

Analisis Static Power Allocation dalam Ruangan Tertutup pada Sistem VLC-NOMA Menggunakan Kanal Propagasi Line of Sight

1st Aresh Kurniawan

S1 Teknik Telekomunikasi

Universitas Telkom Purwokerto

Purwokerto, Indonesia

areshkurniawan@student.telkomuniversity.ac.id

Dr. Anggun Fitriani I, S.T., M.Eng

S1 Teknik Telekomunikasi

Universitas Telkom Purwokerto

Purwokerto, Indonesia

angguni@telkomuniversity.ac.id

Khoirun Ni'amah, S.T., M.T

S1 Teknik Telekomunikasi

Universitas Telkom Purwokerto

Purwokerto, Indonesia

khoirunn@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Teknologi *Visible Light Communication* (VLC) memiliki tantangan utama dalam distribusi *bandwidth* saat digunakan oleh pengguna dalam jumlah besar secara bersamaan. Selain itu, proses transmisi data pada VLC juga rentan mengalami gangguan dari objek penghalang. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi keterbatasan tersebut dengan menerapkan teknologi *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) yang mampu menyeimbangkan *bandwidth* modulasi, serta mengevaluasi performa sistem dalam menjaga efisiensi spektrum dan reliabilitas. Penelitian ini menggunakan metode simulasi sistem VLC-NOMA pada kanal *Line of Sight* (LOS) dengan menerapkan teknik alokasi daya *Static Power Allocation* (SPA) dan modulasi *Pulse Position Modulation* (PPM) variasi 4-, 8-, dan 16-PPM. Evaluasi sistem dilakukan menggunakan skenario penambahan jumlah *user* (2 dan 4 *user*) dengan jarak yang ditentukan secara acak. Performa sistem diukur berdasarkan parameter *Bit Error Rate* (BER), *Signal to Interference Noise Ratio* (SINR), dan kapasitas kanal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh variasi modulasi PPM (4-, 8-, dan 16-PPM) mampu mencapai nilai BER jauh di bawah ambang batas kelayakan komunikasi digital 10^{-3} . Nilai SINR yang diperoleh berkisar antara 9,87 dB hingga 61,56 dB, dengan kecenderungan *user* yang lebih dekat ke *transmitter* memperoleh SINR lebih tinggi. Hal ini membuktikan bahwa penerapan NOMA dengan SPA pada sistem VLC-LOS mampu meningkatkan efisiensi spektrum dan menjaga reliabilitas komunikasi meskipun jumlah pengguna bertambah.

Kata kunci— *Bit Error Rate*, *Non-Orthogonal Multiple Access*, *Static Power Allocation*, *Signal to Interference Noise Ratio*, *Visible Light Communication*.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan layanan komunikasi berkecepatan tinggi terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah pengguna dan perangkat nirkabel. Sistem komunikasi berbasis *Radio Frequency* (RF) saat ini menghadapi keterbatasan spektrum frekuensi yang semakin padat [2]. *Optical Wireless Communication* (OWC) hadir sebagai alternatif solusi dengan memanfaatkan spektrum optik, salah

satunya melalui teknologi *Visible Light Communication* (VLC) [1].

VLC memanfaatkan cahaya tampak dari *Light Emitting Diode* (LED) sebagai media transmisi data, sehingga memungkinkan integrasi antara sistem pencahayaan dan komunikasi [3]. Meskipun demikian, sistem VLC memiliki keterbatasan *bandwidth* LED serta penurunan kualitas sinyal akibat jarak dan kondisi kanal, terutama pada lingkungan indoor dengan banyak pengguna [4].

Untuk meningkatkan efisiensi spektrum dan kapasitas sistem, skema *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) diusulkan. NOMA memungkinkan beberapa pengguna berbagi sumber daya yang sama dengan membedakan level daya sinyal [5]. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis performansi sistem VLC-NOMA menggunakan metode *Static Power Allocation* pada kanal propagasi *Line of Sight* (LOS) di lingkungan indoor

II. KAJIAN TEORI

Menyajikan dan menjelaskan teori-teori yang berkaitan dengan variabel-variabel penelitian. Poin subjudul ditulis dalam abjad.

A. *Visible Light Communication*

Visible Light Communication merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang memanfaatkan cahaya tampak sebagai media transmisi data. Sistem VLC umumnya menggunakan LED sebagai pemancar dan photodetector sebagai penerima [1], [3].

B. *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA)

Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) merupakan skema *multiple access* yang memungkinkan beberapa pengguna mengakses sumber daya yang sama dengan perbedaan level daya. Pada sistem downlink, NOMA menerapkan *Superposition Coding* (SC) pada pemancar dan *Successive Interference Cancellation* (SIC) pada penerima [5].

C. Static Power Allocation (SPA)

Static Power Allocation adalah metode pembagian daya tetap berdasarkan urutan kondisi kanal pengguna. Pengguna dengan kondisi kanal terburuk diberikan alokasi daya lebih besar untuk menjaga kualitas layanan [6].

D. Line of Sight (LOS)

Kanal propagasi *Line of Sight* (LOS) merupakan jalur propagasi dominan pada sistem VLC indoor, di mana cahaya merambat langsung dari LED ke penerima tanpa pantulan signifikan [7].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode simulasi numerik untuk memodelkan sistem VLC-NOMA pada skema downlink. Sistem terdiri dari satu LED sebagai pemancar, kanal propagasi Line of Sight (LOS), dan beberapa photodetector sebagai penerima.

Pada sisi pemancar, sinyal masing-masing pengguna digabungkan menggunakan teknik Superposition Coding dengan koefisien daya berdasarkan metode Static Power Allocation [6]. Pada sisi penerima, proses deteksi sinyal dilakukan menggunakan Successive Interference Cancellation (SIC) [5].

Simulasi dilakukan dengan variasi jumlah pengguna dan jarak penerima terhadap sumber cahaya. Parameter kinerja sistem dievaluasi berdasarkan nilai SINR, BER, dan kapasitas kanal yang dihitung menggunakan persamaan Shannon [8].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan Static Power Allocation pada sistem VLC-NOMA mampu mempertahankan nilai SINR pengguna pada batas yang layak untuk komunikasi digital. Pengguna dengan jarak lebih jauh dari sumber cahaya memperoleh alokasi daya yang lebih besar sehingga fairness antar pengguna dapat ditingkatkan [6].

Analisis BER menunjukkan bahwa sistem VLC-NOMA dengan SPA memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan sistem tanpa NOMA, terutama pada kondisi multiuser. Selain itu, kapasitas kanal sistem meningkat seiring dengan penerapan NOMA, meskipun terjadi penurunan kapasitas per pengguna ketika jumlah pengguna bertambah [5], [8].

A. Analisis Hasil Simulasi Jarak Sampel

Penelitian ini menggunakan simulasi jarak dengan cara *generate random* sebanyak satu kali percobaan pada masing-masing skenario baik skenario 2 user maupun skenario 4 user. Jarak yang dihasilkan dari hasil *generate random* kemudian digunakan untuk kondisi kanal LOS. Batas simulasi ruang adalah 7 m x 7 m x 5 m, maka batas minimum dan maksimum jarak *random* yang ditentukan secara berturut-turut adalah 5,30 m dan 5,80 m. Hasil percobaan simulasi untuk 2 user ditunjukkan pada Tabel 1 (A).

TABEL 1
(Jarak Sampel Skenario 2 User)

User ke-	Jarak (m)
1	5,50
2	5,35

Berdasarkan percobaan, sistem simulasi berhasil membatasi rentang jarak antara 5,30 m hingga 5,80 m. Tabel 4.1 menunjukkan jarak antara *transmitter* dan *receiver* pada masing-masing user yang dinyatakan sebagai *d*. User pertama berjarak 5,50 m dari transmitter ($d_1=5,50\text{m}$), sedangkan user kedua berjarak 5,35 m dari transmitter ($d_2 = 5,35\text{ m}$). Jarak ini akan digunakan untuk kondisi kanal LOS.

TABEL 2
(Jarak Sampel Skenario 4 User)

User ke-	Jarak (m)
1	5,70
2	5,67
3	5,65
4	5,53

Pada skenario 4 user, *channel gain* tertinggi dimiliki oleh user keempat yaitu sebesar $5,0151 \times 10^{-7}$ dB, dimana jarak user keempat ke transmitter adalah 5,53 m. Channel gain terendah dari skenario 4 user dimiliki oleh user pertama yaitu $4,4900 \times 10^{-7}$ dB, dimana jarak user pertama ke transmitter adalah 5,70 m. Jarak user yang lebih dekat menuju *transmitter* serta jumlah user yang semakin kecil menghasilkan *channel gain* yang lebih besar. Sedangkan Jarak user yang lebih jauh dari *transmitter* serta jumlah user yang lebih besar menghasilkan *channel gain* yang lebih kecil.

B. Analisis Hasil Simulasi Channel Gain LOS

Penelitian ini dipengaruhi oleh ukuran seberapa kuat sinyal yang diterima oleh user dari *transmitter* pada kondisi LOS. Perhitungan dilakukan pada setiap skenario baik skenario 2 user maupun skenario 4 user. Sebelum menghitung *Channel Gain*, parameter *Lambertian* (*m*) perlu ditentukan terlebih dahulu dengan melibatkan sudut pancar LED sebesar 70° . Nilai *Lambertian* yang didapatkan adalah $m = 0.6461$, maka nilai *channel gain* pada masing-masing user pada setiap skenario dapat dilihat pada Tabel dibawah ini.

TABEL 3
(Perhitungan Channel Gain LOS)

Skenario	User ke-	Channel Gain (dB)	Jarak (m)
Skenario 2 user	1	$5,1083 \times 10^{-7}$	5,50
	2	$5,6813 \times 10^{-7}$	5,35
Skenario 4 user	1	$4,4900 \times 10^{-7}$	5,70
	2	$4,5774 \times 10^{-7}$	5,67
	3	$4,6238 \times 10^{-7}$	5,65
	4	$5,0151 \times 10^{-7}$	5,53

Tabel di atas menunjukkan *channel gain* dari kedua skenario. Pada skenario 2 *user*, rata-rata *channel gain* lebih besar dibandingkan dengan skenario 4 *user*. *Channel gain* tertinggi dari skenario pertama, adalah $5,6813 \times 10^{-7}$ dB yang dimiliki oleh *user* kedua, dimana *user* kedua memiliki jarak ke *transmitter* sebesar 5,35 m, lebih dekat dari *user* pertama. *User* pertama pada skenario 2 *user* memiliki nilai *channel gain* sebesar $5,1083 \times 10^{-7}$ dB, dimana jarak *user* pertama ke *transmitter* adalah 5,5 m.

Pada skenario 4 *user*, *channel gain* tertinggi dimiliki oleh *user* keempat yaitu sebesar $5,0151 \times 10^{-7}$ dB, dimana jarak *user* keempat ke *transmitter* adalah 5,53 m. *Channel gain* terendah dari skenario 4 *user* dimiliki oleh *user* pertama yaitu $4,4900 \times 10^{-7}$ dB, dimana jarak *user* pertama ke *transmitter* adalah 5,70 m. Jarak *user* yang lebih dekat menuju *transmitter* serta jumlah *user* yang semakin kecil menghasilkan *channel gain* yang lebih besar. Sedangkan Jarak *user* yang lebih jauh dari *transmitter* serta jumlah *user* yang lebih besar menghasilkan *channel gain* yang lebih kecil

C. Analisis Hasil Simulasi Daya Terima

Pada simulasi ini menunjukkan hasil daya terima menggunakan SPA yang diuji pada skenario 2 *user* dan 4 *user*. Hasil nyata di sisi *user* dapat dilihat berdasarkan hasil daya terima. Pada skenario 2 *user* menggunakan kanal LOS dapat dilihat pada Tabel 3 (C)

TABEL 4
(Hasil Perhitungan Daya Terima 2 User)

User ke-	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	Daya Terima (W)
1	$5,1083 \times 10^{-7}$	5,50	$5,2104 \times 10^{-6}$
2	$5,6813 \times 10^{-7}$	5,35	$1,0227 \times 10^{-6}$

Tabel di atas menunjukkan nilai daya terima pada masing-masing *user*. Daya terima terbesar diterima oleh *user* pertama yaitu sebesar $5,2104 \times 10^{-6}$ W, sedangkan *user* kedua mendapatkan daya terima sebesar $1,0227 \times 10^{-6}$ W. *User* dengan kondisi kanal yang buruk akan memiliki daya terima yang lebih besar dibandingkan dengan *user* dengan kondisi kanal yang baik. Dalam kasus skenario pertama ini, *user* pertama memiliki jarak lebih jauh dari pada *user* kedua, sehingga *user* pertama dapat dikatakan memiliki kondisi kanal yang lebih buruk dari pada *user* kedua, maka dari itu daya terima *user* pertama dialokasikan lebih besar dari pada *user* kedua.

TABEL 5
(Hasil Perhitungan Daya Terima 4 User)

User ke-	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	Daya Terima (W)
1	$4,4900 \times 10^{-7}$	5,70	$4,2565 \times 10^{-6}$
2	$4,5774 \times 10^{-7}$	5,67	$8,7885 \times 10^{-7}$
3	$4,6238 \times 10^{-7}$	5,65	$2,2194 \times 10^{-7}$
4	$5,0151 \times 10^{-7}$	5,53	$6,0181 \times 10^{-8}$

Tabel di atas menunjukkan nilai daya terima pada masing-masing *user* pada skenario 4 *user*. Daya terima terbesar diterima oleh *user* pertama yaitu sebesar $4,2565 \times 10^{-6}$ W, sedangkan daya terima terkecil diterima oleh *user* keempat yaitu sebesar $6,0181 \times 10^{-8}$ W. *User* dengan kondisi kanal yang buruk akan memiliki daya terima yang lebih besar dibandingkan dengan *user* dengan kondisi kanal yang baik. Kondisi kanal *user* pertama terhadap *transmitter* lebih jauh dari pada *user* kedua. *User* kedua memiliki jarak lebih jauh ke *transmitter* dari pada *user* ketiga. *User* ketiga memiliki jarak lebih jauh ke *transmitter* dari pada *user* keempat. Berdasarkan hal tersebut, urutan daya terima dari yang terbesar ke yang terkecil diurutkan sebagai berikut: *user* pertama, *user* kedua, *user* ketiga, dan *user* keempat.

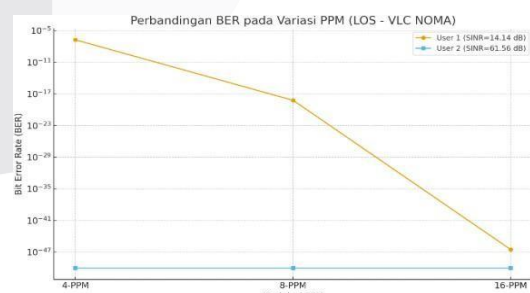
D. Analisis Hasil Simulasi BER

Simulasi BER pada sistem VLC-NOMA menggunakan teknik SPA dilakukan dalam dua skenario, yaitu pada skenario 2 *user* dan skenario 4 *user* dalam kondisi kanal LOS. Hasil simulasi skenario dua *user* ditunjukkan pada Tabel di bawah ini.

TABEL 6
(Hasil Perhitungan BER 2 User)

User ke-	Kapasitas Kanal (Mbps)	SINR (dB)	Daya Terima (W)	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	BER 4-PPM	BER 8-PPM	BER 16-PPM
1	95,055	11.28	$4,2565 \times 10^{-6}$	$4,4900 \times 10^{-7}$	5,70	$1,817 \times 10^{-7}$	$6,186 \times 10^{-19}$	$3,044 \times 10^{-47}$
2	409,00	9.87	$8,7885 \times 10^{-7}$	$4,5774 \times 10^{-7}$	5,67	0	0	0

Pada Tabel 4.6, Hasil simulasi pada skenario pertama (2 *user*) menunjukkan bahwa semua skema modulasi PPM, yakni 4-PPM, 8-PPM, dan 16-PPM, mampu mencapai tingkat kesalahan bit (BER) yang sangat rendah. Nilai BER yang diperoleh seluruhnya berada jauh di bawah ambang batas kelayakan komunikasi digital, yaitu 10^{-3} . Untuk *User* 1, dengan nilai SINR sebesar 14,14 dB, diperoleh BER sebesar $1,817 \times 10^{-7}$ pada 4-PPM, $6,186 \times 10^{-19}$ pada 8-PPM, dan $3,044 \times 10^{-47}$ pada 16-PPM. Pola ini menunjukkan tren penurunan BER seiring dengan meningkatnya orde modulasi PPM seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hal tersebut dapat dijelaskan melalui sifat orthogonalitas PPM.



GAMBAR 1

(Analisis BER terhadap variasi PPM pada skenario 2 *user*) *User* 2 dengan nilai SINR yang jauh lebih tinggi (61,56 dB) menunjukkan hasil BER bernilai nol untuk seluruh variasi PPM. Kondisi ini terjadi karena margin SNR sangat besar sehingga probabilitas kesalahan bit secara teoritis menjadi amat kecil hingga mendekati nol, dan dalam perhitungan numerik simulasi tercatat sebagai 0 akibat keterbatasan resolusi komputasi. Hal ini menegaskan bahwa pada kondisi kanal yang sangat bersih, sistem VLC- NOMA berbasis LOS

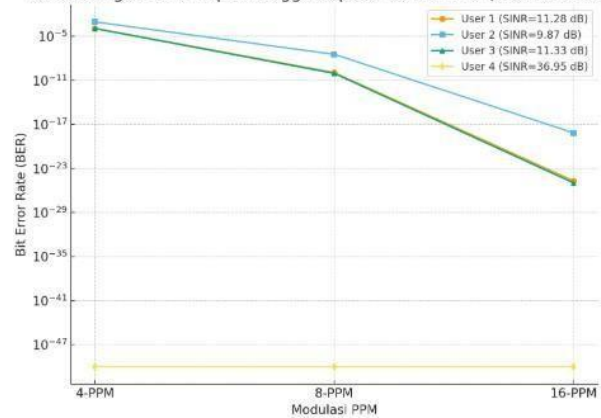
dapat memberikan reliabilitas komunikasi yang hampir sempurna tanpa adanya kesalahan bit. Implikasi hasil ini adalah bahwa dari sudut pandang reliabilitas sistem, seluruh skema PPM (4-, 8-, dan 16-PPM) dapat digunakan karena memenuhi kriteria $BER \leq 10^{-3}$. Akan tetapi, pemilihan orde PPM dalam implementasi praktis harus mempertimbangkan aspek non-ideal, seperti kompleksitas sinkronisasi waktu, sensitivitas terhadap *timing jitter*, serta kebutuhan *bandwidth*. Modulasi 16-PPM memang memberikan kinerja BER terbaik pada hasil simulasi, namun memerlukan presisi *timing* lebih tinggi. Sebaliknya, 4-PPM lebih sederhana dalam implementasi dengan toleransi yang lebih baik terhadap ketidakidealan perangkat keras, meskipun BER relatif lebih tinggi dibanding 8-PPM dan 16-PPM.

TABEL 7
(Hasil Perhitungan BER 4 User)

User ke-	Kapasitas Kanal (Mbps)	SINR (dB)	Daya Terima (W)	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	BER 4-PPM	BER 8-PPM	BER 16-PPM
1	77,044	11,28	$4,2585 \times 10^{-6}$	$4,4900 \times 10^{-7}$	5,70	$1,258 \times 10^{-4}$	$9,345 \times 10^{-10}$	$1,158 \times 10^{-25}$
2	68,401	9,87	$8,7885 \times 10^{-7}$	$4,5774 \times 10^{-7}$	5,67	$9,345 \times 10^{-5}$	$3,579 \times 10^{-8}$	$9,030 \times 10^{-19}$
3	77,353	11,33	$2,2194 \times 10^{-7}$	$4,6230 \times 10^{-7}$	5,65	$1,158 \times 10^{-4}$	$7,917 \times 10^{-11}$	$1,675 \times 10^{-25}$
4	245,539	36,95	$6,0181 \times 10^{-8}$	$5,0151 \times 10^{-7}$	5,53	~0	~0	~0

Simulasi kinerja sistem dengan empat *user* dalam kanal LOS menunjukkan hasil yang konsisten dengan skenario dua pengguna, di mana setiap skema modulasi PPM berhasil menghasilkan nilai BER yang memenuhi ambang kelayakan komunikasi digital, yaitu $BER \leq 10^{-3}$. Namun demikian, perbedaan nilai SINR antar pengguna memberikan variasi tingkat keandalan komunikasi yang menarik untuk dianalisis lebih lanjut. Berdasarkan hasil simulasi, *User 1* dan *User 3* memiliki SINR masing-masing 11,28 dB dan 11,33 dB, menghasilkan BER sebesar $1,26 \times 10^{-4}$ dan $1,16 \times 10^{-4}$ pada 4-PPM. Kedua nilai ini masih berada di bawah ambang batas 10^{-3} , namun relatif lebih tinggi dibandingkan skema PPM dengan orde lebih besar. Pada 8-PPM, BER turun drastis hingga mencapai orde 10^{-10} , dan pada 16-PPM bahkan menurun hingga orde 10^{-25} . Hal ini mengindikasikan bahwa dengan peningkatan orde PPM, performa deteksi simbol meningkat secara signifikan pada pengguna dengan SINR menengah. *User 2* memiliki SINR terendah, yaitu 9,86 dB, dan menunjukkan BER terbesar pada 4-PPM, yaitu $9,35 \times 10^{-4}$. Meskipun nilai ini masih berada di bawah ambang kelayakan, margin reliabilitasnya relatif kecil. Peningkatan orde modulasi terbukti memberikan perbaikan yang sangat signifikan, dengan BER turun menjadi $3,57 \times 10^{-8}$ pada 8-PPM, dan $7,01 \times 10^{-19}$ pada 16-PPM. Hal ini menegaskan bahwa pada kondisi SINR yang rendah, penggunaan modulasi PPM dengan orde lebih tinggi mampu memberikan *coding gain* tambahan yang meningkatkan ketahanan komunikasi terhadap kesalahan bit. *User 4* memperoleh SINR tertinggi, yaitu 36,95 dB, sehingga semua skema PPM menunjukkan BER bernilai nol secara numerik. Sama seperti pada skenario dua pengguna, hal ini dapat dipahami sebagai akibat dari rasio sinyal terhadap derau yang sangat besar, sehingga probabilitas kesalahan deteksi menjadi amat kecil hingga mendekati nol, dan tidak terdeteksi oleh perhitungan numerik simulasi. Dengan demikian, reliabilitas komunikasi untuk pengguna dengan kondisi kanal sangat baik dapat dianggap hampir sempurna.

Perbandingan BER Empat Pengguna pada Variasi PPM (LOS - VLC NOMA)



GAMBAR 2

(Analisis BER terhadap variasi PPM pada skenario 4 user)

Secara keseluruhan, hasil simulasi skenario empat pengguna memperlihatkan bahwa semua skema modulasi PPM (4-, 8-, dan 16-PPM) mampu mencapai kinerja BER yang memadai. Akan tetapi, terdapat perbedaan penting dalam margin reliabilitas: Pada SINR rendah (*User 2*), 4-PPM memberikan performa BER yang mendekati ambang batas, sehingga penggunaan orde PPM yang lebih tinggi (8-PPM atau 16-PPM) lebih disarankan. Pada SINR menengah (*User 1* dan *User 3*), peningkatan orde PPM memberikan keuntungan signifikan dalam menurunkan BER hingga jauh di bawah ambang batas. Pada SINR tinggi (*User 4*), seluruh skema PPM memberikan reliabilitas hampir sempurna sehingga pemilihan orde modulasi lebih ditentukan oleh pertimbangan kompleksitas implementasi.

D. Analisis Hasil Simulasi BER

Analisis SINR digunakan untuk mengetahui seberapa besar perbandingan sinyal utama terhadap gabungan (interferensi) dan noise pada setiap *user*. Simulasi SINR dilakukan dalam dua skenario, yaitu skenario 2 *user* dan skenario 4 *user* menggunakan kondisi kanal LOS. Skenario pertama melibatkan dua *user*, yaitu *user* pertama dan *user* kedua.

TABEL 8
(Hasil Perhitungan SINR 2 User)

User ke-	Daya Terima (W)	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	SINR (dB)
1	$5,2104 \times 10^{-6}$	$5,1083 \times 10^{-7}$	5,50	14,14
2	$1,0227 \times 10^{-6}$	$5,6813 \times 10^{-7}$	5,35	61,56

Tabel di atas menunjukkan perbandingan nilai SINR *user* pertama dan *user* kedua pada skenario dua *user* menggunakan kondisi kanal LOS. *User* kedua memiliki nilai SINR lebih tinggi dibandingkan dengan *user* pertama yaitu 61,56 dB, sedangkan *user* pertama hanya mendapatkan nilai 14,14 dB. Hal ini dapat dipengaruhi salah satunya oleh faktor jarak. *User* pertama memiliki rentang jarak 5,5 m dari *transmitter*, sedangkan *user* kedua memiliki rentang jarak 5,3 m dari *transmitter*.

TABEL 9
(Hasil Perhitungan SINR 4 User)

User ke-	Daya Terima (W)	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	SINR (dB)
----------	-----------------	-------------------	-----------	-----------

1	$4,2565 \times 10^{-6}$	$4,4900 \times 10^{-7}$	5,70	11.28
2	$8,7885 \times 10^{-7}$	$4,5774 \times 10^{-7}$	5,67	9.87
3	$2,2194 \times 10^{-7}$	$4,6238 \times 10^{-7}$	5,65	11.33
4	$6,0181 \times 10^{-8}$	$5,0151 \times 10^{-7}$	5,53	36.95

Berdasarkan perbandingan kedua skenario, terlihat bahwa nilai SINR yang diperoleh pada skenario pertama secara umum lebih tinggi dibandingkan dengan nilai SINR pada skenario kedua. Perbedaan ini dipengaruhi oleh jumlah user yang dilayani secara bersamaan. Pada skenario pertama, jumlah user lebih sedikit, sehingga tingkat interferensi antar-user juga lebih rendah. Sebaliknya, pada skenario kedua dengan jumlah user lebih banyak, terjadi peningkatan interferensi yang signifikan sehingga nilai SINR yang diterima oleh masing-masing user cenderung lebih rendah.

E. Analisis Hasil Simulasi Kapasitas Kanal

Simulasi kapasitas kanal dilakukan dalam dua skenario, yaitu pada skenario 2 user dan skenario 4 user dalam kondisi kanal LOS. Tabel 4.8 menunjukkan hasil simulasi kapasitas kanal pada skenario 2 user

TABEL 10
(Hasil Perhitungan Kapasitas Kanal 2 User)

User ke-	SINR (dB)	Daya Terima (W)	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	Kapasitas Kanal (Mbps)
1	11.28	$4,2565 \times 10^{-6}$	$4,4900 \times 10^{-7}$	5,70	95.055
2	9.87	$8,7885 \times 10^{-7}$	$4,5774 \times 10^{-7}$	5,67	409.00

Berdasarkan hasil simulasi skenario dua user dengan metode SPA pada sistem VLC- NOMA menggunakan kanal LOS, diperoleh kapasitas kanal sebesar 95,06 Mbps untuk user pertama dan 409,01 Mbps untuk user kedua. Perbedaan kapasitas kanal yang cukup signifikan ini dipengaruhi oleh kombinasi faktor alokasi daya, jarak pengguna terhadap *transmitter*, serta nilai SINR yang diterima masing-masing user. Meskipun user pertama memperoleh alokasi daya lebih besar, yaitu 85%, kapasitas kanal yang dicapai relatif lebih rendah dibandingkan user kedua. Hal ini disebabkan oleh nilai SINR user pertama yang hanya sebesar 14,14 dB, jauh lebih kecil dibandingkan 61,56 dB pada user kedua. Sebaliknya, user kedua yang hanya memperoleh alokasi daya 15% tetap mampu mencapai kapasitas kanal yang jauh lebih tinggi karena memiliki *channel gain* yang lebih baik akibat posisi yang lebih dekat dengan *transmitter*, sehingga daya sinyal yang diterima relatif lebih stabil dan interferensi dapat diminimalkan. Kondisi ini menunjukkan bahwa alokasi daya yang besar tidak selalu menjamin kapasitas kanal yang tinggi, karena kualitas kanal dan SINR memiliki peranan yang lebih dominan dalam menentukan performa komunikasi. Secara keseluruhan, total kapasitas kanal pada skenario ini mencapai lebih dari 500 Mbps, yang mengindikasikan bahwa penerapan NOMA dengan skema SPA pada keadaan kanal LOS masih dapat diandalkan.

TABEL 11
(Hasil Perhitungan Kapasitas Kanal 4 User)

User ke-	SINR (dB)	Daya Terima (W)	Channel Gain (dB)	Jarak (m)	Kapasitas Kanal (Mbps)
1	11.28	$4,2565 \times 10^{-6}$	$4,4900 \times 10^{-7}$	5,70	77.044
2	9.87	$8,7885 \times 10^{-7}$	$4,5774 \times 10^{-7}$	5,67	68.401
3	11.33	$2,2194 \times 10^{-7}$	$4,6238 \times 10^{-7}$	5,65	77.353
4	36.95	$6,0181 \times 10^{-8}$	$5,0151 \times 10^{-7}$	5,53	245.539

Tabel di atas menunjukkan hasil simulasi kapasitas kanal pada skenario 4 user. Berdasarkan hasil simulasi tersebut, diperoleh kapasitas kanal yang bervariasi untuk setiap user, yaitu 77,04 Mbps untuk user pertama, 68,40 Mbps untuk user kedua, 77,35 Mbps untuk user ketiga, dan 245,54 Mbps untuk user keempat. Variasi kapasitas kanal ini dipengaruhi oleh kombinasi faktor alokasi daya, *channel gain*, serta nilai SINR masing-masing user. User keempat, meskipun hanya memperoleh alokasi daya terkecil (1%), mampu mencapai kapasitas kanal tertinggi. Hal ini disebabkan oleh posisi yang paling dekat dengan *transmitter* (5,53 m) serta *channel gain* terbesar ($5,02 \times 10^{-7}$), sehingga menghasilkan SINR yang sangat tinggi (36,96 dB) dan secara langsung meningkatkan kapasitas kanal. Sebaliknya, user kedua yang memperoleh alokasi daya lebih besar (16%) justru memiliki kapasitas kanal terendah akibat nilai SINR yang paling kecil (9,87 dB) meskipun jaraknya relatif dekat. Sementara itu, user pertama dan ketiga memperoleh kapasitas kanal yang hampir seimbang (sekitar 77 Mbps) dengan nilai SINR serupa (sekitar 11 dB), menunjukkan adanya keseimbangan antara daya alokasi dan kualitas kanal. Secara keseluruhan, total kapasitas kanal sistem mencapai lebih dari 468 Mbps, yang menunjukkan bahwa penerapan NOMA dengan skema SPA tetap mampu meningkatkan efisiensi spektrum meskipun jumlah user diperbanyak.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa implementasi *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) pada sistem *Visible Light Communication* (VLC) dengan teknik *Static Power Allocation* (SPA) berhasil diterapkan pada kanal *Line of Sight* (LOS) untuk skenario 2 user dan 4 user. Sistem mampu melakukan pembagian daya sesuai prinsip NOMA, yaitu memberikan alokasi daya lebih besar kepada user dengan kondisi kanal yang lebih buruk (jarak lebih jauh) dan daya lebih kecil kepada user dengan kondisi kanal yang lebih baik, yang tercermin dari distribusi daya terima masing-masing user. Evaluasi performa sistem menunjukkan bahwa penerapan SPA pada VLC-NOMA menghasilkan kinerja yang baik pada parameter BER, SINR, dan kapasitas kanal, di mana seluruh variasi modulasi PPM (4-, 8-, dan 16-PPM) menghasilkan nilai BER jauh di bawah ambang batas 10^{-3} sehingga komunikasi dapat dianggap reliabel, dengan penurunan BER yang semakin signifikan pada orde modulasi yang lebih tinggi. Nilai SINR antar user dipengaruhi oleh jarak, *channel gain*, dan alokasi daya, dengan skenario 2 user memiliki nilai SINR yang relatif lebih tinggi dibandingkan skenario 4 user akibat tingkat interferensi yang lebih kecil. Selain itu, kapasitas kanal yang dicapai berada pada rentang 95,06–409 Mbps untuk skenario 2 user dan 68,40–245,54 Mbps untuk skenario 4 user, sehingga meskipun jumlah user meningkat, sistem VLC-NOMA tetap mampu menjaga

efisiensi spektrum dengan total kapasitas kanal melebihi 400 Mbps.

REFERENSI

- [1] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is LiFi?," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, 2016.
- [2] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002.
- [3] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light communication system," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 100–107, 2004.
- [4] J. M. Kahn and J. R. Barry, "Wireless infrared communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [5] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor, "On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 3, pp. 1–14, 2017.
- [6] T. Afifah, et al., "Analisis Static Power Allocation pada Sistem VLC-NOMA Indoor," *Jurnal Teknik Telekomunikasi*, vol. 8, no. 2, pp. 45–52, 2022.
- [7] J. Grubor, S. Randel, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 24, pp. 3883–3892, 2008.
- [8] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379–423, 1948.