

ANALISIS KOMPARATIF BENTUK GELOMBANG OFDM DAN FBMC UNTUK KOMUNIKASI NIRKABEL 5G YANG DITINGKATKAN DAN 6G DI MASA DEPAN

Majd Sultan Ahmed Al-muntaser¹, Yuliarman Saragih², Insani Abdi³
Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang
¹2210631160113@student.unsika.ac.id, ²yuliarman@staff.unsika.ac.id, ³
labdi.bangsa@ft.unsika.ac.id

ABSTRAK

Evolusi pesat sistem komunikasi nirkabel dari 1G ke 5G telah menciptakan peningkatan permintaan akan laju data yang lebih tinggi, latensi yang lebih rendah, efisiensi spektral yang lebih baik, dan keandalan yang ditingkatkan. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) telah diadopsi sebagai bentuk gelombang dasar untuk sistem nirkabel modern karena ketahanannya terhadap pelemahan multipath dan kesederhanaan implementasinya. Namun, beberapa keterbatasan, termasuk emisi di luar pita yang tinggi, overhead prefiks siklik, dan efisiensi spektral yang berkurang, telah memotivasi eksplorasi teknologi bentuk gelombang alternatif untuk jaringan generasi keenam (6G) di masa mendatang. Studi ini menyajikan analisis komparatif bentuk gelombang Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dan Filter Bank Multicarrier (FBMC) untuk komunikasi nirkabel yang ditingkatkan dalam jaringan 5G dan seterusnya. Pendekatan penelitian pustaka kualitatif yang dikombinasikan dengan analisis berbasis simulasi digunakan dengan memanfaatkan temuan dari investigasi berbasis MATLAB sebelumnya yang dilakukan di lingkungan nirkabel dalam ruangan, pedesaan, dan perkotaan. Metrik kinerja termasuk Bit Error Rate (BER), Signal-to-Noise Ratio (SNR), latensi, throughput, dan efisiensi spektral diperiksa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FBMC memberikan efisiensi spektral yang superior, latensi yang lebih rendah, dan peningkatan penahanan spektral karena penghapusan awalan siklik dan penerapan penyaringan subcarrier. Sebaliknya, OFDM menunjukkan kompleksitas implementasi yang lebih rendah dan mempertahankan kinerja yang kuat dalam kondisi penerapan praktis. Studi ini menyimpulkan bahwa meskipun OFDM tetap menjadi bentuk gelombang pilihan untuk penerapan 5G saat ini, FBMC merupakan kandidat yang menjanjikan untuk sistem 6G di masa mendatang di mana efisiensi spektral dan latensi ultra-rendah merupakan persyaratan penting.

Kata kunci: OFDM, FBMC, Jaringan 5G, Jaringan 6G, Efisiensi Spektral, Komunikasi Nirkabel, Analisis Bentuk Gelombang

The rapid evolution of wireless communication systems from 1G to 5G has driven the demand for higher data rates, lower latency, improved spectral efficiency, and enhanced resolution. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has been adopted as the fundamental waveform for modern wireless systems due to its robustness against multipath fading and ease of implementation. However, certain limitations—including high out-of-band emissions, cyclic prefix overhead, and reduced spectral efficiency—have motivated the exploration of alternative waveform technologies for future sixth-generation (6G) networks. This study presents a comparative analysis of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and Filter Bank Multicarrier (FBMC) waveforms for enhanced wireless communication in 5G networks and beyond. A qualitative literature review combined with simulation-based analysis was employed, utilizing findings from previous MATLAB-based investigations conducted in indoor, rural, and urban wireless environments. Performance metrics such as Bit Error Rate (BER), Signal-to-Noise Ratio (SNR), latency, throughput, and spectral efficiency were examined. The results indicate that FBMC offers superior spectral efficiency and lower latency, largely due to the elimination of the cyclic prefix and the implementation of subcarrier filtering. Conversely, OFDM demonstrates lower implementation complexity and maintains robust performance under practical deployment

conditions. The study concludes that while OFDM remains the preferred waveform for current 5G deployments, FBMC is a promising candidate for future 6G systems where spectral efficiency and ultra-low latency are critical requirements.

Keywords: OFDM, FBMC, 5G Networks, 6G Networks, Spectral Efficiency, Wireless Communication, Waveform Analysis

PENDAHULUAN

Sejak munculnya sistem komunikasi analog generasi pertama (1G), komunikasi seluler telah berkembang secara progresif melalui jaringan digital 2G, teknologi internet seluler 3G, komunikasi pita lebar 4G, dan generasi sistem nirkabel 5G saat ini (Andrews et al., 2014; Dahlman et al., 2020). Setiap generasi telah memperkenalkan peningkatan signifikan dalam kecepatan transmisi, keandalan, kapasitas jaringan, dan kualitas layanan (Andrews et al., 2014; Letaief et al., 2019). Munculnya jaringan 5G telah memperkenalkan paradigma komunikasi baru yang dirancang untuk mendukung Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC), dan Massive Machine-Type Communications (mMTC) (Dahlman et al., 2020; 3GPP, 2020). Layanan-layanan ini membutuhkan sistem komunikasi yang mampu memberikan throughput tinggi, latensi minimal, konektivitas luas, dan pemanfaatan spektrum yang efisien (Dahlman et al., 2020; Letaief et al., 2019). Akibatnya, desain bentuk gelombang telah menjadi salah satu aspek terpenting dalam penelitian komunikasi nirkabel modern (Banelli et al., 2014; Letaief et al., 2019).

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) telah menjadi teknologi gelombang dominan untuk sistem komunikasi nirkabel kontemporer, termasuk Wi-Fi, LTE, dan 5G New Radio (NR) (Dahlman et al., 2020; Farhang-Boroujeny, 2011; 3GPP, 2020). Keberhasilan OFDM terutama disebabkan oleh kemampuannya untuk mengurangi pelemahan multipath, memanfaatkan subcarrier ortogonal secara efisien, dan menyederhanakan ekualisasi melalui pemrosesan berbasis Fast Fourier Transform (FFT) (Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024). Terlepas dari

keunggulan ini, OFDM memiliki beberapa keterbatasan, termasuk emisi di luar pita yang tinggi, sensitivitas terhadap kesalahan sinkronisasi, dan efisiensi spektral yang berkurang karena penyertaan prefiks siklik (Banelli et al., 2014; Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024).

Untuk mengatasi keterbatasan ini, para peneliti telah mengusulkan teknologi gelombang alternatif yang sesuai untuk generasi nirkabel mendatang (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017). Salah satu alternatif yang paling menjanjikan adalah Filter Bank Multicarrier (FBMC), yang meningkatkan efisiensi spektral dengan menghilangkan awalan siklik dan menggunakan penyaringan tingkat subcarrier (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). FBMC juga mengurangi kebocoran spektral dan meningkatkan koeksistensi di lingkungan spektrum yang terfragmentasi (Nissel et al., 2017; PHYDYAS Project, 2008). Karakteristik ini menjadikan FBMC sebagai kandidat yang menarik untuk sistem komunikasi 6G di masa mendatang (Letaief et al., 2019; Nissel et al., 2017).

Beberapa studi telah meneliti kinerja komparatif OFDM dan FBMC dalam berbagai skenario komunikasi (Banelli et al., 2014; Farhang-Boroujeny, 2011; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Namun, transisi menuju jaringan 6G memperkenalkan persyaratan tambahan terkait latensi ultra-rendah, integrasi kecerdasan buatan, pembagian spektrum cerdas, dan efisiensi spektral yang ekstrem (Letaief et al., 2019). Oleh karena itu, evaluasi komprehensif dari kedua teknik gelombang tersebut tetap sangat relevan (Letaief et al., 2019; Crespo Caballero, 2024).

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk meneliti prinsip-prinsip dasar dan arsitektur gelombang OFDM dan FBMC.
2. Untuk menganalisis kelebihan dan keterbatasan kedua teknologi gelombang tersebut.
3. Untuk mengevaluasi kinerja bentuk gelombang berdasarkan BER, SNR, latensi, throughput, dan efisiensi spektral.
4. Untuk menentukan kesesuaian OFDM dan FBMC untuk sistem komunikasi 6G di masa mendatang.

Penelitian ini berkontribusi pada semakin banyaknya pengetahuan mengenai teknologi gelombang generasi berikutnya dan memberikan wawasan berharga bagi para peneliti, insinyur, dan pembuat kebijakan yang terlibat dalam pengembangan jaringan nirkabel di masa depan (Letaief et al., 2019; Crespo Caballero, 2024).

METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan metodologi penelitian pustaka kualitatif yang dikombinasikan dengan analisis teknis komparatif. Penelitian ini berfokus pada evaluasi karakteristik dan kinerja gelombang OFDM dan FBMC melalui pemeriksaan literatur ilmiah, standar teknis, dan studi berbasis simulasi (Dahlman et al., 2020; 3GPP, 2020; Crespo Caballero, 2024).

Data primer diperoleh dari publikasi teknis, standar komunikasi nirkabel, dan studi simulasi sebelumnya yang melibatkan implementasi OFDM dan FBMC di lingkungan MATLAB (Farhang-Boroujeny, 2011; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Data sekunder dikumpulkan dari buku, artikel jurnal, prosiding konferensi, dan laporan industri yang terkait dengan sistem komunikasi 5G dan 6G di masa mendatang (Andrews et al., 2014; Dahlman et al., 2020; Letaief et al., 2019).

Analisis perbandingan dilakukan dengan menggunakan lima indikator kinerja utama yang umum digunakan dalam evaluasi sistem komunikasi digital (Crespo Caballero, 2024), yaitu:

1. Tingkat Kesalahan Bit (Bit Error Rate/BER)
2. Rasio Sinyal terhadap Derau (Signal-to-Noise Ratio/SNR)
3. Latensi
4. Efisiensi Spektral
5. Kapasitas

Evaluasi kinerja didasarkan pada tiga skenario komunikasi nirkabel yang representatif, yaitu lingkungan dalam ruangan, lingkungan pedesaan, dan lingkungan perkotaan (Crespo Caballero, 2024).

Prosedur analitis terdiri atas tahapan-tahapan berikut:

1. Tinjauan literatur mengenai teknologi OFDM dan FBMC.
2. Analisis arsitektur bentuk gelombang dan prinsip operasional.
3. Pemeriksaan karakteristik kinerja pada berbagai kondisi saluran komunikasi.
4. Evaluasi komparatif menggunakan metrik komunikasi yang telah ditetapkan.
5. Penilaian kesesuaian kedua teknologi terhadap kebutuhan sistem komunikasi 6G di masa mendatang.

Temuan penelitian kemudian disintesis untuk mengidentifikasi kelebihan, keterbatasan, serta potensi pengembangan masing-masing teknologi bentuk gelombang (Letaief et al., 2019; Crespo Caballero, 2024).

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Evolusi Jaringan Nirkabel dan Persyaratan Bentuk Gelombang

Perkembangan sistem komunikasi nirkabel secara konsisten didorong oleh meningkatnya permintaan pengguna akan kapasitas yang lebih tinggi dan kualitas layanan yang lebih baik (Andrews et al., 2014; Dahlman et al., 2020). Sementara generasi awal terutama berfokus pada komunikasi suara, sistem nirkabel modern mendukung aplikasi yang membutuhkan banyak data seperti streaming video definisi tinggi, komputasi awan, realitas virtual, transportasi otonom, dan infrastruktur kota

pintar (Dahlman et al., 2020; Letaief et al., 2019).

Jaringan 5G memperkenalkan tiga kategori layanan utama (Dahlman et al., 2020; 3GPP, 2020):

1. Pita Lebar Seluler yang Ditingkatkan (eMBB)
2. Komunikasi Latensi Rendah Ultra-Andal (URLLC)
3. Komunikasi Tipe Mesin Skala Besar (mMTC)

Kategori layanan ini memberlakukan persyaratan kinerja yang ketat terkait throughput, latensi, keandalan, dan efisiensi spektral (Dahlman et al., 2020; Letaief et al., 2019). Akibatnya, teknologi gelombang harus berevolusi melampaui pendekatan tradisional untuk memenuhi kebutuhan komunikasi di masa depan (Banelli et al., 2014; Letaief et al., 2019).

OFDM berhasil mengatasi banyak tantangan yang terkait dengan propagasi multipath dan komunikasi pita lebar (Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024). Namun, jaringan 6G di masa mendatang diperkirakan akan membutuhkan efisiensi dan fleksibilitas spektral yang lebih besar sehingga mendorong penyelidikan alternatif bentuk gelombang canggih seperti FBMC (Letaief et al., 2019; Nissel et al., 2017).

B. Dasar-Dasar dan Arsitektur OFDM

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) adalah teknik modulasi multicarrier yang membagi aliran data berkecepatan tinggi menjadi beberapa aliran berkecepatan lebih rendah yang ditransmisikan secara simultan melalui subcarrier ortogonal (Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024).

Proses transmisi OFDM terdiri atas (Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024):

1. Pembuatan Data
2. Modulasi QAM/QPSK
3. Konversi Serial ke Paralel
4. Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)
5. Penyisipan Cyclic Prefix
6. Transmisi Saluran

Di sisi penerima dilakukan proses kebalikannya (Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024):

1. Penghapusan Cyclic Prefix
2. Fast Fourier Transform (FFT)
3. Konversi Paralel ke Serial
4. Demodulasi
5. Pemulihan Data

Keunggulan utama OFDM meliputi ketahanan tinggi terhadap pelemahan multipath, implementasi berbasis FFT yang efisien, tingkat adopsi industri yang tinggi, serta kompatibilitas dengan sistem 4G dan 5G (Dahlman et al., 2020; Farhang-Boroujeny, 2011; 3GPP, 2020).

Namun, OFDM memiliki beberapa keterbatasan seperti emisi di luar pita frekuensi yang tinggi, efisiensi spektral yang berkurang akibat overhead cyclic prefix, sensitivitas terhadap kesalahan sinkronisasi, serta meningkatnya kerentanan terhadap phase noise (Banelli et al., 2014; Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024). Keterbatasan tersebut mendorong penelitian terhadap teknologi bentuk gelombang alternatif untuk sistem komunikasi nirkabel masa depan (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017).

C. Dasar-Dasar dan Arsitektur FBMC

Filter Bank Multicarrier (FBMC) merupakan teknik modulasi multicarrier yang dikembangkan untuk mengatasi berbagai keterbatasan OFDM (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017). Berbeda dengan OFDM, FBMC menghilangkan penggunaan cyclic prefix dan menerapkan proses penyaringan pada setiap subcarrier menggunakan filter bank (Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Pendekatan ini secara signifikan mampu menurunkan emisi di luar pita frekuensi sekaligus meningkatkan efisiensi spektral (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017).

FBMC umumnya menggunakan Offset Quadrature Amplitude Modulation (OQAM), yang memisahkan komponen real dan imajiner simbol sehingga tetap mempertahankan ortogonalitas walaupun subcarrier saling tumpang tindih pada

domain waktu dan frekuensi (Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024).

Proses transmisi FBMC terdiri atas (Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024):

1. Pembuatan Data
2. Pemetaan QAM
3. Konversi Serial ke Paralel
4. Pemrosesan OQAM
5. Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT)
6. Polyphase Network (PPN)
7. Transmisi Saluran

Pada sisi penerima dilakukan proses berikut (Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024):

1. Penerimaan Sinyal
2. Pemrosesan Analysis Filter Bank
3. Discrete Fourier Transform (DFT)
4. Demodulasi OQAM
5. Konversi Paralel ke Serial
6. Pemulihan Data

Salah satu filter prototipe yang paling banyak digunakan pada FBMC adalah filter PHYDYAS yang memberikan lokalisasi frekuensi sangat baik serta meminimalkan interferensi antar subcarrier (PHYDYAS Project, 2008; Crespo Caballero, 2024). Keunggulan utama FBMC meliputi efisiensi spektral yang lebih tinggi, emisi di luar pita yang rendah, latensi yang lebih kecil, pemanfaatan spektrum terfragmentasi yang lebih baik, serta tidak memerlukan cyclic prefix (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Namun demikian, FBMC juga memiliki kelemahan berupa kompleksitas komputasi yang lebih tinggi, implementasi MIMO yang lebih sulit, kebutuhan pemrosesan sinyal yang lebih besar, serta sinkronisasi yang lebih kompleks (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017). Walaupun demikian, FBMC tetap menjadi salah satu kandidat bentuk gelombang paling menjanjikan untuk sistem komunikasi 6G (Letaief et al., 2019; Nissel et al., 2017).

D. Analisis BER terhadap SNR

Bit Error Rate (BER) dan Signal-to-Noise Ratio (SNR) merupakan dua parameter utama dalam mengevaluasi kinerja sistem komunikasi digital (Crespo Caballero, 2024). Simulasi pada lingkungan

dalam ruangan, pedesaan, dan perkotaan menunjukkan bahwa OFDM maupun FBMC menghasilkan kinerja BER yang relatif sebanding dalam sebagian besar kondisi operasi (Crespo Caballero, 2024). Pada lingkungan dalam ruangan, OFDM menghasilkan BER yang stabil dengan kebutuhan SNR yang relatif rendah (Crespo Caballero, 2024). FBMC mampu mencapai BER yang serupa, tetapi membutuhkan jarak antar-subcarrier yang lebih besar dan laju sampling yang lebih tinggi (Crespo Caballero, 2024). Pada lingkungan pedesaan, kedua teknologi menghasilkan BER yang hampir identik sehingga pemilihan bentuk gelombang lebih dipengaruhi oleh efisiensi spektral dan latensi dibandingkan BER (Crespo Caballero, 2024). Pada lingkungan perkotaan, FBMC memerlukan nilai SNR sedikit lebih tinggi untuk mencapai BER yang sama karena adanya proses penyaringan tambahan yang meningkatkan kompleksitas pemrosesan sinyal (Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Secara keseluruhan, tidak terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara OFDM dan FBMC dalam aspek reliabilitas komunikasi sehingga keduanya tetap layak digunakan pada sistem komunikasi modern (Crespo Caballero, 2024).

E. Analisis Latensi

Latensi merupakan indikator utama dalam komunikasi nirkabel masa depan, khususnya untuk kendaraan otonom, otomasi industri, operasi jarak jauh, dan augmented reality (Dahlman et al., 2020; Letaief et al., 2019). Penggunaan cyclic prefix pada OFDM meningkatkan overhead transmisi sehingga menambah latensi (Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024). Sebaliknya, FBMC menghilangkan cyclic prefix sehingga mampu mentransmisikan informasi yang lebih efisien (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Hasil simulasi menunjukkan bahwa FBMC secara konsisten menghasilkan latensi lebih rendah dibandingkan OFDM pada seluruh skenario komunikasi (Crespo Caballero, 2024).

Keunggulan tersebut menjadi semakin penting pada jaringan 6G yang membutuhkan komunikasi ultra-low latency (Letaief et al., 2019; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024).

F. Analisis Efisiensi Spektral dan Throughput

Efisiensi spektral menggambarkan kemampuan sistem komunikasi dalam memanfaatkan bandwidth yang tersedia (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017). OFDM mengalami penurunan efisiensi akibat penggunaan cyclic prefix, guard band, dan tingginya kebocoran spektral (Banelli et al., 2014; Farhang-Boroujeny, 2011). FBMC mengatasi permasalahan tersebut melalui penyaringan subcarrier, pengurangan guard band, serta penghapusan cyclic prefix (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Hasil simulasi menunjukkan bahwa FBMC secara konsisten menghasilkan efisiensi spektral dan throughput yang lebih tinggi dibandingkan OFDM pada seluruh skenario komunikasi (Crespo Caballero, 2024). Keunggulan tersebut terlihat pada lingkungan dalam ruangan, pedesaan, maupun perkotaan, terutama ketika kepadatan spektrum semakin tinggi (Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024).

G. Evaluasi Komparatif OFDM dan FBMC

Parameter	OFDM	FBMC
Kinerja BER	Sangat Baik	Sangat Baik
Persyaratan SNR	Lebih Rendah	Sedikit Lebih Tinggi
Efisiensi Spektral	Sedang	Tinggi
Kapasitas	Baik	Sangat Baik
Latensi	Lebih Tinggi	Lebih Rendah
Emisi di Luar Pita Frekuensi	Tinggi	Sangat Rendah
Cyclic Prefix	Diperlukan	Tidak Diperlukan
Kompleksitas	Rendah	Tinggi

Persyaratan Sinkronisasi	Ketat	Lebih Fleksibel
Pemanfaatan Spektrum	Sedang	Sangat Baik
Kompatibilitas dengan 5G Saat Ini	Sangat Baik	Terbatas
Potensi untuk 6G	Sedang	Tinggi

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa OFDM masih sangat sesuai untuk implementasi jaringan 5G saat ini karena tingkat kematangan teknologi, kemudahan implementasi, serta adopsinya yang luas dalam standar komunikasi modern. Sebaliknya, FBMC menawarkan keunggulan yang lebih besar dalam efisiensi spektral, throughput, dan latensi sehingga menjadi kandidat yang sangat potensial untuk sistem komunikasi nirkabel generasi 6G (Letaief et al., 2019; Nissel et al., 2017).

KESIMPULAN

Studi ini membandingkan kinerja Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dan Filter Bank Multicarrier (FBMC) untuk sistem komunikasi nirkabel 5G dan 6G berdasarkan berbagai parameter performa (Crespo Caballero, 2024). Hasil analisis menunjukkan bahwa OFDM tetap memberikan kinerja yang andal berkat implementasi yang sederhana, kompatibilitas tinggi dengan infrastruktur yang telah ada, serta ketahanan terhadap propagasi multipath (Dahlman et al., 2020; Farhang-Boroujeny, 2011; 3GPP, 2020). Karakteristik tersebut menjadikan OFDM sebagai bentuk gelombang utama yang digunakan pada sistem 5G New Radio (Dahlman et al., 2020; 3GPP, 2020). Di sisi lain, OFDM masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti adanya cyclic prefix, emisi di luar pita frekuensi yang tinggi, dan efisiensi spektral yang relatif lebih rendah (Banelli et al., 2014; Farhang-Boroujeny, 2011; Crespo Caballero, 2024). Keterbatasan tersebut diperkirakan akan semakin menjadi tantangan seiring berkembangnya kebutuhan jaringan menuju

sistem komunikasi 6G (Letaief et al., 2019). FBMC mampu mengatasi sebagian besar kelemahan tersebut melalui penerapan penyaringan pada setiap subcarrier dan penghapusan cyclic prefix (Banelli et al., 2014; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024). Berdasarkan hasil simulasi, FBMC menunjukkan efisiensi spektral yang lebih tinggi, latensi yang lebih rendah, throughput yang lebih besar, serta emisi spektral yang lebih kecil dibandingkan OFDM (Crespo Caballero, 2024). Meskipun implementasi FBMC masih memiliki kompleksitas komputasi yang lebih tinggi serta tantangan dalam integrasi dengan sistem MIMO, teknologi ini memiliki prospek yang sangat baik sebagai kandidat bentuk gelombang pada jaringan komunikasi 6G (Letaief et al., 2019; Nissel et al., 2017). Secara keseluruhan, OFDM masih menjadi solusi yang paling tepat untuk implementasi sistem komunikasi saat ini, sedangkan FBMC menawarkan potensi yang lebih besar bagi jaringan komunikasi masa depan yang menuntut efisiensi spektrum tinggi, latensi ultra-rendah, throughput tinggi, dan kapasitas komunikasi yang lebih besar (Letaief et al., 2019; Nissel et al., 2017; Crespo Caballero, 2024).

REFERENSI

- J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, "What will 5G be?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- P. Banelli, S. Buzzi, G. Colavolpe, A. Modenini, F. Rusek, and A. Ugolini, "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 80–93, Nov. 2014.
- E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Sköld, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*, 2nd ed. Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2020.
- B. Farhang-Boroujeny, "OFDM versus filter bank multicarrier," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, no. 3, pp. 92–112, May 2011.
- K. B. Letaief, W. Chen, Y. Shi, J. Zhang, and Y. A. J. Zhang, "The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 8, pp. 84–90, Aug. 2019.
- R. Nissel, S. Schwarz, and M. Rupp, "Filter bank multicarrier modulation schemes for future mobile communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 8, pp. 1768–1782, Aug. 2017.
- PHYDYAS Project, "Prototype filter and system model for filter bank multicarrier," PHYDYAS, Tech. Rep., 2008.
- 3GPP TS 38.211, "NR; Physical channels and modulation," Release 16, 2020.
- A. Crespo Caballero, "Study of different waveform performance for enhanced communications in 5G and beyond networks," Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2024.
- J. González, M. Pérez, and L. Rodríguez, *Advanced Multicarrier Communication Systems*. Cham, Switzerland: Springer, 2016.