IT-EXPLORE
Jurnal Penerapan Teknologi Informasi dan Komunikasi
ISSN 2828-7940, e-ISSN 2829-1727
Volume 03 Nomor 03 Tahun 2024

STUDI MODUL WIFI DAN SIMULASI JARINGAN IEEE 802.11AX PADA SIMULATOR NS-3 UNTUK PENGUKURAN *THROUGHPUT*

Aldias Henry Maulana [1], **Theophilus Wellem** [2]

[1,2] Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi
Universitas Kristen Satya Wacana
Jl. O. Notohamidjojo 1-10, Salatiga
Email: 672018371@student.uksw.edu[1], theophilus.wellem@uksw.edu[2]

Riwayat artikel:
Submitted: 25-03-2024 *Revised: 27-07-2024* *Published: 12-10-2024*

Abstrak **–** IEEE 802.11ax WiFi 6 merupakan standar saat ini untuk teknologi *wireless local area network* (WLAN) yang merupakan pengembangan dari standar sebelumnya yaitu IEEE 802.11ac (WiFi 5). WiFi 6 mempunyai fitur-fitur baru yang lebih unggul dibandingkan dengan WiFi 5, misalnya dapat beroperasi pada band frekuensi 6 GHz, menggunakan modulasi 1024-QAM, dan dapat menggunakan maksimum 8 *spatial stream*. Secara umum, untuk menguji implementasi dari suatu standar teknologi jaringan, peneliti dapat membeli perangkat keras yang ada di pasaran yang telah mengimplementasikan standar tersebut baik secara keseluruhan maupun hanya fitur-fitur tertentu yang bersifat *mandatory*. Selain menggunakan perangkat keras secara langsung, pengujian dapat juga dilakukan menggunakan simulasi dengan perangkat lunak. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari model WiFi pada simulator ns-3 dan melakukan simulasi jaringan IEEE 802.11ax WiFi 6. Simulasi dilakukan untuk mengukur nilai *throughput* (*uplink*) yang dapat dicapai oleh WiFi 6 dengan jumlah *client station* (STA) dan jarak antara *access point* (AP) dan STA yang berbeda. Hasil simulasi yang dilakukan bahwa nilai *throughput* akan menurun dengan bertambahnya jarak AP-STA dan jumlah STA. Nilai *throughput* maksimum yang dapat diperoleh pada simulasi dengan 5 STA dengan jarak 2 meter dari AP adalah 655.41 Mbps.

Kata Kunci **–** Modul WiFi, 802.11ax, ns-3, simulasi, *throughput*.

Abstract **–** *IEEE 802.11ax WiFi 6 is the current standard for wireless local area network (WLAN) technology which is a development of the previous standard, namely IEEE 802.11ac (WiFi 5). WiFi 6 has new features that are superior to WiFi 5. For example, it can operate in the 6 GHz frequency band, use 1024-QAM modulation, and use a maximum of 8 spatial streams. In general, to test and verify the implementation of a network technology standard, researchers can buy hardware on the market that has implemented the standard in its entirety or only certain mandatory features. Apart from using hardware directly, testing can also be done using software simulations. This research aims to study the WiFi model in the ns-3 simulator and simulate the IEEE 802.11ax WiFi 6 network. The simulation is carried out to measure the uplink throughput that can be achieved by WiFi 6 with various numbers of client stations (STA) and various distances between the Access Point (AP) and STA. The simulation results show that the throughput value will decrease with increasing AP-*

STA distance and the number of STA. The maximum throughput value obtained in the simulation with 5 STA at a distance of 2 meters from the AP is 655.41 Mbps.

Keywords – *WiFi module, 802.11ax, ns-3, simulation, throughput*.

I. PENDAHULUAN

IEEE 802.11ax atau dikenal sebagai WiFi 6 merupakan standar terbaru dari teknologi jaringan lokal nirkabel (*wireless* LAN atau WLAN) saat ini [1]. Standar ini ditetapkan pada tahun 2019 dan kemudian diperbarui dengan menambahkan penggunaan band frekuensi 6 GHz pada tahun 2021 yang dikenal sebagai WiFi 6E [2]. IEEE 802.11ax juga dikenal dengan nama *High Efficiency* (HE) WLAN karena salah satu tujuan utama dari dikembangkannya standar IEEE 802.11ax adalah untuk meningkatkan *throughput* per area pada lingkungan yang padat (*dense environments*) [3]. Lingkungan yang padat di sini maksudnya adalah area di mana terdapat banyak pengguna dan WiFi *access point*, seperti bandara (*airport*), pusat perbelanjaan (*shopping mall*), stasiun kereta api (*train station*), dan stadion olahraga. Penggunaan nama HE juga untuk membedakan standar ini dengan standar WiFi lainnya, yaitu *Very High Throughput* (VHT) yang digunakan oleh IEEE 802.11ac (WiFi 5), *High Throughput* (HT) yang digunakan oleh IEEE 802.11n (WiFi 4), dan *Extremely High Throughput* (EHT) yang digunakan oleh IEEE 802.11be (WiFi 7) yang akan dirilis pada tahun 2024 [4].

Standar WLAN IEEE 802.11 mencakup protokol komunikasi pada dua lapisan (*layer*) pada jaringan komputer, yaitu *Medium Access Control* (MAC) *layer* (bagian dari dari *Data Link layer*) dan *Physical layer* (PHY). PHY *layer* dan MAC *layer* pada standar 802.11ax menambahkan beberapa hal yang baru jika dibandingkan dengan generasi pendahulunya (IEEE 802.11ac WiFi 5). Seperti halnya pada teknologi-teknologi komunikasi dan jaringan secara umum, adanya standar baru dengan fitur atau spesifikasi yang tentunya lebih baik (misalnya, pada IEEE 802.11ac maksimum *throughput* yang dapat dicapai secara teoritis adalah 6.9 Gbps, sedangkan pada IEEE 802.11ax, *throughput* maksimum secara teori adalah 9.6 Gbps atau mendekati 10 Gbps), akan mendorong para peneliti melakukan eksperimen, baik menggunakan simulator maupun menggunakan perangkat keras yang telah ada di pasaran, untuk mengukur performa sebenarnya yang dapat dicapai dari hasil implementasi standar tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi mengenai model dan implementasi IEEE 802.11ax pada simulator ns-3 [5], serta menggunakan simulator ns-3 untuk melakukan simulasi jaringan *wireless* IEEE 802.11ax. Simulasi yang dilakukan bertujuan untuk mengobservasi *throughput* (*uplink*) yang dapat dicapai) menggunakan *channel bandwidth* (CBW), *guard interval* (GI), jarak antara *access point* (AP)-client (STA), dan jumlah STA yang berbeda. Simulasi menggunakan parameter-parameter yang berbeda dapat memberikan informasi atau *insights* yang lebih detail mengenai performa dari IEEE 802.11ax pada kondisi yang bervariasi. Simulasi ini akan menggunakan *reference implementation* yang telah disediakan oleh simulator ns-3 dan kemudian dapat dikembangkan untuk melakukan simulasi dengan topologi yang lebih kompleks.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Teknologi IEEE 802.11ax (WiFi 6/6E)

Standar IEEE 802.11ax menggunakan beberapa teknik atau mekanisme baru pada lapisan PHY dan MAC dibandingkan dengan standar sebelumnya (IEEE 802.11ac) untuk mencapai tujuannya yaitu *high efficiency* WLAN pada area yang ramai dan padat (*crowded and dense environment*). Teknik pada lapisan PHY yang digunakan antara lain, bekerja pada band frekuensi 2.4 GHz dan 5 GHz, ukuran *Fast Fourier Transform* (FFT) hingga 2048 titik, *subcarrier spacing* pada OFDM yang lebih kecil (78.125 MHz) sehingga dapat mempunyai jumlah *subcarrier* lebih banyak dengan *channel bandwidth* yang sama, dan durasi simbol OFDM yang lebih panjang (12.8 us). Selanjutnya, IEEE 802.11ax juga menggunakan modulasi 1024-QAM untuk *encoding* data yang lebih banyak pada spektrum yang sama, sehingga dapat meningkatkan *throughput*, teknik *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) untuk mengakomodasi lebih banyak *user* pada suatu *channel* (*uplink* dan *downlink* OFDMA), dan multi-user (MU) MIMO *uplink* dan *downlink* (8 *spatial stream*) sehingga *access point* (AP) dapat menangani *client device* (STA) yang lebih banyak. Teknik *multiple access* OFDMA membagi OFDM *subcarrier* menjadi *resource unit* (RU) sehingga memungkinkan lebih banyak *user* yang dapat menggunakan spektrum frekuensi yang tersedia. Standard IEEE 802.11ax mendukung hingga 242 subcarrier pada suatu RU. Selain peningkatan pada sisi PHY, teknik pada lapisan MAC yang dikembangkan antara lain, *spatial reuse* (SR) untuk meningkatkan efisiensi penggunaan spektrum dan *target wake time* (TWT) untuk efisiensi energi (*power saving*). Perbandingan secara singkat antara WiFi 5 dan WiFi 6/6E ditunjukkan pada Tabel 1 yang dirangkum dari berbagai referensi [6][2][7][8][1].

Tabel 1 Perbandingan WiFi 6 dan WiFi 5

Parameter	IEEE 802.11ac (WiFi 5)	IEEE 802.11ax (WiFi 6)
Band Frekuensi	5 GHz	2.4 GHz, 5 GHz, 6 GHz (khusus WiFi 6E)
Channel Bandwidth (CBW)	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, 160 MHz	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 80+80 MHz, 160 MHz
Ukuran FFT	64, 128, 256, 512 titik	256, 512, 1024, 2048 titik
Subcarrier spacing	312.5 kHz	78.125 kHz
Durasi simbol OFDM	3.2 us + 0.8/0.4 µs Cyclic Prefix (CP)	12.8 us + 0.8/1.6/3.2 µs Cyclic Prefix (CP)
Modulasi (orde tertinggi)	256-QAM	1024-QAM
Spatial stream (SS)	Up to 8	Up to 8
Data rate (maksimum)	6.933 Gbps (256-QAM, 8 SS, 160 MHz CBW, *Coding rate* 5/6)	9607.8 Mbps (1024 QAM, 8 SS, 160 MHz CBW, Coding rate 5/6)
Teknik Multiple Access	OFDM	OFDMA
Antena	MU-MIMO (4 x 4)	MU-MIMO (8 x 8)

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, standar teknik modulasi paling tinggi yang didukung oleh standar IEEE 802.11ax adalah 1024-QAM, selain teknik modulasi lain yang telah ada pada standar-standar WiFi sebelumnya, yaitu BPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Selanjutnya, *coding rate* yang didukung adalah 1/2, 2/3, 3/4, dan

5/6, sehingga memungkinkan data rate mencapai 9.6 Gbps pada *Modulation and Coding Scheme* (MCS) yang menggunakan *channel bandwidth* 160 MHz atau 80+80 MHz dengan 8 *spatial stream* dan GI 800 ns. Penggunaan tipe modulasi, *coding rate*, *channel bandwidth*, GI, dan jumlah *spatial stream* pada HE-PHY dibedakan berdasarkan indeks MCS seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Perlu dicatat bahwa Tabel 2 hanya menunjukkan bagian dari data MCS pada HE-PHY (tidak termasuk 3200 ns GI dan detail jumlah *resource unit* (RU)). Untuk tabel lengkap dan persamaan matematika untuk menghitung *data rate* dapat dilihat pada [9].

Tabel 2 Indeks MCS pada HE-PHY

MCS	*Modulation Type*	*Coding Rate*	*Data Rate* per *spatial stream* (Mbit/s)							
			20 MHz		40 MHz		60 MHz		80 MHz	
			1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI	1600 ns GI	800 ns GI
0	BPSK	1/2	8	8.6	16	17.2	34	36.0	68	72
1	QPSK	1/2	16	17.2	33	34.4	68	72.1	136	144
2	QPSK	3/4	24	25.8	49	51.6	102	108.1	204	216
3	16-QAM	1/2	33	34.4	65	68.8	136	144.1	272	282
4	16-QAM	3/4	49	51.6	98	103.2	204	216.2	408	432
5	64-QAM	2/3	65	68.8	130	137.6	272	288.2	544	576
6	64-QAM	3/4	73	77.4	146	154.9	306	324.4	613	649
7	64-QAM	5/6	81	86.0	163	172.1	340	360.3	681	721
8	256-QAM	3/4	98	103.2	195	206.5	408	432.4	817	865
9	256-QAM	5/6	108	114.7	217	229.4	453	480.4	907	961
10	1024-QAM	3/4	122	129.0	244	258.1	510	540.4	1021	1081
11	1024-QAM	5/6	135	143.4	271	286.8	567	600.5	1134	1201

B. Simulator ns-3

Simulator ns-3 adalah perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi jaringan komputer dan secara umum dipakai dalam pengajaran maupun penelitian akademik [5]. Simulator ns-3 menyediakan modul-modul yang dapat dipakai untuk melakukan simulasi jaringan baik jaringan dengan kabel (*wired*) maupun jaringan nirkabel (*wireless*). Program atau *script* pada ns-3 untuk simulasi ditulis dalam bahasa pemrograman C++. Beberapa abstraksi yang digunakan oleh ns-3 dalam simulasi suatu jaringan adalah *Node*, *Application*, *Channel*, *NetDevice*, dan *Topology Helpers*. *Node* merepresentasikan *computing device* (komputer atau *host*) pada jaringan yang memiliki protokol, *network interface card* (NIC), dan menjalankan aplikasi. Abstraksi *Node* diimplementasikan dalam C++ dengan kelas `Node`. Selanjutnya, *Application* merupakan abstraksi yang merepresentasikan suatu aplikasi dan diimplementasikan dengan kelas *Application*. Kelas `Channel` merepresentasikan suatu saluran komunikasi (*communication channel*). Pada simulator ns-3 terdapat tiga jenis *channel* yang sering digunakan, yaitu *CsmaChannel, PointToPointChannel*, dan *WifiChannel.*

Modul WiFi pada ns-3 diimplementasikan dengan *WifiNetDevice* yang merepresentasikan suatu *wireless network interface controller* dan menyediakan fitur-fitur dari standar IEEE 802.11 termasuk IEEE 802.11ax pada level MAC dan PHY (mulai ns-3 versi 3.34). Sebuah `Node` dapat memiliki *WifiNetDevice* pada *channel* yang terpisah. PHY *layer* untuk IEEE 802.11 direpresentasikan menggunakan kelas *WifiPhy* dan kelas-

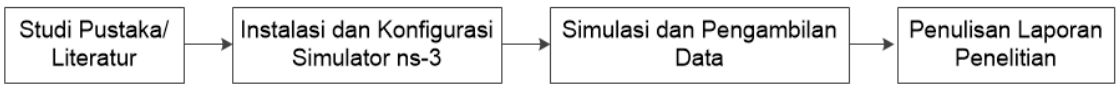
kelas turunannya, yaitu kelas *YansWifiPhy* dan *SpectrumWifiPhy,* yang digunakan bersama dengan beberapa kelas lainnya seperti, PhyEntity dan *WifiPhyStateHelper*. Berbagai jenis standar PHY yang didukung oleh ns-3 (OFDM-PHY, HT-PHY, VHT-PHY, HE-PHY) kemudian diturunkan dari kelas *PhyEntity.* Untuk standar IEEE 802.11ax PHY *layer* diimplementasikan dengan kelas *HePhy*, sedangkan untuk MAC layer, implementasi dilakukan dengan kelas *WifiMac* dan kelas-kelas turunannya, yaitu *ApWifiMac, StaWifiMac,* dan *AdhocWifiMac*. Kelas-kelas yang merepresentasikan PHY dan MAC layer ini digunakan bersama dengan kelas-kelas lainnya (misalnya, *WifiChannel, WifiManager, WifiMacHelper,* dan *WifiPhyHelper*) untuk mengimplementasikan simulasi jaringan WiFi IEEE 802.11.

C. Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian terdahulu yang berkaitan dan digunakan sebagai acuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut. Perbandingan antara jaringan yang menggunakan standar IEEE 802.11ax dan IEEE 802.11ac dibahas oleh Rochim, dkk. [10]. Penelitian tersebut menggunakan simulator ns-3 versi 3.29. Parameter simulasi yang digunakan antara lain, band frekuensi 5 GHz, durasi simulasi 2 detik, MCS 11 (modulasi 1024-QAM untuk IEEE 802.11ax), MCS 9 (modulasi 256-QAM untuk IEEE 802.11ac), GI 800 ns, CBW 160 MHz, dan jumlah *client station* yang bervariasi. Performa jaringan IEEE 802.11ax untuk kasus di apartemen atau perumahan dibahas oleh Sandoval dan Cespedes [11]. Pada penelitian tersebut diuji skenario transmisi *downlink* oleh beberapa *user* (STA). Pengujian dilakukan menggunakan 4 hingga 16 STA. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dengan parameter GI 800 ns, MCS 11 (modulasi 1024-QAM), CBW 80 MHz dan 160 MHz. Pengujian *channel utilization/occupancy*, *jitter*, *throughput* dibahas oleh Muhammad, dkk. [12]. Penelitian tersebut tidak menggunakan perangkat lunak simulator, tetapi menggunakan perangkat keras seperti AP dan *wireless network interface card* (NIC) yang mendukung standar IEEE 802.11ax (Intel AX200). Perangkat lunak lainnya yang digunakan pada penelitian tersebut antara lain, Wireshark, iPerf3, Netspot, dan Acrylic WiFi (untuk mengukur *noise* dan *received signal strength indicator*, RSSI).

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif dengan pendekatan pemodelan dan simulasi (ekseperimen). PHY *layer* dan MAC *layer* dari IEEE 802.11ax WiFi *device*, saluran komunikasi, dan aplikasi yang menggunakan komunikasi WiFi dimodelkan menggunakan kelas dan objek dalam bahasa pemrograman C++ dan disimulasikan menggunakan simulator ns-3 versi 3.38 untuk mengukur performa atau kinerja (*throughput*) dari jaringan IEEE 802.11ax. Tahapan yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.

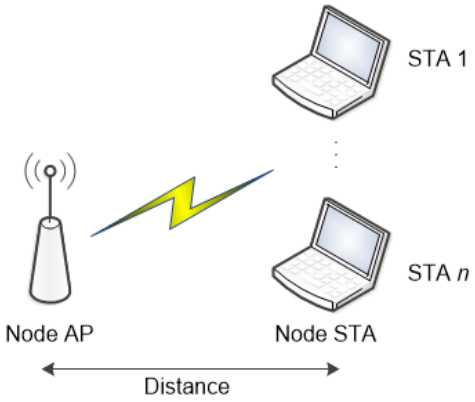


Gambar 1: Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Studi Pustaka/Literatur: Pada tahap ini dilakukan studi literatur dengan tujuan untuk mempelajari teknologi IEEE 802.11ax WiFi melalui penelitian-penelitian sebelumnya. Hasil studi literatur ini menjadi acuan dalam merencanakan dan menjalankan penelitian ini serta bagian mana dari IEEE 802.11ax yang akan dibahas dan disimulasikan pada penelitian ini.
2. Instalasi dan konfigurasi Simulator ns-3: Pada tahap ini dilakukan instalasi dan konfigurasi simulator ns-3 pada sistem operasi Ubuntu. Linux Ubuntu diinstall pada sebuah *virtual machine* (VM).
3. Simulasi dan Pengambilan Data: Pada tahap ini simulasi dilakukan atau dieksekusi dan data hasil simulasi dikumpulkan dan diolah sehingga dapat dipresentasikan pada laporan penelitian.
4. Penulisan Laporan Penelitian: Setelah simulasi dan pengumpulan data selesai dilakukan, tahap ini bertujuan untuk menuliskan hasil simulasi yang diperoleh dalam bentuk laporan penelitian.

Topologi jaringan untuk simulasi yang dilakukan ditunjukkan pada Gambar 3. Topologi ini menggunakan satu *access point* (AP) dan satu atau lebih *client station* (STA). Simulasi dilakukan menggunakan 6 skenario dengan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 3. Pada simulasi untuk pengukuran *throughput* (*uplink*) digunakan MCS 11 yang merupakan MCS tertinggi pada IEEE 802.11ax (modulasi 1024-QAM) dan band frekuensi 5 GHz. Selanjutnya, ukuran *payload* dari paket yang dikirimkan antara AP dan STA ditetapkan sebesar 1500 byte. *Channel bandwidth* (CBW), *guard interval* (GI), dan jumlah STA yang digunakan dibuat bervariasi untuk melihat pengaruhnya pada nilai *throughput* (*uplink*). Durasi simulasi dilakukan atau dieksekusi selama 3 detik untuk setiap skenario simulasi. STA dan AP berkomunikasi dengan mengirimkan paket menggunakan protokol UDP (*client* dan *server*). Jarak paling ideal adalah di mana posisi AP dan STA sedekat mungkin. IEEE 802.11ax memiliki kemampuan untuk beradaptasi dengan kondisi lingkungan dengan mengubah mode MCS yang digunakan. Sebagai contoh, saat kondisi penerimaan sinyal sangat baik, AP-STA dapat beroperasi dengan MCS-11 tetapi jika kondisi tidak memungkinkan, AP-STA dapat beroperasi dengan MCS yang lain. Pada skenario yang disimulasikan diambil jarak 1 meter hingga 3 meter karena jarak ini merepresentasikan kondisi secara umum pada ruang kelas di kampus atau ruang di dalam rumah. Selain itu, untuk jarak yang jauh, penerimaan sinyal akan semakin lemah dan mengakibatkan turunnya *throughput* secara drastis karena AP dan STA akan mengubah MCS yang digunakan. Simulator yang digunakan juga mempunyai keterbatasan untuk melakukan simulasi dengan jarak yang sangat jauh dan jumlah STA yang sangat besar.



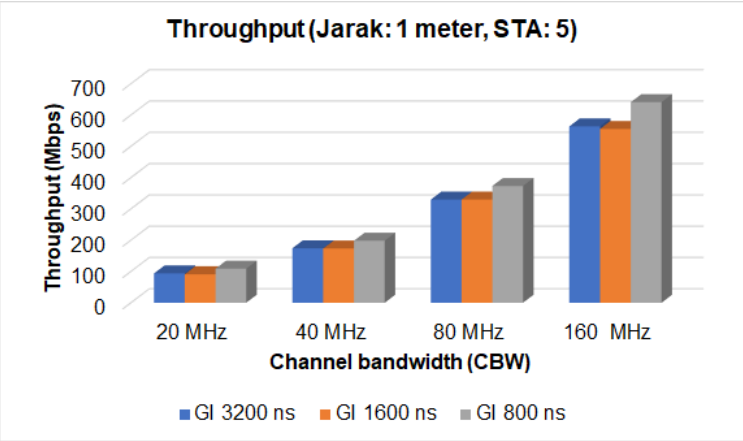
Gambar 2: Topologi Jaringan untuk simulasi

Tabel 3 Skenario simulasi

	Parameter	Nilai
Skenario 1	Band frekuensi	5 GHz
	Jarak AP-STA	1 meter
	Jumlah STA (*client*)	5
	Channel bandwidth (CBW)	20, 40, 80, 160 MHz
	Guard Interval (GI)	3200, 1600, 800 ns
Skenario 2	Band frekuensi	5 GHz
	Jarak AP-STA	2 meter
	Jumlah STA (*client*)	5
	Channel bandwidth (CBW)	20, 40 MHz
	Guard Interval (GI)	3200, 1600, 800 ns
Skenario 3	Band frekuensi	5 GHz
	Jarak AP-STA	3 meter
	Jumlah STA (*client*)	5
	Channel bandwidth (CBW)	20, 40, 80, 160 MHz
	Guard Interval (GI)	3200, 1600, 800 ns
Skenario 4	Band frekuensi	5 GHz
	Jarak AP-STA	1 meter
	Jumlah STA (*client*)	10
	Channel bandwidth (CBW)	20, 40, 80, 160 MHz
	Guard Interval (GI)	3200, 1600, 800 ns
Skenario 5	Band frekuensi	5 GHz
	Jarak AP-STA	2 meter
	Jumlah STA (*client*)	10
	Channel bandwidth (CBW)	20, 40 MHz
	Guard Interval (GI)	3200, 1600, 800 ns
Skenario 6	Band frekuensi	5 GHz
	Jarak AP-STA	3 meter
	Jumlah STA (*client*)	10
	Channel bandwidth (CBW)	20, 40 MHz
	Guard Interval (GI)	3200, 1600, 800 ns

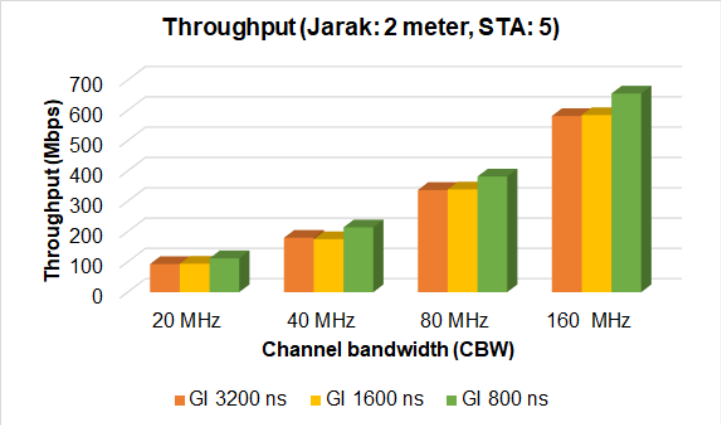
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi yang dilakukan merupakan simulasi transmisi dari STA ke AP (*uplink transmission*). Skenario 1, 2, dan 3 dilakukan untuk mengobservasi pengaruh jarak STA ke AP terhadap nilai *throughput*. Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi untuk Skenario 1 dengan 5 STA dan jarak AP ke STA 1 meter. Pada simulasi dengan nilai GI 3200 ns dan CBW 20 MHz didapatkan nilai *throughput* sebesar 93.68 Mbps. Nilai *throughput* akan meningkat dengan nilai CBW yang semakin besar dan GI yang makin kecil. Hal ini disebabkan karena jika CBW semakin besar, maka terdapat semakin OFDM *subcarrier* yang dapat digunakan untuk mentransmisikan data. Demikian juga halnya jika nilai GI diperkecil, maka semakin banyak data yang dapat ditransmisikan. Nilai *throughput* teritinggi yang diperoleh untuk skenario ini adalah 640.92 Mbps (CBW 160 MHz, GI 800 ns).

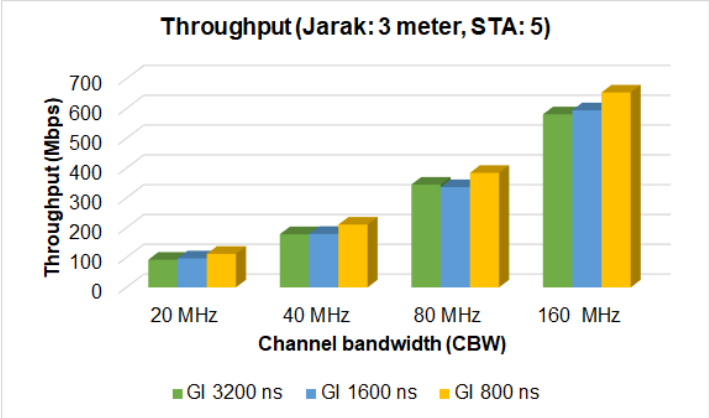


Gambar 3: Nilai *throughput* untuk Skenario 1

Untuk melihat pengaruh jarak AP-STA terhadap *throughput*, Gambar 4 menunjukkan hasil simulasi untuk Skenario 2 dengan STA berjarak 2 meter dari AP. Nilai *throughput* yang diperoleh dengan GI 3200 ns dan CBW 20 MHz adalah 92.9 Mbps. Nilai ini lebih kecil dibandingkan nilai *throughput* yang diperoleh pada Skenario 1 tetapi tidak begitu signifikan penurunannya (dari 93.68 Mbps turun menjadi 92.9 Mbps). Nilai *throughput* tertinggi yang dapat diperoleh pada skenario ini adalah 655.41 Mbps. Berdasarkan hasil simulasi pada skenario ini, peningkatan nilai *throughput* yang signifikan hanya diperoleh jika digunakan GI 800 ns dan CBW 160 MHz. Nilai *throughput* meningkat dari 640.92 Mbps menjadi 655.41 Mbps, atau terjadi peningkatan sekitar 15 Mbps. Beberapa simulasi juga dilakukan dengan membuat jarak STA dari AP semakin jauh dan diperoleh bahwa nilai *throughput* akan menurun dengan jarak STA dari AP, tetapi untuk jarak dari 1 meter hingga 3 meter, nilai *throughput* cenderung stabil dan berada pada nilai sekitar 650 sampai 655 Mbps. Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi untuk jarak 3 meter (Skenario 3) dengan nilai *throughput* tertinggi yang diperoleh adalah 653.92 Mbps.



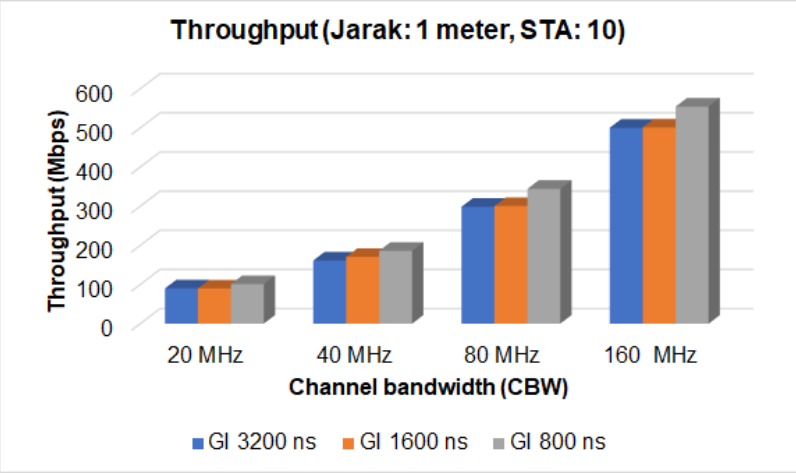
Gambar 4: Nilai *throughput* untuk Skenario 2



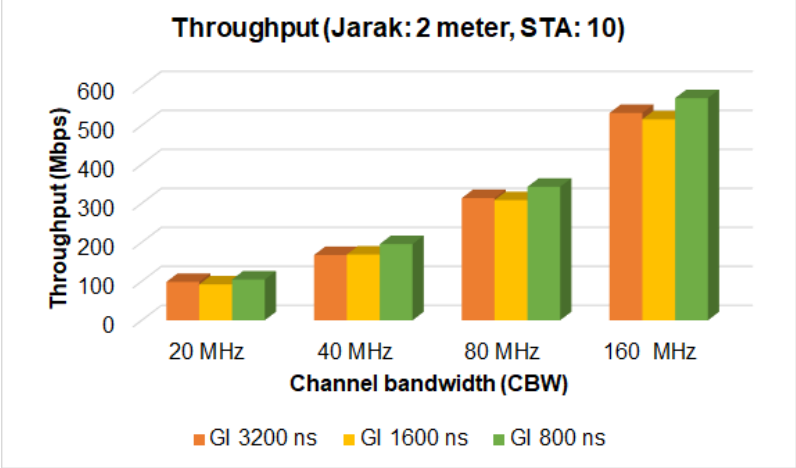
Gambar 5: Nilai *throughput* untuk Skenario 3

Simulasi pada skenario 4, 5, dan 6 dilakukan untuk melihat pengaruh penambahan jumlah STA terhadap nilai *throughput*. Hasil simulasi untuk Skenario 4 ditunjukkan pada Gambar 6. Pada skenario ini, terdapat 10 STA yang berkomunikasi dengan AP. Nilai *throughput* tertinggi yang diperoleh adalah sebesar 554.38 Mbps. Jika dibandingkan dengan Skenario 1 (5 STA), maka terdapat penurunan nilai *throughput* yang cukup signifikan, yaitu sekitar 86.5 Mbps (dari 640.92 Mbps menjadi 554.38 Mbps). Hal ini terjadi karena *resource unit* (*subcarrier*) yang harus dibagi kepada lebih banyak STA. Jika jumlah STA ditambah menjadi 15 (dengan jarak tetap 1 meter), nilai *throughput* turun menjadi 526.28 Mbps.

Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi untuk skenario 5 di mana jarak AP-STA ditingkatkan menjadi 2 meter. Pada simulasi ini, nilai *throughput* tertinggi yang dapat diperoleh adalah 569.71 Mbps. Jika dibandingkan dengan Skenario 2 (Jarak 2 meter, STA 5) pada Gambar 4, dapat dilihat bahwa nilai *throughput* menurun dari 655.41 Mbps menjadi 569.71 Mbps. Jika jumlah STA ditambah menjadi 15 (dengan jarak tetap 2 meter), nilai *throughput* menurun lagi menjadi 559.46 Mbps.

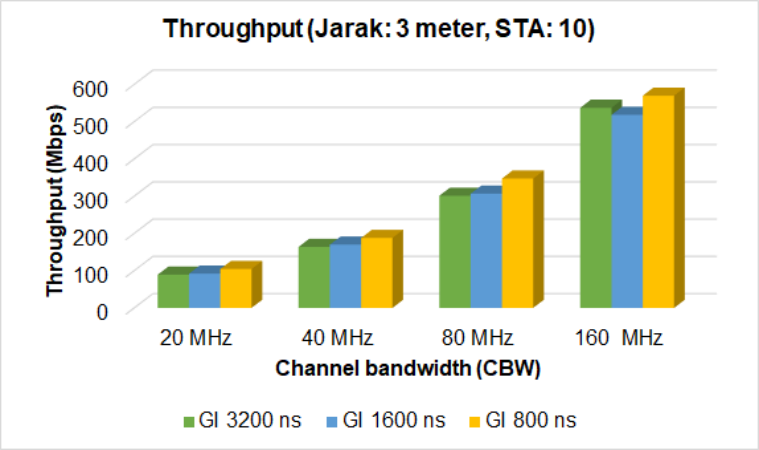


Gambar 6: Nilai *throughput* untuk Skenario 4

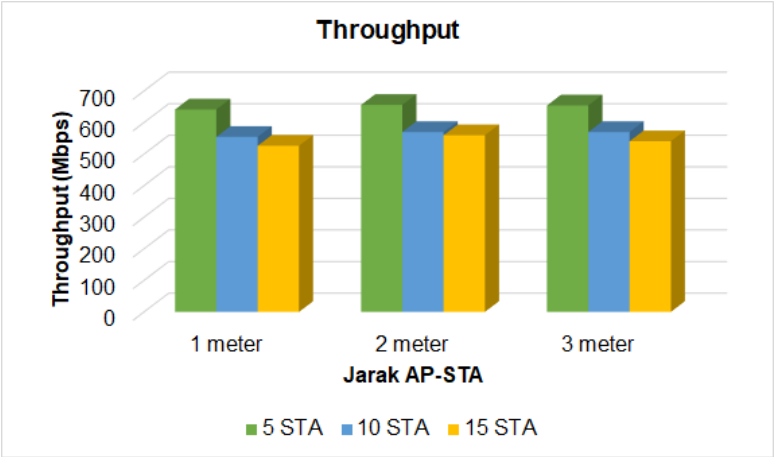


Gambar 7: Nilai *throughput* untuk Skenario 5

Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi untuk Skenario 6 dengan jarak AP-STA 3 meter dan jumlah STA 10. Pada skenario ini, nilai *throughput* tertinggi yang diperoleh adalah 569.64 Mbps. Jika dibandingkan dengan Skenario 3 pada Gambar 5, nilai *throughput* turun dari 653.92 Mbps menjadi 569.64 Mbps. Untuk jumlah STA 15 (dengan jarak tetap 3 meter), nilai *throughput* turun menjadi 540.54 Mbps. Gambar 8 menunjukkan *summary* dari simulasi yang dilakukan untuk CBW 160 MHz dan GI 800 ns. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa jumlah STA pada jaringan serta jarak AP-STA mempengaruhi nilai *throughput*, di mana semakin banyak jumlah STA, maka nilai *throughput* akan turun. Demikian juga halnya dengan jarak STA dari AP. Semakin jauh STA dari AP, maka nilai *throughput* akan menurun meskipun dalam simulasi yang dilakukan (jarak 1 meter hingga 3 meter), penurunan nilai *throughput* tidak begitu signifikan.



Gambar 7. Nilai *throughput* untuk Skenario 6



Gambar 8: Nilai *throughput* untuk jumlah STA dan jarak AP-STA yang berbeda

Hasil pengukuran *throughput* tertinggi untuk Skenario 1 hingga Skenario 6 ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil pengukuran *throughput* tertinggi

Skenario	*Throughput*
Skenario 1	640.92 Mbps
Skenario 2	655.41 Mbps
Skenario 3	653.92 Mbps
Skenario 4	554.38 Mbps
Skenario 5	569.71 Mbps
Skenario 6	569.64 Mbps

V. SIMPULAN DAN SARAN

Standar untuk WLAN akan terus berkembang seiring dengan munculnya teknik-teknik baru dalam transmisi data, kemajuan dalam bidang semikonduktor dan elektronika. Penelitian ini melakukan studi mengenai teknologi WLAN saat ini yaitu IEEE 802.11ax WiFi melalui simulasi menggunakan simulator ns-3. Simulasi dilakukan

dengan tujuan untuk mengukur *throughput* (*uplink*) dari jaringan WiFi 6 yang terdiri dari satu AP dan jumlah STA yang bervariasi. Jarak antara AP dan STA juga dibuat berbeda untuk melihat pengaruhnya pada *throughput*. Hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa jumlah STA yang semakin banyak akan menurunkan nilai *throughput* yang diperoleh, Jarak antara STA dan AP juga berpengaruh pada nilai *throughput*. Jika STA makin jauh dari AP, nilai *throughput* akan turun, tetapi pada simulasi yang dilakukan, nilai MCS dibuat tetap sehingga penurunan nilai *throughput* tidak terlihat signifikan. Secara umum pada teknologi WiFi, jika STA menjauh dari AP dan nilai *signal-to-noise ratio* (SNR) berubah, maka akan terjadi perubahan pada modulasi yang digunakan untuk mentransmisikan data.

Penelitian ini hanya melakukan pengukuran *throughput* (*uplink*) pada band frekuensi 5 GHz. Pada pengembangan lebih lanjut dari penelitian ini dapat dilakukan simulasi untuk *throughput* (*downlink*) pada band frekuensi yang berbeda (untuk WiFi 6E), maupun simulasi fitur-fitur lain yang ada pada WiFi 6 misalnya, *multi-user* MIMO, *downlink/uplink* OFDMA, dan *target wakeup time* (TWT). Selain itu, simulasi juga dapat dilakukan untuk teknologi IEEE 802.11be WiFi 7 yang saat ini masih dalam proses standarisasi maupun melakukan simulasi menggunakan simulator yang lain selain simulator ns-3.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. Bellalta, "IEEE 802.11ax: High-efficiency WLANS," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 1, pp. 38–46, Feb. 2016, doi: 10.1109/MWC.2016.7422404.

[2] IEEE, "IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks–Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Std 802.11ax-2021 (Amendment to IEEE Std 802.11-2020)*. pp. 1–767, May 2021. doi: 10.1109/IEEESTD.2021.9442429.

[3] R. G. Rathor and R. D. Joshi, "Performance Analysis of IEEE802.11ax (Wi-Fi 6) Technology using Multi-user MIMO and Up-Link OFDMA for Dense Environment," *IEEE 2nd Int. Conf. Appl. Electromagn. Signal Process. Commun. AESPC 2021 - Proc.*, 2021, doi: 10.1109/AESPC52704.2021.9708544.

[4] IEEE, "IEEE P802.11be - IEEE Draft Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer." Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/ieee/802.11be/7516/

[5] Nsnam Team, "ns-3 Network Simulator," *ns-3*. https://www.nsnam.org/ (accessed May 16, 2023).

[6] M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, and E. Lopez-Aguilera, "IEEE 802.11ax: Challenges and Requirements for Future High Efficiency WiFi," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 130–137, Jun. 2017, doi: 10.1109/MWC.2016.1600089WC.

[7] Emerson Team, "Introduction to 802.11ax High-Efficiency Wireless."

https://www.ni.com/en/solutions/semiconductor/wireless-connectivity-test/introduction-to-802-11ax-high-efficiency-wireless.html

[8] D.-J. Deng, K.-C. Chen, and R.-S. Cheng, "IEEE 802.11ax: Next generation wireless local area networks," in *10th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness*, Aug. 2014, pp. 77–82. doi: 10.1109/QSHINE.2014.6928663.

[9] MCS Team, "MCS Index - MCS Index Table, Modulation and Coding Scheme Index 11n, 11ac, and 11ax." https://mcsindex.com/ (accessed May 22, 2023).

[10] A. F. Rochim, B. Harijadi, Y. P. Purbanugraha, S. Fuad, and K. A. Nugroho, "Performance comparison of wireless protocol IEEE 802.11ax vs 802.11ac," in *Proceeding - ICoSTA 2020: 2020 International Conference on Smart Technology and Applications: Empowering Industrial IoT by Implementing Green Technology for Sustainable Development*, 2020. doi: 10.1109/ICoSTA48221.2020.1570609404.

[11] J. Sandoval and S. Cespedes, "Performance Evaluation of IEEE 802.11ax for Residential Networks," in *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Nov. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/LATINCOM53176.2021.9647762.

[12] S. Muhammad, J. Zhao, and H. H. Refai, "An Empirical Analysis of IEEE 802.11ax," in *2020 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*, Mar. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICCSPA49915.2021.9385748.