

**ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA UFMC DAN OFDM DENGAN
MODULASI 64-QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G**

SKRIPSI

diajukan untuk memenuhi sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Sistem Telekomunikasi



Oleh
Winda Pratiwi
1905910

**PROGRAM STUDI SISTEM TELEKOMUNIKASI
KAMPUS UPI DI PURWAKARTA
UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA
2023**

ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA UPMC DAN OFDM DENGAN MODULASI 64-QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G

Oleh

Winda Pratiwi

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik pada Program Studi Telekomunikasi

© Winda Pratiwi 2023
Universitas Pendidikan Indonesia
Agustus 2023

Hak Cipta dilindungi undang-undang.
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,
dengan dicetak ulang, difoto kopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis.

ii

LEMBAR PENGESAHAN

**Winda Pratiwi
1905910**

**ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA UPMC DAN OFDM DENGAN
MODULASI 64-QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G**


Disetujui dan Disahkan Oleh Pembimbing,

Pembimbing I,



**Endah Setyowati, S.T., M.T
NIP. 920190219920908201**

Pembimbing II,



**Hafiyyan Putra Pratama, S.St., M.T
NIP. 920190219921224101**

Mengetahui,

**Ketua Program Studi
Sistem Telekomunikasi**



**Galura Muhammad Suranegara, S.Pd., M.T.
NIP. 920190219920111101**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi dengan judul **ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA UFMC DAN OFDM DENGAN MODULASI 64-QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G** ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Purwakarta, Agustus 2023

Penulis,



Winda Pratiwi

1905910

KATA PENGANTAR

Segala puji serta syukur ke hadirat Allah Swt. atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA UPMC DAN OFDM DENGAN MODULASI 64-QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G** dengan tepat waktu. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan tahap sarjana Program Studi Sistem Telekomunikasi, Universitas Pendidikan Indonesia.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, hal ini diakibatkan oleh keterbatasan ilmu dan pengalaman yang dimiliki penulis. Oleh karena itu, untuk memperbaiki skripsi ini, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan untuk menyempurnakan skripsi ini.

Dengan segala hormat, penulis memohon maaf apabila ada kesalahan dalam pembuatan buku skripsi ini, baik yang disengaja maupun yang tidak disengaja. Semoga skripsi ini dapat dikembangkan menjadi lebih baik dan dapat bermanfaat untuk penulis, pembaca, dan instansi pendidikan di masa yang akan datang.

Purwakarta, Agustus 2023

Penulis,



Winda Pratiwi

1905910

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan atas kehadiran Allah Swt. atas berkat dan rahmat yang telah dilimpahkan oleh-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Selesaiannya penulisan skripsi ini tidak akan pernah tercapai jika tidak ada dukungan, dan partisipasi, serta motivasi baik langsung maupun tidak langsung, dari semua pihak yang telah membantu penulis. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, izinkan penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Allah Swt. yang telah memberikan semua rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Ibu Endah Setyowati, S.T., M.T, selaku dosen wali sekaligus dosen pembimbing I, yang telah menginspirasi dan selalu memberikan kesempatan kepada penulis untuk melakukan berbagai pengalaman selama masa perkuliahan hingga proses pengerjaan skripsi ini yang selalu bersedia meluangkan waktunya untuk membimbing, memberikan masukan, serta dorongan kepada penulis dalam menyempurnakan skripsi ini.
3. Bapak Hafiyyan Putra Pratama, S.St., M.T, selaku dosen pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan, saran, serta motivasi kepada penulis selama proses menyelesaikan skripsi ini.
4. Seluruh dosen dan tenaga pendidik Program Studi Sistem Telekomunikasi Kampus UPI di Purwakarta yang tidak dapat disebutkan satu-persatu, yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan motivasinya kepada penulis semasa perkuliahan, sehingga penulis dapat berani dan terus menempuh pendidikannya hingga selesai.
5. Kedua orang tua penulis. Ibu Dewi Kartika yang selalu percaya atas setiap keputusan dan langkah yang ditempuh penulis. Bapak Setio Adi Pranomo yang telah memberikan kebebasan kepada penulis untuk menempuh pendidikan tinggi ini. Terima kasih sudah berjuang bersama penulis.
6. Adik-adik penulis tersayang, Pusan Sanjaya, Avianza Winahyu, dan Diana Aryani yang sudah sama-sama ikut berjuang selama menempuh

pendidikannya masing-masing. Semoga salah satu langkah penulis, sebagai seorang kakak ini dapat memberikan rasa semangat dan kebahagiaan kepada kalian untuk selalu berani dan terus belajar selama kita menjalankan kehidupan ini.

7. Seluruh rekan-rekan SISTEL Angkatan 2019 yang selama perkuliahan ini menjadi teman berjuang dan bertumbuh bersama penulis. Terkhusus Titania Emaniar, teman seataap-sejuang sejak maba sampai daftar sidang skripsi bersama, dan juga Zamzam Kholidatuzzahra, *partner* kejar tayang di setiap proyek-proyek perkuliahan. Terima kasih dan maaf untuk segala cerita yang ditoreh selama kita berproses di perkuliahan ini.
8. Himpunan Mahasiswa Sistem Telekomunikasi (HMST), Korps Sukarela (KSR) PMI Unit UPI Purwakarta, dan Lingkar Indonesia Pintar UPI Purwakarta yang menjadi salah satu ruang berorganisasi bagi penulis, sehingga dapat mengembangkan kemampuan diri penulis selama masa perkuliahan ini.
9. Untuk Winda yang saat itu berusia 17 tahun dan baru mengenal dunia, terima kasih sudah memutuskan jalan ini. Karenamu, dia kini semakin bertumbuh, dan dapat mengenal, serta mencintai dirinya sendiri.
10. Seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu-persatu namanya yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, semoga Allah Swt. Membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu penulis dalam proses menyelesaikan skripsi ini. Dan semoga dapat bermanfaat khususnya bagi penulis, umumnya bagi semua yang memanfaatkannya.

ANALISIS PERBANDINGAN KINERJA UFMC DAN OFDM DENGAN MODULASI 64-QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G

Winda Pratiwi

1905910

ABSTRAK

Hadirnya teknologi 5G memungkinkan adanya evolusi teknik transmisi data baru. OFDM merupakan skema modulasi *multicarrier* pertama yang telah digunakan pada sistem komunikasi digital. Adapun skema modulasi UFMC yang menjadi salah satu rekomendasi skema modulasi *multicarrier* baru untuk sistem komunikasi 5G yang menerapkan pemfilteran per *sub-band* alih-alih menggunakan *cyclic prefix*. Untuk itu penelitian ini akan melakukan penilaian secara komparatif antara sistem komunikasi dengan OFDM dan UFMC menggunakan modulasi 64-QAM dan 256-QAM untuk mengetahui performansi terbaik pada sistem komunikasi 5G dengan parameter umum sesuai dengan *Key Performance Indicators* untuk *physical layer* (PHY) 5G, yaitu BER dengan target 10^{-4} terhadap SNR, PAPR terhadap CCDF, dan besar emisi OOB pada PSD. Hasilnya menunjukkan sistem komunikasi dengan OFDM lebih baik dibandingkan dengan UFMC menggunakan modulasi 64-QAM dengan nilai SNR sebesar 22,14 dB dan nilai PAPR sebesar 9,03 dB. Nilai performansi OFDM juga semakin baik ketika digunakan pengkodean LDPC, dengan nilai SNR yang didapat adalah 21,83 dB. Sementara, untuk sistem komunikasi dengan UFMC hanya unggul pada penggunaan filter per *sub-band* yang dapat mengurangi emisi OOB mencapai nilai -80 dB.

Kata kunci: OFDM, UFMC, BER, SNR, performansi, 5G

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF UFMC AND OFDM USING 64-QAM AND 256-QAM IN 5G COMMUNICATION SYSTEMS

Winda Pratiwi

1905910

ABSTRACT

The existence of 5G technology allows for the evolution of new data transmission techniques. OFDM is the first multicarrier modulation scheme that has been used in digital communication systems. The UFMC modulation scheme is one of the recommendations for a new multicarrier modulation scheme for 5G communication systems that applies filtering per sub-band instead of using cyclic prefixes. For this reason, this study will carry out a comparative assessment between communication systems with OFDM and UFMC using 64-QAM and 256-QAM modulation to determine the best performance on a 5G communication system with general parameters according to the Key Performance Indicators for the 5G physical layer (PHY), namely BER with a target of 10^{-4} to SNR, PAPR to CCDF, and OOB emission size to PSD. The results show that the communication system with OFDM is better than UFMC using 64-QAM modulation with an SNR value of 22.14 dB and a PAPR value of 9.03 dB. The OFDM performance value is also getting better when LDPC coding is used, with the SNR value obtained is 21.83 dB. Meanwhile, the communication system with UFMC only excels in the use of filters per sub-band which can reduce OOB emissions to a value of -80 dB.

Keyword: OFDM, UFMC, BER, SNR, performance, 5G

DAFTAR SINGKATAN

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G	<i>5-Generation</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
CCDF	<i>Complementary Cumulative Distribution Function</i>
CFO	<i>Carrier Frequency Offset</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
D2D	<i>Device to Device</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FBMC	<i>Filter Bank Multicarrier</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIR	<i>Finite Impulse Response</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GFDM	<i>Generalized Frequency Division Multiplexing</i>
ICI	<i>Inter Carrier Interference</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
LDPC	<i>Low Density Parity Check</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
NOMA	<i>NonOrthogonal Multiple Access</i>
OOB	<i>Out-of-Band</i>

OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OMA	<i>Orthogonal Multiple Access</i>
P/S	<i>Parallel to Serial</i>
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i>
PSD	<i>Power Spectral Density</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
S/P	<i>Serial to Parallel</i>
SE	<i>Spectrum Efficiency</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TD	<i>Time Delay</i>
UFMC	<i>Universal-Filtered Multicarrier</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>

DAFTAR ISI

LEMBAR HAK CIPTA	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
SURAT PERNYATAAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vi
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR SINGKATAN.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penulisan Skripsi.....	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Kajian Penelitian yang Relevan.....	7
2.2 Sistem Komunikasi Digital.....	10
2.3 Modulasi Digital	11
2.4 Sistem Modulasi <i>Multicarrier</i>	12
2.5 Kanal Transmisi.....	15
2.6 <i>Channel Coding</i>	15
BAB III METODE PENELITIAN.....	17
3.1 Desain Penelitian	17
3.2 Analisis Kebutuhan Penelitian.....	17
3.3 Perancangan Sistem.....	18

3.4 Pengujian Sistem	26
3.5 Tempat Penelitian	30
3.6 Waktu Penelitian	31
BAB IV _HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Validasi Sistem Komunikasi UFMC dan OFDM.....	31
4.2 Sinyal <i>M</i> -QAM melalui Tahap <i>Transmitter</i> dan <i>Receiver</i>	31
4.3 Analisis <i>Power Spectral Density</i> (PSD) pada Skema UFMC dan OFDM..	33
4.4 Analisis Nilai <i>Peak to Average Power Ratio</i> pada UFMC dan OFDM	35
4.5 Analisis Hasil Pengujian Skenario I	36
4.6 Analisis Hasil Pengujian Skenario II.....	38
4.7 Analisis Perbandingan Hasil Pengujian Skenario I dan II.....	39
4.8 Analisis Hasil Pengujian Skenario III	41
BAB V SIMPULAN, IMPLIKASI, DAN REKOMENDASI	42
5.1 Simpulan.....	42
5.2 Implikasi	43
5.3 Rekomendasi	43
DAFTAR PUSTAKA	44
DAFTAR LAMPIRAN.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Komparasi Penelitian yang Revelan Sebelumnya	9
Tabel 3.1	Parameter Rancangan Skema <i>Multicarrier</i> OFDM dan UFMC.	19
Tabel 3.2	Modulasi QAM	20
Tabel 3.3	Modulasi OFDM	21
Tabel 3.4	<i>Add Cyclic Prefix</i>	21
Tabel 3.5	<i>Remove Cyclic Prefix</i>	22
Tabel 3.6	Demodulasi OFDM	22
Tabel 3.7	Demodulasi QAM	23
Tabel 3.8	Fungsi MATLAB dengan Parameter untuk Skema Modulasi UFMC	24
Tabel 3.9	Parameter Kanal	25
Tabel 3.10	Model Kanal AWGN	25
Tabel 3.11	Nilai Kualitas Sistem Komunikasi Berdasarkan BER	27
Tabel 3.12	Pengujian Skenario I	28
Tabel 3.13	Pengujian Skenario II	29
Tabel 3.14	Pengujian Skenario III	29
Tabel 3.15	LDPC <i>Encoder</i>	30
Tabel 3.16	LDPC <i>Decoder</i>	30
Tabel 3.17	Jadwal Kegiatan Penelitian	31
Tabel 4.1	Hasil pengirim atau simbol transmisi (Tx) sebelum penggunaan IFFT	32
Tabel 4.2	Hasil <i>receiver</i> atau simbol penerima (Rx) setelah penggunaan FFT	33
Tabel 4.3	Nilai emisi OOB dalam domain frekuensi pada <i>transmitter</i> OFDM dan UFMC	35
Tabel 4.4	Nilai PAPR pada sistem OFDM dan UFMC	36
Tabel 4.5	Nilai SNR untuk mencapai BER 10^{-4} dari Skenario I	37
Tabel 4.6	Nilai SNR untuk mencapai BER 10^{-4} dari Skenario II	38
Tabel 4.7	Nilai SNR untuk mencapai BER 10^{-4} dari Skenario I dan II	39
Tabel 4.8	Nilai SNR untuk mencapai BER 10^{-4} dari Skenario III	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram Konstelasi <i>Square</i> QAM, direproduksi dari (Pfau & Noe, 2009).....	12
Gambar 2.2	Operasi filter pada OFDM dan UFMC, direproduksi dari (Sakkas., 2021).....	14
Gambar 3.1	Flowchart Desain Penelitian	17
Gambar 3.2	Blok Diagram Perancangan Sistem Penelitian	18
Gambar 3.3	Blok Konfigurasi Sistem Komunikasi dengan OFDM.....	19
Gambar 3.4	Blok Konfigurasi Sistem dengan UFMC.....	24
Gambar 4.2	PSD bentuk gelombang OFDM dengan 3200 <i>subcarrier</i> (a) dengan modulasi 64-QAM, dan (b) dengan modulasi 256-QAM.....	34
Gambar 4.3	PSD bentuk gelombang UFMC dengan 25 <i>sub-band</i> (a) dengan modulasi 64-QAM, dan (b) dengan modulasi 256-QAM.....	34
Gambar 4.4	Nilai PAPR terhadap CCDF (a) pada OFDM, dan (b) pada UFMC	36
Gambar 4.5	Grafik Hasil Pengujian Skenario I	37
Gambar 4.6	Grafik Hasil Pengujian Skenario II.....	38
Gambar 4.7	Hasil Perbandingan Kinerja Sistem Komunikasi dengan UFMC dan OFDM	40
Gambar 4.8	Hasil Kinerja Sistem Komunikasi dengan OFDM menggunakan Pengkodean LDPC dan tanpa menggunakan pengkodean.....	41

DAFTAR PUSTAKA

- Aksara, D. T., Satriya, A. B., & Setiabudi, D. (2020). Analisis Perbandingan BER dan PAPR dalam Transmisi Citra pada Sistem 4G LTE. *Jurnal Arus Elektro Indonesia*, 6(1), 17-21.
- Budiyanto, S. (2012). Simulasi Penghitungan Bit Error Rate dengan Pengkodean Hamming. *digilib.mercubuana.ac.id*
- Bharati, S., Rahman, M. A., & Podder, P. (2020). Implementation of ASK, FSK and PSK with BER vs. SNR comparison over AWGN channel. *arXiv preprint arXiv:2002.03601*.
- Cai, Y., Qin, Z., Cui, F., Li, G. Y., & McCann, J. A. (2018). Modulation and Multiple Access for 5G Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 629–646. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2766698>
- Carlson, A. B., & Crilly, P. B. (2010). *Communication systems: An introduction to signals and noise in electrical communication* (5th ed). McGraw-Hill Higher Education.
- Carrubba, G. L. (2018). Test of 5G multicarrier schemes using Software Defined Radio. *Thesis, Politecnico Di Torino*.
- Cisco. (2020). Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. *Cisco: San Jose, CA, USA*, 10(1), 1-35.
- Cristian. (2023). UFMC vs OFDM (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/107774-ufmc-vs-ofdm>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 24, 2023.
- CloudRF. (2019). Modelling the Bit Error Rate (BER). [Online] Diakses pada Februari 5, 2023 : <https://cloudf.com/modelling-the-bit-error-rate-ber/>
- Esenogho, E., Djouani, K., & Kurien, A. M. (2022). Integrating Artificial Intelligence Internet of Things and 5G for Next-Generation Smartgrid: A Survey of Trends Challenges and Prospect. *IEEE Access*, 10, 4794–4831. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140595>
- Fernando, B., Karna, N. B. A., & Fahmi, A. (2020). Eksperimen Frekuensi Menggunakan Implementasi Modulasi Digital pada Sistem Komunikasi di Bawah Laut. *e-Proceeding of Engineering*, 7, 9044–9052.

- Ilmiawan, S. (2011). Perbandingan Kinerja LDPC pada Kanal AWGN dengan Modulasi QPSK dan BPSK. *EEPIS-ITS Institut, Teknologi Sepuluh Nopember*, 1–6.
- Nasution, A. S., Gustiandi, B., & Widipaminto, A. (2011). Penggunaan Teknik Pengkodean Low Density Parity Check pada Data Satelit Penginderaan Jauh. In *Prosiding SIPTEKGAN XV-2011 Seminar Nasional IPTEK Dirgantara XV Tahun 2011* (pp. 478-489). Pusat Teknologi Penerbangan.
- Ni'amah, K., Praja, M. P. K., & Marimbun, Y. D. (2022). Analisis Perbandingan Modulasi 16-QAM Dan 64-QAM Pada Kanal Additive White Gaussian Noise Dan Rayleigh Fading. *CESS (Journal of Computer Engineering, System and Science)*, 7(1), 90–98.
- Patil, M. V., Pawar, S., & Saquib, Z. (2020). Coding Techniques for 5G Networks: A Review. *2020 3rd International Conference on Communication System, Computing and IT Applications (CSCITA)*, 208–213. <https://doi.org/10.1109/CSCITA47329.2020.9137797>
- Pfau, T., Hoffmann, S., & Noe, R. (2009). Hardware-Efficient Coherent Digital Receiver Concept With Feedforward Carrier Recovery for M-QAM Constellations. *Journal of Lightwave Technology*, 27(8), 989–999. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2010511>
- Rochmatika, R. A. (2018). Implementasi Channel Coding Untuk Mitigasi Efek Doppler Pada OFDM Dengan Modulasi Adaptif Untuk Vanet. *Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Sakkas, L., Stergiou, E., Tsoumanis, G., & Angelis, C. T. (2021). 5G UFMC Scheme Performance with Different Numerologies. *Electronics*, 10(16), 1–9. <https://doi.org/10.3390/electronics10161915>
- Sidram, B. M., Mithun, T. P., & Madhukar, M. (2013). BER, SNR, PAPR Analysis for Multiple Accesses in LTE. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(7), 773–777.
- Sim, Z. A. (2020). PAPR Reduction in Multicarrier Communication Systems Using Efficient Pulse Shaping Technique. *Doctoral Dissertation, Curtin University*.

- Taher, M. A. (2019). Enhanced 5G Throughput using UFMC Multiplexing. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 54(5), 1–11. <https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.5.25>
- Tran, V. (2020). Evaluation of LDPC Coding Technique to OFDM System. *Doctoral dissertation, California State Polytechnic University, Pomona.*
- Wulansari, E. (2017). *Analisis Kinerja Teknik Linear Precoding Block Diagonalization Pada Sistem Multi User Mimo-Gfdm Menggunakan Detektor Mmse.* Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wei, S., Li, H., Zhang, W., & Cheng, W. (2019). A Comprehensive Performance Evaluation of Universal Filtered Multi-Carrier Technique. *IEEE Access*, 7, 81429–81440. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2923774>