

ANALISIS KINERJA ALGORITMA PEMILIHAN PENGGUNA DENGAN KOMPLEKSITAS RENDAH BERBASIS KOMBINASI ROUND-ROBIN PADA SISTEM MASSIVE MIMO

Rayhan Nauvaldi¹, Nachwan Mufti Adriansyah², Dhoni Putra Setiawan³, Rina Pudji Astuti⁴

^{1,2,3,4}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹rayhannauvaldi@telkomuniversity.ac.id, ²nachwanma@telkomuniversity.ac.id,
³setiawandhoni@telkomuniversity.ac.id, ⁴rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id

Diterima pada 12 Agustus 2021; disetujui pada 22 Agustus 2022; dan diterbitkan pada 2 September 2022.

Abstrak

Sistem komunikasi generasi kelima (5G) menuntut kinerja yang lebih tinggi dari generasi sebelumnya. Sistem *Massive Multiple Input Multiple Output* (MIMO) muncul sebagai solusi untuk mengatasi generasi sebelumnya yang tidak dapat memenuhi permintaan data dalam jumlah besar. Penggunaan *Massive MIMO* ini memungkinkan diciptakannya *multiple beam* sehingga *throughput* dapat meningkat lebih besar daripada generasi sebelumnya. Sistem *Base Station* (BS) dengan banyak antena tidak dapat melayani pengguna dalam jumlah besar secara bersamaan. Maka dari itu sangat penting untuk memilih layanan pengguna yang akan dilayani secara bersamaan dan menentukan jumlah optimal pengguna yang akan dilayani. Penelitian ini mengusulkan algoritma pemilihan layanan pengguna untuk mencapai spektral efisiensi tinggi dan interferensi kecil. Algoritma yang diusulkan adalah *Capacity-Based User Selection*, *Frobenius Norm-Based User Selection*, dan *Chordal Distance User Selection* (CDUS) yang dikombinasikan dengan algoritma *Round-Robin* (RR). Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, algoritma pemilihan layanan pengguna yang dikombinasikan dengan algoritma RR memberikan kinerja yang baik dalam hal *sumrate* menggunakan algoritma *Capacity-RR* dengan nilai 673 bps/Hz, tingkat *fairness* pada algoritma CDUS-RR memiliki indeks *fairness* dengan nilai rata-rata 3,29, dan kompleksitas pada algoritma CDUS-RR memiliki rata-rata runtime sebesar 0,62 detik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan penjadwalan pengguna pada *Massive MIMO*.

Kata Kunci: : *Massive MIMO, capacity-based user selection, frobenius norm-based user selection, chordal distance user selection, round-robin.*

Abstract

The fifth-generation communication system (5G) demands higher performance than the previous generation. *Massive Multiple Input Multiple Output* (MIMO) systems emerged as a solution to overcome the previous generation of mobile networks that could not meet the demands of data. The use of *Massive MIMO* makes it possible to create *multiple beams* so that the *throughput* can be increased more than the previous generation [1]. *Base Station* (BS) systems with many antennas cannot serve many users simultaneously [2]. Therefore, it's very important to select which user will be served simultaneously and determine the optimal number of users to be served. This paper proposes a user scheduling algorithm to achieve high spectral efficiency and low interference. The proposed algorithm is *Capacity-Based User Selection*, *Frobenius Norm-Based User*, and *Chordal Distance User Selection* (CDUS) combined with the *Round-Robin* (RR) algorithm. Based on the simulation that has been done, the user selection algorithm combined with the RR algorithm provides good performance in terms of *sumrate* using the *Capacity-RR* algorithm with a value of 673 bps/Hz, the level of *fairness* in the CDUS-RR algorithm has a *fairness* index with an average value is 3.29, and the complexity of the CDUS-RR algorithm has an average runtime of 0.62 seconds. The results of this journal are expected to contribute to the development of user scheduling on *Massive MIMO*.

Key Words: *Massive MIMO, capacity-based user selection, frobenius norm-based user selection, chordal distance user selection, round-robin.*

1. Pendahuluan

Multiple Input Multiple Output (MIMO) merupakan sebuah sistem antena yang menggunakan lebih dari satu antena pada pemancar dan penerima. Implementasi MIMO pada jaringan seluler seperti 4G tidak dapat memenuhi permintaan data dalam jumlah besar. Sistem *Massive MIMO* memiliki kemampuan membuat *beamforming* yang lebih fleksibel sehingga memungkinkan antena lebih tertuju ke arah pengguna yang akan dilayani. Penggunaan *Massive MIMO* ini memungkinkan untuk diciptakannya *multiple beams* dalam satu waktu yang seluruh *beam* dapat menggunakan frekuensi yang sama sehingga *throughput* dapat meningkat lebih besar daripada generasi sebelumnya. Sistem *Massive MIMO* ini dianggap sebagai salah satu teknologi nirkabel masa depan [1][2]. Sistem *Base Station* (BS) dengan jumlah antena pemancar yang banyak memiliki potensi untuk melayani sejumlah besar pengguna secara bersamaan. BS ini tidak dapat melayani sejumlah besar pengguna dalam waktu bersamaan karena kelebihan beban pada *beamforming* [3]. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu algoritma pemilihan layanan pengguna dengan kompleksitas rendah agar memilih layanan pengguna yang akan dilayani dan menentukan jumlah optimal pengguna yang akan dilayani untuk mencapai spektral efisiensi tinggi, dan interferensi kecil [1][3]. Beberapa algoritma pemilihan pengguna pada *massive MIMO* telah diteliti seperti *Capacity-Based Algorithm* yang mengalokasikan pengguna berdasarkan kapasitas maksimal, *Frobenius Norm-based* yang mengalokasikan pengguna berdasarkan energi kanalnya, dan *Chordal Distance User Selection* (CDUS) berdasarkan jarak *chordal* antar user memiliki kelemahan yaitu *fairness* yang rendah [4]. Oleh karena itu penelitian ini mengusulkan algoritma pemilihan layanan pengguna pada sistem *Time Division Duplex* (TDD) *Massive MIMO* menggunakan *Capacity-Based User Selection*, *Frobenius Norm-based User Selection*, dan CDUS yang dikombinasikan dengan Round Robin untuk mengatasi ketidakadilan dalam memilih frekuensi layanan pengguna. Karena round robin membuat pengguna mendapatkan kesempatan sama dalam mendapatkan layanan [5]. *Capacity-Based User Selection*, *Frobenius Norm-based User Selection*, dan CDUS dipilih untuk menjadi perbandingan antara algoritma yang sudah diajukan. Parameter yang digunakan dalam jurnal untuk analisis berupa nilai sumrate, kompleksitas dari algoritma yang digunakan, serta *fairness* dari algoritma pemilihan layanan pengguna. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan penjadwalan pengguna pada *Massive MIMO* dengan memberikan nilai *fairness* yang baik, kompleksitas yang rendah, dan saat bersamaan memberikan rata-rata nilai yang baik

2. Dasar Teori

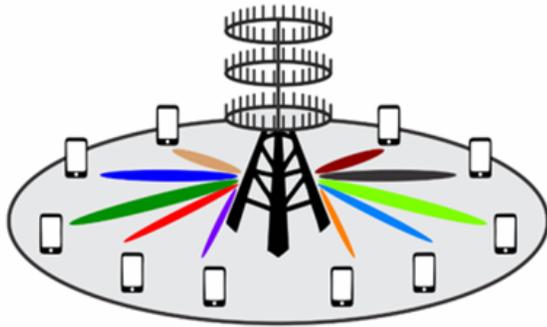
2.1 Sistem Komunikasi Generasi Kelima (5G)

5G adalah pengembangan teknologi dari generasi sebelumnya. Generasi 5G diharapkan mampu mengubah peran secara mendasar dari teknologi telekomunikasi di masyarakat. Teknologi 5G juga diharapkan meningkatkan pertumbuhan ekonomi, kesehatan, transportasi dan mempercepat transformasi digital pada segala aspek sehingga semua orang bisa saling terhubung. Sistem komunikasi 5G diharapkan memiliki kapasitas sistem yang besar, latensi rendah dengan kepadatan koneksi yang tinggi, dan kecepatan yang lebih tinggi dari generasi sebelumnya yang akan disediakan untuk berbagai aplikasi. Sistem komunikasi 5G harus siap untuk era Internet of Things (IoT) dan terlebih lagi untuk era Internet of Everything (IoE). Sistem komunikasi 5G diharapkan mampu untuk memenuhi skenario *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Massive Machine Type Communications* (mMTC), dan *Ultra-Reliable Low Latency Communications* (URLLC) [6].

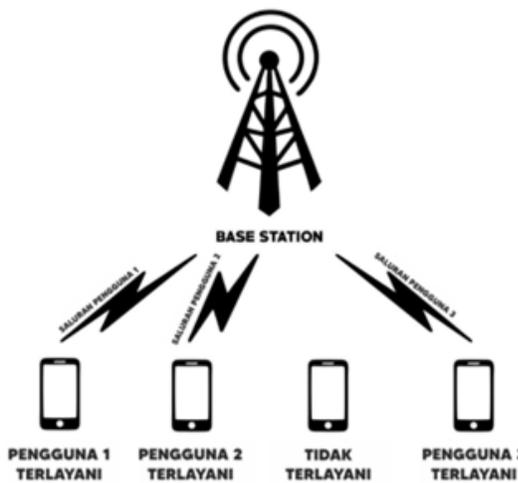
2.2 Massive MIMO

Massive MIMO adalah *Multi-User MIMO* yang memiliki antena BS sangat banyak. *Massive MIMO* dengan puluhan atau ratusan antena pada BS melayani puluhan atau ratusan pengguna pada frekuensi dan waktu yang bersamaan [3]. *Massive MIMO* memungkinkan proses transmisi dan penerimaan sinyal lebih dari satu sinyal data secara bersamaan melalui saluran yang sama. *Massive MIMO* bertujuan untuk melayani pengguna yang banyak secara bersamaan dengan *throughput* yang tinggi. Oleh karena itu, teknologi *Massive MIMO* dianggap sebagai teknologi nirkabel masa depan yang akan aman, keandalan jaringan yang baik, dan menggunakan spektrum secara efisien [7].

Massive MIMO memiliki kemampuan membuat *beamforming* yang lebih fleksibel, sehingga memungkinkan antena lebih tertuju ke arah user yang akan dilayani [1]. Penggunaan *Massive MIMO* ini memungkinkan untuk diciptakannya *multiple beam* dalam satu waktu yang seluruh *beam* dapat menggunakan frekuensi yang sama, sehingga *throughput* dapat meningkat lebih besar daripada generasi sebelumnya [2]. Pada saat yang sama, *Massive MIMO* dapat mengirimkan beberapa *beam* ke penerima di mana semua *beam* memiliki pita frekuensi yang sama. Teknik ini akan meningkatkan efisiensi spektral, dan pada saat yang sama akan menghasilkan lebih sedikit interferensi pada penerima. *Massive MIMO* diharapkan memiliki sistem dengan interferensi sangat kecil dan efisiensi spektral yang tinggi, maka dari itu algoritma pemilihan pengguna menjadi hal penting untuk diterapkan. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi dari sistem *Massive MIMO*.



Gambar 1. Ilustrasi Penggunaan Massive MIMO



Gambar 2. Ilustrasi Algoritma Pemilihan Pengguna

2.3 Algoritma Pemilihan Pengguna

Massive MIMO dapat meningkatkan ortogonalitas saluran, akan tetapi ada beberapa skenario sulit di mana tidak semua pengguna dapat dilayani secara efisien pada waktu yang sama. BS biasanya tidak dapat secara bersamaan melayani sejumlah besar pengguna karena kelebihan beban pada *beamforming* [2]. Algoritma pemilihan layanan pengguna dapat digunakan sebagai strategi untuk menjamin layanan pengguna dan pada akhirnya mencapai kinerja keseluruhan sistem yang lebih baik.

Gambar 2 menunjukkan secara sederhana bagaimana algoritma pemilihan pengguna bekerja. Pemilihan layanan pengguna pada Massive MIMO dilakukan menggunakan Channel State Information (CSI). CSI berfungsi untuk mengumpulkan informasi saluran dari setiap pengguna [8]. CSI diperlukan untuk memilih subset yang baik di setiap slot penjadwalan, meskipun tidak ada pengguna yang dapat dilayani oleh antena dalam satu waktu. Algoritma pemilihan layanan

pengguna menggunakan feedback dari CSI digunakan untuk menghemat waktu dan meningkatkan kapasitas sistem [2].

2.4 Capacity Based User Selection – Round Robin (Capacity-RR)

Capacity-based User Selection merupakan sebuah algoritma yang mempunyai prinsip kerja memilih pengguna pertama dengan nilai *throughput* tertinggi dan kemudian, dari pengguna yang belum terpilih, dengan acak memilih pengguna berikutnya yang memberikan total *throughput* tertinggi bersama dengan pengguna yang dipilih pertama. Secara matematis, prosedur dapat ditunjukkan pada persamaan [4][8]:

$$S_i = \arg \min_{k \in \Omega} k \cup \Upsilon, \tag{1}$$

dengan S_i menunjukkan pengguna yang dipilih pada iterasi ke- i , Υ dan Ω menunjukkan himpunan pengguna yang dipilih dan tidak dipilih pada iterasi ke- i . Algoritma berhenti ketika pengguna dipilih atau total *throughput* turun. K merupakan banyak pengguna $1, \dots, K$ yang bisa dilayani secara bersamaan. Himpunan pengguna yang telah terpilih akan masuk antrian yang dilakukan oleh Algoritma RR agar pengguna yang sama tidak akan terpilih sampai K pengguna terpilih.

2.5 Frobenius Norm-Based User Selection – Round Robin (Frobenius-RR)

Algoritma pemilihan pengguna *Frobenius Norm-Based User Selection* diusulkan untuk menghindari pengguna menemukan *throughput* di setiap langkah yang banyak memakan waktu. Secara umum, algoritma ini memilih pengguna pertama dengan energi saluran maksimum dan kemudian dengan acak memilih pengguna berikutnya dengan persamaan [4][7]:

$$S_i = \arg \max_{k \in \Omega} \sum_{j \in \{k\} \cup \Upsilon} \|H_j^{eq}\|_F^2, \tag{2}$$

dengan $\|H_j^{eq}\|_F^2$ adalah jumlah energi saluran. algoritma akan berhenti ketika pengguna dipilih. Himpunan pengguna yang telah terpilih akan masuk antrian yang dilakukan oleh Algoritma RR agar pengguna yang sama tidak akan terpilih sampai K pengguna terpilih. Meskipun *Frobenius-RR* mengelompokkan pengguna berdasarkan energi saluran, tetapi cara kerjanya mirip dengan *Capacity-based*.

2.6 Chordal Distance User Selection – Round Robin (CDUS-RR)

Algoritma CDUS memilih pengguna berbasis jarak *chordal*. Jarak *chordal* adalah besar sudut ortogonal antar pengguna. CDUS memiliki teknik untuk memilih pengguna yang dilayani dalam waktu yang sama

berdasarkan jarak *chordal* antara posisi mereka [4][7][8]. CDUS merupakan salah satu algoritma pemilihan pengguna yang paling cocok untuk teknik *Massive MIMO*. Proses perhitungan untuk menghitung pengguna mana yang memiliki energi saluran terbaik ditunjukkan pada persamaan [4]

$$S_i = \arg \max_k \|H_k\|_F^2, \quad (3)$$

dengan H_k^2 adalah energi saluran. Pemilihan pengguna selanjutnya berdasarkan jarak *chordal* tertinggi, yang jarak tersebut berdasarkan besar sudut orthogonal antar pengguna. Perhitungan jarak *chordal* antar pengguna ditunjukkan pada persamaan

$$d_{cd}(H_1 H_2) = \sqrt{\sum_{j=1}^N \sin^2(\theta_j)} \quad (4)$$

$$= \sqrt{N_r - \text{tr}(\tilde{H}_1 \tilde{H}_2^* \tilde{H}_2 \tilde{H}_1^*)} \quad (5)$$

dengan θ_j adalah sudut antara matriks H_1 dan H_2 . H_1 dan H_2 adalah hasil dari proses *Gram Schmidt Orthogonalizations* (GSO) dan N_r sebagai jumlah antena pada penerima. Himpunan pengguna yang telah terpilih akan masuk antrian yang dilakukan oleh Algoritma RR agar pengguna yang sama tidak akan terpilih sampai K pengguna terpilih.

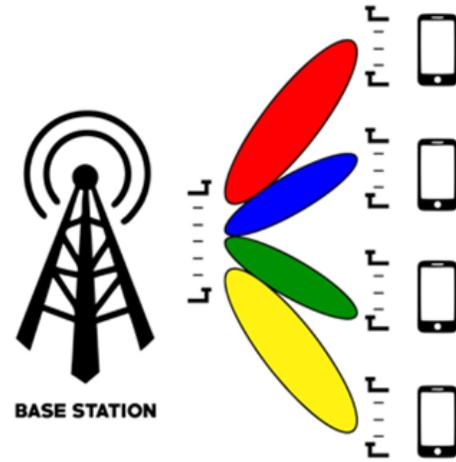
3. Model Sistem dan Perancangan

3.1 Desain Sistem

Pada penelitian ini, sistem dimodelkan dengan dowblink *Time Division Duplex (TDD) Massive MIMO*. Sistem diasumsikan dengan satu BS dan K pengguna. K sebagai banyak pengguna 1,...,K yang bisa dilayani secara bersamaan. Asumsikan bahwa BS dan pengguna dilengkapi dengan N_t yang dinotasikan jumlah antena pada pemancar dan N_r dinotasikan sebagai jumlah antena penerima. Rumus untuk sinyal yang diterima bisa ditulis dengan persamaan

$$Y_k = H_k X_m + n_k, \quad (6)$$

dengan Y_k adalah sinyal yang diterima pada pengguna k, X_m adalah simbol yang ditransmisikan dari antena N_t , H_k adalah matriks kanal dengan dimensi $N_r \times N_t$ yang berisi koefisien kanal bernilai kompleks antara semua antena pengirim dan penerima, dan n_k adalah *Gaussian noise sample* dengan ukuran vektor N_r . Dalam kasus ini diasumsikan pengguna memiliki lebih dari satu antena yang masing-masing antena bekerja sendiri, maka kita dapat menganggap Y_k sebagai sinyal yang diterima dari masing-masing pemancar [8]. Gambar 3 menunjukkan secara sederhana pemodelan dari sistem *Massive MIMO* yang akan digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3. Model Sistem *Massive MIMO*

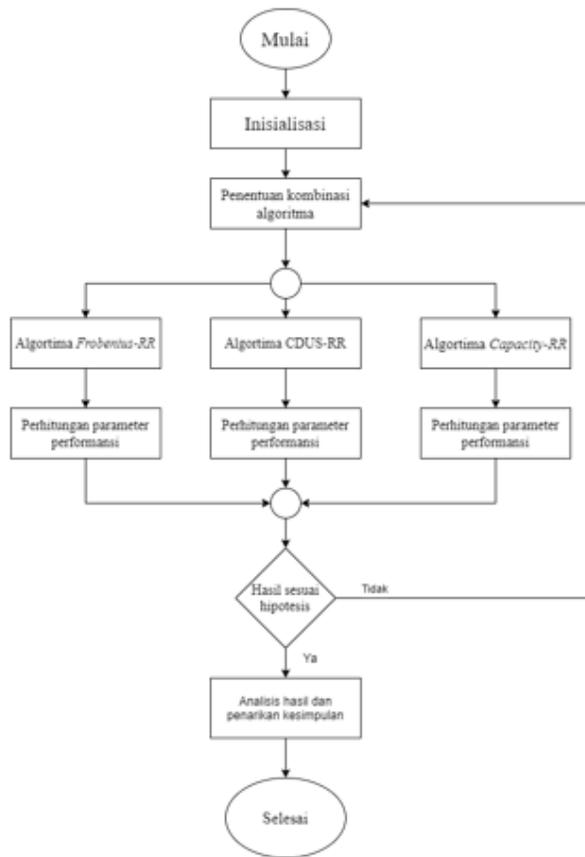
Tabel 1. Parameter Simulasi

No	Parameter	Value
1.	Jumlah Pengguna	64
2.	Jumlah Paket	64
3.	SNR	30 dB
4.	<i>Channel State Information</i>	<i>Perfect CSI</i>
Skenario 1		
5.	Antena Pemancar	16, 32, 64, dan 128
6.	Antena Penerima	4
Skenario 2		
7.	Antena Pemancar	64
8.	Antena Penerima	2, 4, dan 8

3.2 Diagram Alir Sistem

Penelitian ini menggunakan algoritma pemilihan pengguna yaitu Capacity-based, Frobenius norm-based, dan CDUS yang dikombinasikan dengan RR. Kemudian akan dibandingkan tingkat kinerja algoritma dengan algoritma-algoritma sebelum dikombinasikan dengan RR. Proses pemilihan pengguna dilakukan menggunakan 2 skenario yang berbeda, yaitu dengan memvariasikan jumlah antena pada pemancar dan penerima.

Tabel 1 menunjukkan parameter simulasi yang digunakan pada penelitian ini. Pengujian dimulai dari inisiasi jumlah pengguna, jumlah paket data yang ingin dikirimkan, dan jumlah antena pada pemancar dan penerima. Kemudian dilanjutkan dengan menghitung jumlah layanan yang dapat dilayani dalam satu waktu dengan rumus $K = \frac{m}{nr}$. Semua kanal diasumsikan selalu mendapat *perfect Channel State Information (CSI)* dari semua pengguna dan SNR yang akan ditinjau di 30 dB.



Gambar 4. Diagram Alir Simulasi

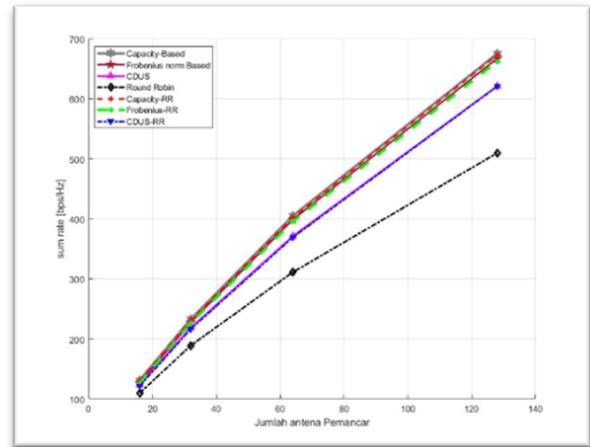
Selanjutnya akan dipilih algoritma pemilihan pengguna yang diusulkan diantara Capacity-RR, Frobenius-RR, dan CDUS-RR. Setelah memilih pengguna yang sudah terlayani maka akan dihitung parameter analisis yaitu sumrate, fairness, dan kompleksitas algoritma. Gambar 4 menunjukkan proses berjalannya simulasi pemilihan pengguna pada sistem Massive MIMO.

4. Hasil dan Analisa Sistem

4.1 Sumrate

Throughput adalah besarnya jumlah bit yang berhasil ditransmisikan dalam setiap detik. Dalam sistem komunikasi digital, besar nilai bandwidth sangat mempengaruhi laju bit yang dapat dikirimkan. Sumrate adalah total throughput yang diperoleh dari penjumlahan throughput di sisi pengguna. Sistem ditinjau berdasarkan hasil kinerja pada dua skenario yang berbeda. Gambar 5 menunjukkan nilai sumrate pada skenario 1 dan gambar 6 menunjukkan nilai sumrate pada skenario 2. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh sumrate pada algoritma yang diusulkan. Tabel 2 menunjukkan hasil sumrate yang diujikan pada setiap skema uji coba.

Tabel 2 menunjukkan hasil simulasi bahwa algoritma Capacity-based User Selection adalah



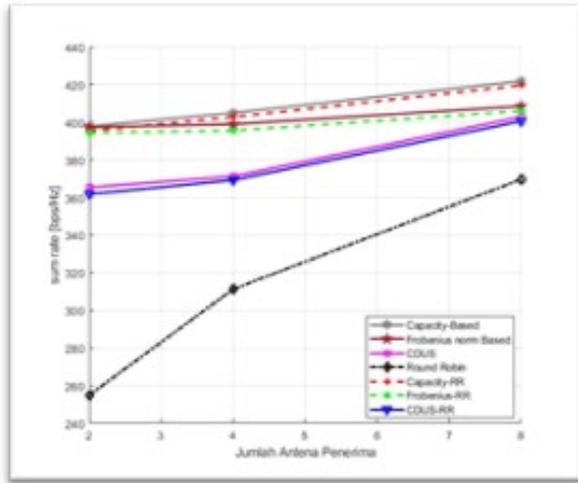
Gambar 5. Perbandingan Sumrate Seluruh Algoritma Pada Skenario 1.

algoritma yang memiliki nilai rata-rata sumrate yang paling baik diantara algoritma lainnya pada skema antena pemancar 128 dan antena penerima berjumlah 4 dengan nilai sumrate 675.2 bps/Hz. Hal ini dapat terjadi karena algoritma Capacity-based memilih pengguna berdasarkan throughput tertinggi. Algoritma yang diusulkan tidak dapat meningkatkan kinerja pada sumrate tetapi nilai sumrate mendekati nilai dari algoritma aslinya. Algoritma pemilihan pengguna yang diusulkan memberikan beragam sumrate yang berbeda dari algoritma sebelumnya dan selalu lebih tinggi dari algoritma RR. Tabel 2 menunjukkan semakin banyak jumlah antena pada pemancar maupun penerima, maka nilai sumrate akan semakin tinggi. Hal ini terlihat dari kenaikan nilai sumrate pada variasi jumlah antena yang diperbanyak.

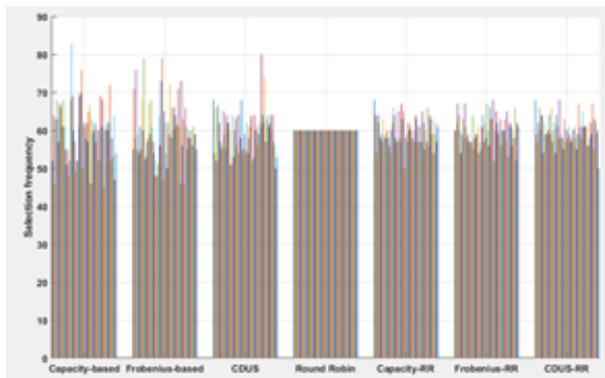
4.2 Fairness

Fairness adalah ukuran seberapa adilnya suatu pengguna menerima layanan. Adil dalam penelitian ini diartikan bahwa semua pengguna menerima jumlah layanan yang sama tanpa mempertimbangkan hal lain. Standar deviasi adalah ukuran yang digunakan untuk mengukur jumlah variasi atau sebaran sejumlah nilai data. Semakin rendah nilai standar deviasi, maka nilai semakin mendekati rata-rata, sedangkan jika nilai standar deviasi semakin tinggi maka nilai semakin lebar rentang variasi datanya. Gambar 7 menunjukkan fairness pemilihan pengguna pada skenario 1 dan gambar 8 menunjukkan fairness pemilihan pengguna pada skenario 2. Tabel 3 menunjukkan nilai standar deviasi pada setiap algoritma.

Tabel 3 menunjukkan hasil simulasi bahwa algoritma RR merupakan algoritma yang paling adil di antara algoritma lainnya. Hal ini dapat terjadi karena



Gambar 6. Perbandingan Sumrate Seluruh Algoritma Pada Skenario 2



Gambar 7. Perbandingan Fairness Seluruh Algoritma Pada Skenario 1

algoritma RR membagi waktu setiap proses pada porsi yang sama dan membagi beban secara bergiliran dari satu pengguna ke pengguna lain sehingga akan membentuk satu putaran. Hasil kombinasi algoritma pemilihan pengguna dengan RR menjadikan pemilihan pengguna memiliki *fairness* yang lebih adil dari algoritma sebelumnya dengan nilai *sumrate* yang mendekati algoritma aslinya. Jika dibandingkan dengan algoritma aslinya, algoritma Capacity-RR memiliki nilai rata-rata *fairness* lebih besar 43.59%, algoritma Frobenius-RR memiliki nilai rata-rata *fairness* lebih besar 48.74%, dan CDUS-RR memiliki nilai rata-rata *fairness* lebih besar 43.95%.

4.3 Kompleksitas Algoritma Pemilihan Pengguna

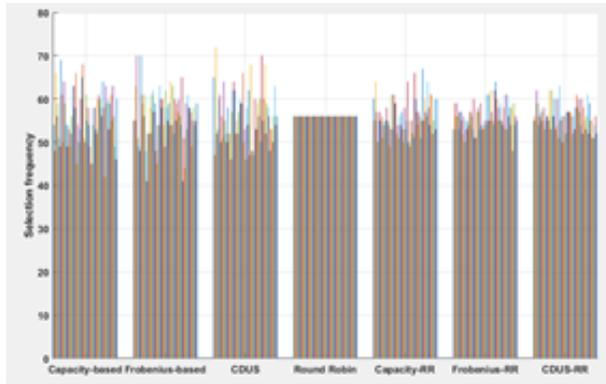
Algoritma yang bagus adalah algoritma yang efisien. Efisiensi suatu algoritma diukur dari berapa

Tabel 2. Perbandingan Hasil Sumrate Seluruh Skenario

Sumrate (N _r , N _t)	Algoritma			
	CDUS	CDUS-RR	Frobenius-based	Frobenius-RR
(4,16)	123.7 bps/Hz	121.6 bps/Hz	126.7 bps/Hz	125.9 bps/Hz
(4,32)	218.8 bps/Hz	216.7 bps/Hz	227.8 bps/Hz	226.3 bps/Hz
(2,64)	365.4 bps/Hz	361.8 bps/Hz	397.3 bps/Hz	394.4 bps/Hz
(4,64)	371.3 bps/Hz	369.3 bps/Hz	398.9 bps/Hz	395.5 bps/Hz
(8,64)	402.8 bps/Hz	400.5 bps/Hz	408.6 bps/Hz	406 bps/Hz
(4,128)	621.2 bps/Hz	620.8 bps/Hz	667.2 bps/Hz	662.2 bps/Hz
Sumrate (N _r , N _t)	Capacity-based	Capacity-RR	RR	
(4,16)	131.1 bps/Hz	130.4 bps/Hz	109.8 bps/Hz	
(4,32)	232.8 bps/Hz	231.1 bps/Hz	189.1 bps/Hz	
(2,64)	397.7 bps/Hz	395.4 bps/Hz	254.9 bps/Hz	
(4,64)	405 bps/Hz	402.8 bps/Hz	311.3 bps/Hz	
(8,64)	421.9 bps/Hz	419.6 bps/Hz	369.7 bps/Hz	
(4,128)	675.2 bps/Hz	673 bps/Hz	509.8 bps/Hz	

jumlah waktu dan ruang (*space*) memori yang dibutuhkan untuk menjalankannya. Penelitian ini menggunakan kompleksitas waktu untuk menganalisis kompleksitas algoritma. Kompleksitas waktu adalah jumlah waktu yang dibutuhkan oleh suatu algoritma untuk berjalan sebagai fungsi. Kompleksitas waktu menghitung runtime dari algoritma menggunakan aplikasi Matlab seri R2018a pada laptop ROG Strix GL503GE dengan processor Intel(R) Core (TM) i7-8750H, RAM sebesar 8 Gb. Runtime dilakukan sebanyak lima kali dan diambil rata-rata untuk runtime pada algoritma yang digunakan.

Tabel 4 menunjukkan hasil runtime dari algoritma untuk menjalankan fungsi. Tabel 4 menunjukkan algoritma RR merupakan algoritma dengan kompleksitas paling rendah diantara algoritma lainnya dari seluruh skema yang dibuat. Hal ini terjadi karena algoritma RR merupakan algoritma penjadwalan yang paling sederhana dalam sistem operasi. Semakin besar jumlah K semakin kompleks algoritma pemilihan pengguna. Jika nilai K sama, maka yang menentukan kompleksitas lebih tinggi adalah banyaknya antena pada sisi pemancar maupun penerima. Hal ini dikarenakan jumlah *beam* yang dipancarkan maupun yang diterima lebih banyak dari antena yang jumlahnya lebih sedikit. Tabel 4 juga menunjukkan dengan mengkombinasikan algoritma RR, seluruh algoritma yang diusulkan mendapatkan tingkat kompleksitas yang lebih rendah dari algoritma aslinya



Gambar 8. Perbandingan *Fairness* Seluruh Algoritma Pada Skenario 2

Tabel 3. Perbandingan hasil *fairness* seluruh Skenario

Algoritma	Skenario 1	Skenario 2	Rata-Rata
	Standar Deviasi	Standar Deviasi	
Capacity-based	7.58	6.14	6.86
Capacity-RR	3.62	4.12	3.87
Frobenius-based	7.56	5.93	6.75
Frobenius-RR	3.77	3.15	3.46
CDUS	5.59	6.14	5.87
CDUS-RR	3.56	3.02	3.29
RR	0	0	0

dengan nilai *sumrate* yang lebih baik dari RR.

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah mengusulkan kombinasi algoritma pemilihan pengguna pada sistem *Massive MIMO*. Algoritma yang diusulkan adalah *Capacity-Based User Selection*, *Frobenius Norm-based User Selection*, dan CDUS yang dikombinasikan dengan RR pada sistem *downlink TDD Massive MIMO*. Sistem ini menggunakan *perfect CSI* untuk mengumpulkan informasi saluran dari setiap pengguna.

Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma pemilihan pengguna yang dikombinasikan dengan RR mampu memberikan kinerja yang baik pada *fairness* pemilihan pengguna. Algoritma pemilihan pengguna yang diusulkan mampu memperbaiki *fairness* Capacity-based sebesar 43.59%, algoritma *Frobenius norm-based* sebesar 48.74%, dan CDUS sebesar 43.95%. Algoritma yang diusulkan juga mampu memberikan kompleksitas lebih rendah dari algoritma yang diusulkan.

Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma yang dikombinasikan dengan RR tidak mampu meningkatkan *sumrate* dari algoritma aslinya. Akan tetapi nilai *sumrate*

Tabel 4. Perbandingan Hasil Runtime Seluruh Skenario.

Algoritma	Runtime (N_r, N_t)		
	(4,16)	(4,32)	(8,64)
Capacity-based	4.43 s	34.57 s	115.22 s
Capacity-RR	3.81 s	27.33 s	99.25 s
Frobenius-based	1.76 s	17.21 s	69.51 s
Frobenius-RR	1.43 s	14.87 s	49.69 s
CDUS	0.71 s	1.99 s	5.47 s
CDUS-RR	0.62 s	1.65 s	4.59 s
RR	0.24 s	0.36 s	1.002 s

dari algoritma yang diusulkan mendekati nilai *sumrate* dari algoritma aslinya. Algoritma yang diusulkan mempunyai nilai *sumrate* lebih tinggi dari algoritma RR. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam pengembangan penjadwalan pengguna pada *Massive MIMO* dengan memberikan nilai *fairness* yang baik, kompleksitas yang rendah, dan saat bersamaan memberikan rata-rata nilai *sumrate* yang baik.

Daftar Pustaka

- [1] Kentaro Nishimori, "Novel technologies using massive MIMO transmission toward 5G and its beyond systems," ISAP 2018 - 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), ISBN:978-89-5708-304-8, Oktober, 2018.
- [2] H. Wu, D. Liu, W. Wu, C. Na, and M. Liu, "A low complexity two-stage user scheduling scheme for MmWave massive MIMO hybrid beamforming systems," 2017 3rd IEEE Int. Conf. Comput. Commun. ICC3 2017, vol. 2018-Janua, pp. 945–951, 2018, doi: 10.1109/CompComm.2017.8322683.
- [3] Y. Dong, Y. Tang, and K. Zhang, "Improved Joint Antenna Selection and User Scheduling for Massive MIMO Systems," Beijing Youdian Daxue Xuebao/Journal Beijing Univ. Posts Telecommun., vol. 40, no. 3, pp. 69–74, 2017.
- [4] D. P. Setiawan and H. Zhao, "A Fair User Selection Algorithm for Multi-User Massive MIMO System," J. Adv. Res. Electr. Eng., vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2018.
- [5] E. Nandar Maung, Y. Shimbo, H. Suganuma, F. Maehara, "Low Complexity Fair User Scheduling Employing Spatial Orthogonality for MU-MIMO Systems," 2019 26th International Conference on Telecommunications (ICT), April, 2019, 10.1109/ICT.2019.8798834 .

- [6] K. Samdanis and T. Taleb, "The Road beyond 5G: A Vision and Insight of the Key Technologies," *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 2, pp. 135–141, 2020, doi: 10.1109/MNET.001.1900228.
- [7] V. Noviana Sulistyawan, R. Pudji Astuti, and A. Fahmi, "Location-dependent User Selection Based on Sum Rate Approximation in Large System Regime for *Massive* MIMO," *MATEC Web Conf.*, vol. 218, 2018, doi:
- [8] Jinseok Choi, Gilwon Lee, Brian L. Evans, "User Scheduling for Millimeter Wave Hybrid *Beamforming* Systems With Low-Resolution ADCs", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.18, no.4, pp.2401-2414, 2019.