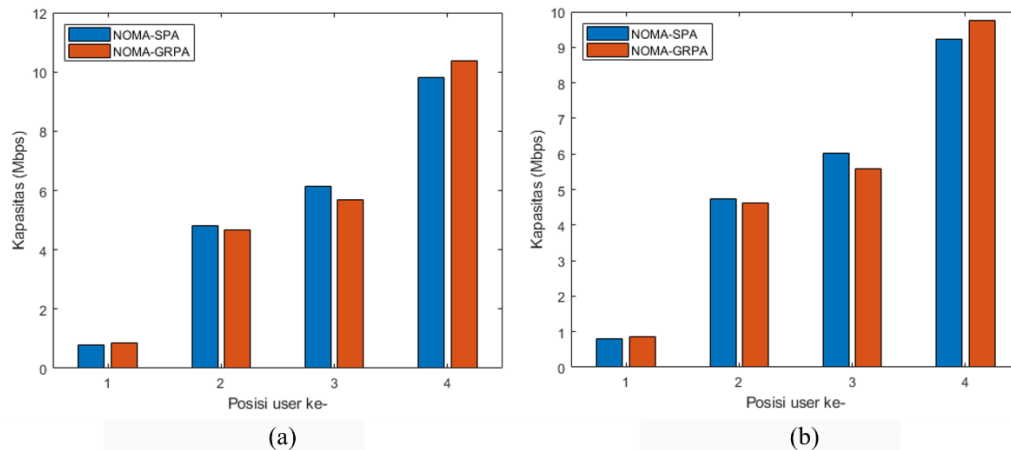
User ke-	Jarak (m)	Kondisi Kanal
1	2.75	Cahaya yang diterima terhalang oleh benda
2	2.75	<i>Line of sight</i> (LOS)
3	2.75	Adanya <i>multi-path propagation</i> yang berasal dari pantulan cahaya
4	2.2	<i>Line of sight</i> (LOS)

Dari hasil simulasi ini, dapat dilihat bahwa dengan jarak yang sama dengan adanya benda dengan karakteristik yang berbeda disekitar *user* menghasilkan kondisi kanal yang berbeda, seperti pada *user* ke-1, ke-2, dan ke-3 didapatkan *channel gain* yang berbeda.



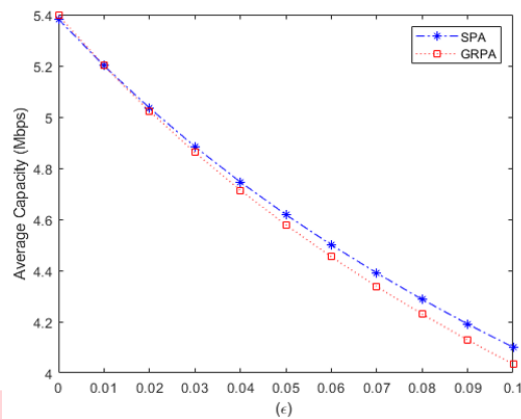
Gambar 6. Daya terima dengan beberapa alokasi daya pada NOMA dan tanpa NOMA.

Gambar 6 memperlihatkan pengaruh alokasi daya pada performansi sistem NOMA-VLC dengan menggunakan SPA dan GRPA, serta diperlihatkan pula performansi sistem apabila sistem diasumsikan tidak menerapkan NOMA pada VLC. Dalam simulasi ini daya terima yang dihasilkan dengan penerapan NOMA meningkat rata-rata 69.27% dengan penggunaan alokasi daya SPA dan 71,659% dengan menggunakan GRPA dibandingkan dengan tanpa diterapkan NOMA pada sistem VLC. Hal ini dikarenakan dalam NOMA, seluruh alokasi daya kirim diterima pada sisi receiver sebelum diterapkannya *successive interference cancellation* (SIC).



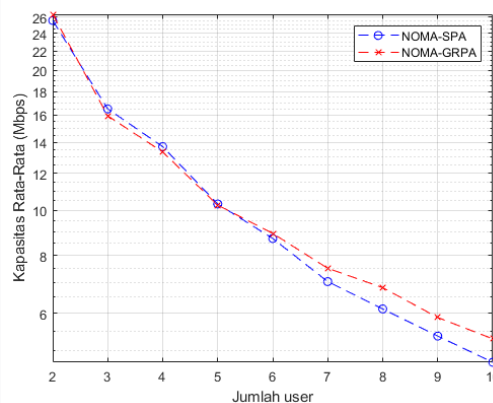
Gambar 7. Kapasitas sistem dengan alokasi daya SPA dan GRPA.

Hasil performansi sistem NOM-VLC dengan diterapkannya SIC pada tiap *user* ditunjukkan pada Gambar 7. Pada Gambar 7(a) ditampilkan perbandingan alokasi daya SPA dan GRPA dengan kondisi *perfect* SIC. Sedangkan Gambar 7(b) menunjukkan perbandingan alokasi daya SPA dan GRPA pada kondisi *imperfect* SIC dengan $\varepsilon = 0.01$. Dari grafik yang ditunjukkan pada posisi *user* ke-1 dan ke-4, metode alokasi daya GRPA menghasilkan kapasitas yang lebih tinggi. Sedangkan pada *user* ke-2 dan ke-3 alokasi daya SPA menghasilkan kapasitas yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan pengaruh nilai pengalokasian daya pada masing-masing *user*. Selain itu, terjadi perubahan kapasitas apabila adanya residu pada proses SIC. Pada *user* ke-4 kapasitas yang apabila SIC berjalan sempurna dihasilkan kapasitas sebesar 9.7990 Mbps dan 10.3676 Mbps masing-masing dengan penggunaan SPA dan GRPA akan menurun menjadi 9.2297 Mbps dan 9.7415 Mbps dengan adanya residu proses SIC sebesar 1%.



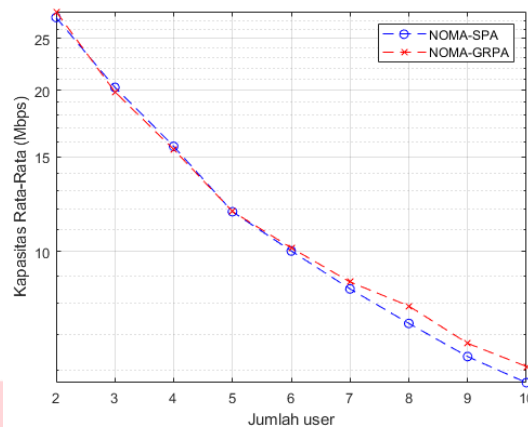
Gambar 8. Kapasitas sistem dengan pertambahan jumlah residu proses SIC.

Adanya residu dalam proses SIC memiliki dampak pada penurunan kapasitas yang diperoleh sistem dikarenakan residu tersebut akan dianggap sebagai interferensi sinyal sehingga berpengaruh pada nilai SINR yang juga berpengaruh terhadap perolehan kapasitas. Gambar 8, diperlihatkan hasil simulasi pada rentang residu atau *interference cancellation factor* yaitu $0 < \epsilon < 0.1$. Diperoleh hasil bahwa semakin besar residu proses SIC yang terjadi dalam sistem, maka semakin kecil kapasitas yang diterima untuk tiap *user* yang berada dalam cakupan satu LED. Pada penerapan alokasi daya SPA jika proses SIC berlangsung secara sempurna maka diperoleh kapasitas rata-rata senilai 5.3820 Mbps untuk tiap *user* dan akan terjadi pengurangan kapasitas rata-rata sebesar berkurang sebanyak 0.1282 Mbps setiap bertambahnya residu sebesar 1% dan apabila terdapat 10% residu dari proses SIC maka kapasitas menurun hingga 4.1002 Mbps. Sedangkan dengan diterapkannya GRPA pada sistem, kapasitas rata-rata akan berkurang sebesar 0.1363 Mbps tiap pertambahan 1% residu yang terjadi dalam proses SIC.



Gambar 9. Kapasitas sistem dengan kondisi kanal LOS untuk semua *user*.

Gambar 9 menunjukkan performansi kapasitas sistem terhadap pertambahan jumlah *user* yang digabungkan dengan menggunakan NOMA-VLC pada kondisi kanal LOS untuk seluruh *user*. Terjadi penurunan performansi sistem seiring bertambahnya jumlah *user* yang berada dalam ruangan dengan cakupan satu buah lampu LED. Dengan penerapan metode alokasi daya SPA, kapasitas rata-rata yang diperoleh pada penggabungan dua *user* sebesar 25.571 Mbps dan akan berkurang 35.43% jika bertambah satu buah *user*. Terjadi penurunan rata-rata performansi kapasitas sebesar 16.29% hingga jumlah *user* sebanyak 10 dengan kapasitas rata-rata yang diperoleh untuk 10 *user* yaitu 4.711%. Sedangkan dengan penerapan alokasi daya GRPA, diperoleh performansi kapasitas yang lebih tinggi dengan selisih 0.792 Mbps pada penggabungan 2 buah *user* dan akan berkurang hingga 5.291 Mbps pada penggabungan 10 *user*.



Gambar 10. Kapasitas dengan kondisi kanal NLOS untuk semua user.

Pada Gambar 10 ditunjukkan pengaruh jumlah user terhadap performansi sistem NOMA-VLC dengan kanal NLOS berupa reflektor. Pada model kanal NLOS dengan adanya reflektor, receiver mendapatkan multi-path sinyal sehingga kondisi kanal tiap user akan lebih baik dibandingkan pada analisis yang ditunjukkan Gambar 9. Penerapan GRPA dalam sistem NOMA-VLC menghasilkan performansi kapasitas yang lebih tinggi dibandingkan SPA. Pada penggabungan 2 buah user dihasilkan kapasitas sebesar 28.027 Mbps dengan menggunakan GRPA dan terjadi penurunan rata-rata sebesar 17.098% setiap pertambahan 1 user. Sedangkan pada SPA, penggabungan 2 user menghasilkan kapasitas rata-rata untuk setiap user sebesar 25.967 Mbps dan akan menurun hingga 10.6306 Mbps dengan penggabungan 10 user. Penurunan performansi terjadi karena adanya pengaruh pengalokasian daya untuk setiap user dalam sistem NOMA-VLC. Total alokasi daya dalam sistem NOMA-VLC harus sama dengan 1, sehingga semakin banyak jumlah user, semakin kecil alokasi daya yang diperoleh masing-masing user.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi serta analisis penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh perubahan alokasi daya pada performansi NOMA-VLC dengan alokasi daya yang digunakan yaitu SPA dan GRPA, dapat diberikan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Perubahan metode alokasi daya berpengaruh pada performansi sistem NOMA-VLC. Penerapan alokasi daya GRPA lebih efektif digunakan dalam sistem dengan jumlah user yang banyak dalam satu cakupan LED sebagai *transmitter*. Selain itu, pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa performansi dengan penerapan alokasi daya GRPA dapat meningkatkan kapasitas rata-rata sistem hingga 4.323% dibandingkan dengan penerapan SPA.
2. Peletakan benda disekitar receiver dalam sistem VLC berpengaruh pada kondisi kanal setiap user. Pada penelitian ini, peletakan tiga buah user dengan jarak yang sama terhadap *transmitter* dihasilkan *channel gain* yang berbeda. User dengan posisi dekat reflektor mendapatkan *channel gain* 4.05% lebih baik dibandingkan dengan kanal LOS. Sedangkan dengan adanya penghalang antara LED dengan receiver kondisi kanal menurun 87.26% dari kondisi kanal LOS.
3. Daya terima yang didapat masing-masing user dengan diterapkannya NOMA dalam sistem VLC lebih besar jika dibandingkan dengan sistem VLC tanpa penerapan NOMA. Pada simulasi didapatkan rata-rata daya terima untuk tiap user meningkat sebesar 69.27% mW dengan menggunakan alokasi daya SPA dan 71.66% mW menggunakan GRPA.
4. Adanya residu yang terjadi proses SIC berdampak pada penurunan kapasitas sistem. Ini dikarenakan residu tersebut akan dianggap sebagai interferensi sinyal sehingga berpengaruh pada SINR tiap user. Dalam simulasi ini, setiap bertambahnya residu sebanyak $\epsilon = 0.01$, performansi kapasitas akan berkurang rata-rata sebesar 0.13%.
5. Semakin banyak jumlah user dalam satu cakupan lampu LED, maka performansi tiap user akan berkurang. Hal ini dikarenakan pengaruh pengalokasian daya untuk setiap user dalam sistem NOMA-VLC dengan total alokasi, sehingga semakin banyak jumlah user semakin kecil alokasi daya yang diperoleh masing-masing user.

Daftar Pustaka:

- [1] H. Chen, S. Member, H. P. A. Van Den Boom, E. Tangdiongga, A. I. Optical, and W. Ow, "30-Gb / s Bidirectional Transparent Optical Transmission With an MMF Access and an Indoor Optical Wireless Link," vol. 24, no. 7, pp. 572–574, 2012.

- [2] Z. Ghassemlooy, S. Arnon, M. Uysal, Z. Xu, and J. Cheng, "Emerging Optical Wireless Communications- Advances and Challenges," vol. 8716, no. c, 2015.
- [3] J. Dang, "Comparison of Optical OFDM-IDMA and Optical OFDMA for Uplink Visible Light Communications," 2012.
- [4] S. Dimitrov, S. Sinanovic, and H. Haas, "Clipping Noise in OFDM-Based Optical Wireless Communication Systems," vol. 60, no. 4, pp. 1072–1081, 2012.
- [5] H. Marshoud, V. M. Kapinas, G. K. Karagiannidis, and S. Muhaidat, "Non-orthogonal multiple access for visible light communications," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 28, no. 1, pp. 51–54, 2015.
- [6] Q. Li, T. Shang, T. Tang, and Z. Dong, "Optimal Power Allocation Scheme Based on Multi-Factor Control in Indoor NOMA-VLC Systems," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 82878–82887, 2019.
- [7] D. Yulian, D. Darlis, S. Aulia, F. I. Terapan, and U. Telkom, "PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PERANGKAT VISIBLE LIGHT COMMUNICATION SEBAGAI TRANSCEIVER VIDEO DESIGN AND IMPLEMENTATION VISIBLE LIGHT," pp. 196–206, 2015.
- [8] S. Tao, "Performance analysis of gain ratio power allocation strategies for non-orthogonal multiple access in indoor visible light communication networks," 2018.
- [9] *In Reply: BEHAVIOUR THERAPY*, vol. 112, no. 483. 1966.
- [10] Y. Liu, Z. Qin, M. El Kashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Nonorthogonal Multiple Access for 5G and beyond," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, 2017.
- [11] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Li, A. Harada, and T. Nakamura, "Concept and Practical Considerations of Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) for Future Radio Access," pp. 770–774, 2013.
- [12] S. Sen, N. Santhapuri, R. Roy, and S. Nelakuditi, "Successive Interference Cancellation: A Back-of-the-Envelope Perspective," pp. 1–6, 2010.