

ANALISIS PENGARUH PENERAPAN LISTEN BEFORE TALK (LBT) PADA LTE-LICENSED ASSISTED ACCESS (LAA) TERHADAP WI-FI 5GHZ

ANALYSIS THE EFFECT OF LISTEN BEFORE TALK (LBT) IMPLEMENTATION AT THE LTE-LICENSED ASSISTED ACCESS (LAA) AND WI-FI 5GHZ

Dilla Fajar Sukma Dilaga¹, Uke Kurniawan Usman², Doan Perdana³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹dillafs@student.telkomuniversity.ac.id, ²ukeusman@telkomuniversity.ac.id,

³doanperdana@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pertumbuhan pengguna yang semakin bertambah setiap tahunnya, terutama pada kawasan dengan kepadatan penduduk yang tinggi akan menjadi masalah yang serius apabila tidak ditanggulangi dengan efektif. Baik dari pengguna yang menginginkan *user experience* yang lebih baik maupun dari operator menginginkan jaringan yang dapat melayani pelanggan dengan baik dalam hal kapasitas maupun layanan. Salah satu cara untuk meningkatkan kapasitas adalah penggunaan spektrum frekuensi secara maksimal, tetapi kesediaan sumber daya spektrum frekuensi terbatas.

Pemanfaatan spektrum *unlicensed* dianggap 3GPP sebagai salah satu solusi yang menjanjikan untuk memenuhi pertumbuhan trafik yang terus meningkat. Ketersediaan spektrum yang tinggi (500 MHz) hampir di seluruh dunia menjadikan penggunaan pada spektrum ini memiliki peluang baik. LTE Release 13 memungkinkan penggunaan spektrum frekuensi *unlicensed* yang disebut dengan *Licensed-Assisted Access* (LAA). Pada LTE-LAA, spektrum *licensed* LTE digunakan sebagai *primary cell* yaitu untuk membawa informasi serta mengangkut trafik data. Sedangkan spektrum *unlicensed* 5 GHz digunakan sebagai *secondary cell* yang bertujuan untuk meningkatkan kapasitas serta pembagian spektrum secara adil. LTE-LAA tidak akan menggantikan peran Wi-Fi namun akan berkoeksistensi sehingga menjadi tetangga yang baik dan tidak merugikan Wi-Fi ataupun teknologi lainnya dalam rentang frekuensi tersebut.

Hasil simulasi menghasilkan indeks *fairness throughput* 64 pengguna untuk FTP over UDP pada skenario 1 sebesar 0.998, skenario 2 sebesar 0.857 dan skenario 3 sebesar 0.997, sementara *latency* sebesar 0.991 untuk skenario 1, 0.849 skenario 2 dan 0.999 skenario 3. Sedangkan untuk FTP over TCP *fairness throughput* pada skenario 1 sebesar 0.779, skenario 2 sebesar 0.639 dan skenario 3 sebesar 0.741, sementara *latency* 0.959 untuk skenario 1, 0.875 skenario 2 dan 0.949 untuk skenario 3.

Kata kunci : LTE-LAA, unlicensed, Wi-Fi, fairness, integrity KPI.

Abstract

The more users are increasing, the greater the area that will increase in size, the more difficult it will be to overcome effectively. Both from users who want a better user experience from operators who can provide customers well in terms of capacity and service. One way to increase capacity is the use of maximum frequency, but the source of availability of the frequency spectrum is limited.

The use of the spectrum without permission is considered 3GPP as one of the solutions that is expected to obtain ever-increasing traffic growth. Consider high spectrum (500 MHz). LTE 13 releases allow the use of unlicensed frequency variations called License-Assisted Access (LAA). In LTE-LAA, a combination of licensed LTE is used as primary cells to carry information and transport traffic data. Whereas the 5 GHz unlicensed spectrum is used as secondary cells that are proposed to increase capacity and distribute the spectrum fairly. LTE-LAA will not take on the role of Wi-Fi but will coexist so that it becomes a good neighbour and does not violate Wi-Fi or other technologies in that frequency range.

The simulation results produce a throughput *fairness index* of 64 users for FTP over UDP in scenario 1 of 0.998, scenario 2 of 0.857 and scenario 3 of 0.997, while latency is 0.991 for scenario 1, 0.849 for scenario 2 and 0.999 scenario 3. While FTP over TCP throughput *fairness index* in scenario 1 is 0.779, scenario 2 is 0.639 and scenario 3 is 0.741, while latency is 0.959 for scenario 1, 0.875 scenario 2 and 0.949 for scenario 3.

Keywords: LTE-LAA, unlicensed, Wi-Fi, fairness, KPI integrity

1. Pendahuluan

Jumlah pengguna *smartphone* yang terus meningkat, khususnya pada layanan data mengakibatkan permintaan trafik data meningkat. Jaringan 4G LTE menjanjikan penggunaannya untuk mendapatkan *user experience* yang lebih baik. Namun, salah satu masalah pada layanan ini adalah lonjakan trafik data terutama pada daerah dengan kepadatan yang tinggi. Hal ini mengakibatkan *user experience* menurun. Salah satu cara untuk memenuhi permintaan trafik yang tinggi adalah pemanfaatan spektrum frekuensi secara maksimal. Disisi lain, kesediaan sumber daya spektrum frekuensi terbatas, sehingga dibutuhkan strategi penggunaan yang efektif dan efisien.

Ketersediaan spektrum frekuensi *unlicensed* 5 GHz yang tinggi dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan spektrum frekuensi. Pemanfaatan ini dianggap 3GPP sebagai salah satu solusi untuk memenuhi tingginya permintaan trafik. Melalui LTE Release 13 memungkinkan penggunaan spektrum frekuensi *unlicensed* tersebut sebagai tambahan dari spektrum *licensed*, dengan kata lain frekuensi *unlicensed* bergantung terhadap frekuensi *licensed*. Fitur tersebut disebut sebagai *Licensed-Assisted Access* (LAA)[1]. Namun terdapat jutaan perangkat 802.11 yang bekerja pada frekuensi 5 GHz dalam berbagai penggunaan dan akan terganggu apabila tidak digunakan mekanisme pembagian yang adil. 3GPP doc. RP-141664 menyatakan, LTE-LAA harus menjadi “*good neighbor*” dan memastikan koeksistensi yang baik dan adil bagi perangkat lain pada frekuensi yang sama.

Pada LTE-LAA, digunakan metode *carrier aggregation* dari *primary cell* (beroperasi dalam *licensed spectrum*) untuk menyampaikan informasi penting dan menjamin QoS, sedangkan *secondary cell* (beroperasi dalam *unlicensed spectrum*) untuk meningkatkan laju data secara oportunistik (*supplemental downlink*). Digunakan pula mekanisme *Listen Before Talk* (LBT) untuk memastikan koeksistensi yang adil secara global. Pada jaringan LTE-LAA akan menghasilkan semakin banyak *small cell* untuk mengakomodasi pelanggan yang padat.

Pada penelitian [6], penggunaan spektrum *unlicensed* untuk jaringan LAA harus diikuti dengan mekanisme koeksistensi yang baik sehingga tidak mengganggu perangkat 802.11 lainnya. Mekanisme koeksistensi 802.11 memanfaatkan *energy detection* (ED) pada *thresholds* tinggi dan *carrier sense* (CS) pada *thresholds* rendah. 3GPP doc. RP-141664 menyatakan, LAA tidak boleh mempengaruhi layanan Wi-Fi (*data*, *video* dan layanan *voice*) itu sendiri. Pada penelitian [2], dilakukan penggunaan mekanisme *Listen Before Talk* (LBT) tanpa mempertimbangkan perubahan jumlah pengguna, indeks *fairness* antara LAA dan Wi-Fi, serta hanya dilakukan 2 skenario yaitu operator Wi-Fi dengan Wi-Fi serta operator LAA dengan Wi-Fi.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis pengaruh penerapan *Listen Before Talk* (LBT) pada LTE-*Licensed Assisted Access* (LAA) terhadap Wi-Fi 5 GHz. Simulasi dilakukan dengan menggunakan variabel yang berbeda diantaranya jumlah perangkat, *energy detection threshold*, *user arrival time* (λ) dan penggunaan 3 skenario simulasi sehingga dapat diamati efektifitas penggunaan mekanisme LBT. Parameter yang akan diamati pada penelitian ini berdasarkan parameter *integrity* KPI (*Key Performance Indicator*) yaitu *throughput* dan *latency* untuk setiap skenario serta dilihat *fairness* dari hasil simulasi yang dilakukan.

2. Dasar Teori /Material dan Metodologi/perancangan

2.1 LTE-Licensed Assisted Access (LAA)

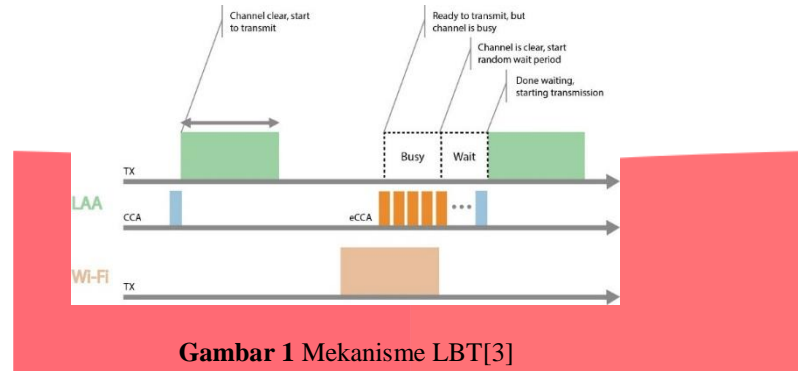
Licensed-Assisted Access (LAA) adalah teknologi LTE-*Advanced* yang dapat meningkatkan kecepatan data pengguna dan mengurangi kepadatan trafik. LAA adalah sebuah sistem yang direncanakan menggunakan tambahan 5GHz *unlicensed band* (*supplemental downlink*), dengan *primary cell* (PCell) selalu beroperasi pada *licensed band*. LTE-LAA bekerja dengan memanfaatkan spektrum *unlicensed* sehingga dapat memenuhi permintaan trafik yang terus meningkat. Spektrum frekuensi *unlicensed* 5 GHz pada LAA dipilih dikarenakan ketersediaan kanal yang lebih banyak dibanding 2,4 GHz. Oleh karena itu, kinerja layanan akan lebih baik sebab ketersediaan perangkat pada frekuensi 5 GHz akan lebih sedikit sehingga kanal tidak lebih padat dibanding 2,4 GHz. Alasan lainnya karena interferensi yang terjadi pada frekuensi 5 GHz lebih rendah daripada 2,4 GHz. Namun, baik frekuensi 2,4 maupun 5 GHz digunakan untuk perangkat Wi-Fi 802.11. Sehingga, terdapat jutaan perangkat 802.11 yang bekerja pada frekuensi 5 GHz dan akan terganggu apabila tidak menggunakan mekanisme pembagian yang adil.

2.2 Wi-Fi

Wi-Fi adalah akronim dari *Wireless Fidelity* dimana jaringan ini mengacu pada jenis komunikasi IEEE 802.11 *Wireless Local Area Network* (WLAN). WLAN merupakan perluasan jaringan *Local Area Network* (LAN) dengan menyediakan konektivitas jaringan nirkabel. Dengan arsitektur jaringan tanpa kabel, WLAN sangat populer untuk menyediakan konektivitas IP di perumahan, perkantoran dan lingkungan kampus. Saat ini WLAN telah berkembang dan menjadi bagian penting dalam jaringan komputer[5].

2.3 Listen Before Talk (LBT)

LTE-LAA bekerja pada *band* frekuensi *unlicensed* 5 GHz, sehingga dibutuhkan penyesuaian mekanisme dengan perangkat sejenis pada frekuensi yang sama. IEEE sebagai badan standarisasi perangkat 802.11, mewajibkan semua perangkat pada frekuensi 5 GHz untuk menggunakan protokol CSMA (*carrier-sense multiple access*). Penggunaan protokol CSMA untuk memperoleh LBT. Listen Before Talk (LBT) adalah prosedur pengiriman dengan konsep apabila tidak CCA (*clear channel available*), maka LAA akan mengirim data sedangkan apabila kanal penuh maka akan ada proses tunggu. Dengan kata lain, LBT adalah mekanisme penggunaan kanal adil sehingga apabila kanal sedang digunakan maka pengguna lain harus menunggu.



2.4 Key Performance Indicator (KPI)

Quality of Service (QoS) pada layanan seluler biasa disebut sebagai *Key Performance Indicator* (KPI). KPI merupakan evaluasi kerja dari layanan nirkabel sebagai acuan atau tolok ukur kinerja jaringan. KPI untuk *Radio Access Network* (RAN) digunakan untuk mengukur kontribusi terhadap persepsi pelanggan pada kualitas dan kinerja sistem. *Latency* disebut juga *delay* atau jeda waktu yang dibutuhkan dalam pengiriman paket dari pengirim ke pengguna. *Throughput* yaitu kecepatan dimana paket dapat ditransfer sejak paket pertama dijadwalkan pada *air interface*.

2.5 Jain's Fairness Index

Keadilan adalah salah satu aspek yang penting dalam jaringan nirkabel untuk pembagian atau alokasi sumber daya. Konsekuensi dari alokasi sumber daya yang tidak adil menyebabkan pemborosan sumber daya atau alokasi yang berlebihan. Jain's index merupakan salah satu metode *fairness* yang dapat digunakan.

2.6 Network Simulator 3

NS-3 adalah aplikasi simulasi jaringan *discrete-event*, ditargetkan terutama untuk penelitian dan penggunaan pendidikan. NS-3 adalah perangkat lunak gratis, dilisensikan dibawah lisensi GNU GPLv2, dan tersedia secara publik untuk penelitian, pengembangan, dan penggunaan. Tujuan pembuatan NS-3 adalah untuk mengembangkan lingkungan simulasi terbuka untuk penelitian jaringan. Simulasi NS-3 mendukung penelitian jaringan berbasis IP dan non-IP. Namun, sebagian besar penggunaannya berfokus pada simulasi nirkabel/IP yang melibatkan model Wi-Fi, WiMAX atau LTE untuk *layer* 1 dan 2 dan berbagai *routing* statis atau dinamis[5].

2.7 Gambaran Umum Sistem

Hal yang dilakukan adalah mensimulasikan koeksistensi LTE-LAA dan Wi-Fi pada frekuensi 5 GHz berdasarkan nilai *throughput* dan *latency*. Model sistem simulasi dibuat suatu kondisi trafik model FTP 1 pada jaringan LTE-LAA dengan 3 skenario berbeda, yaitu LAA menginterferensi Wi-Fi, Wi-Fi menginterferensi LAA dan skenario ideal (koeksistensi LTE-LAA dan Wi-Fi). Untuk pengujian dilakukan berdasarkan perubahan jumlah pengguna dan *transport* yang digunakan. Kemudian akan dievaluasi kinerja jaringan berdasarkan parameter QoS.

2.8 Perangkat Simulasi

Spesifikasi perangkat untuk simulasi koeksistensi LTE-LAA dan Wi-Fi 5 GHz pada penelitian ini menggunakan perangkat sebagai berikut.

1. Processor Intel Core i5
2. RAM 4 GB
3. Sistem Operasi Ubuntu 12.04 dengan Virtual Box
4. Software Simulasi Network Simulator-3.25

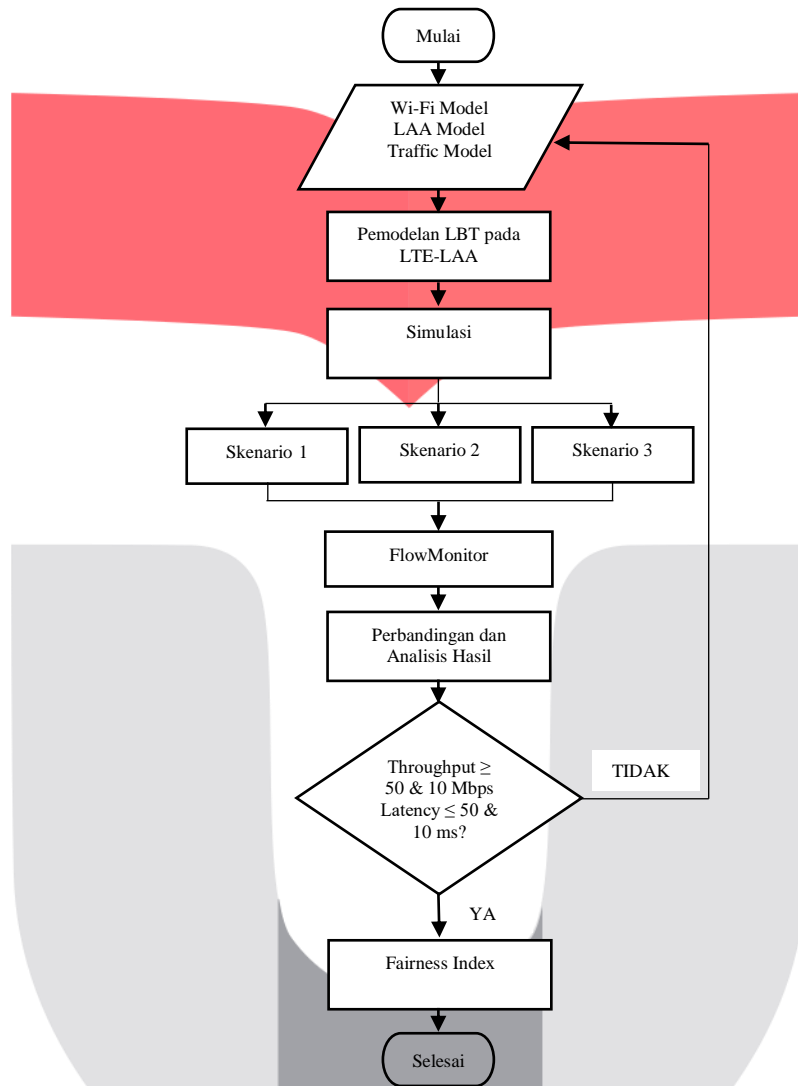
2.9 Perancangan Sistem

Simulasi koeksistensi LTE-LAA dilakukan dengan menetapkan beberapa ketentuan sebagai berikut.

1. Mendesain lingkungan dan melakukan konfigurasi model Wi-Fi dan model LAA berdasarkan model trafik yang diamati.

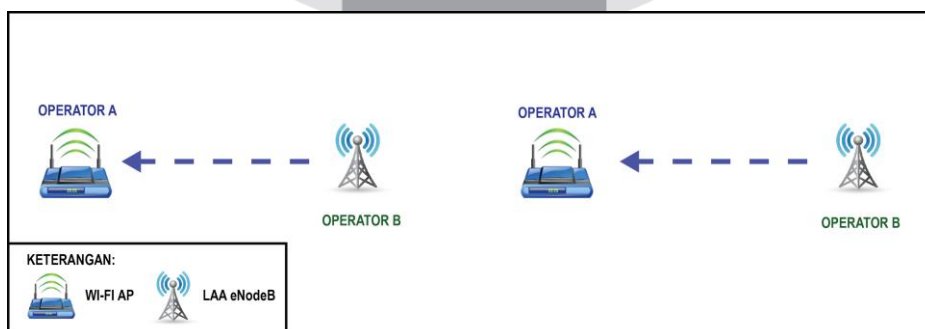
2. Melakukan pemodelan penerapan mekanisme LBT pada LTE-LAA terhadap Wi-Fi berdasarkan 3 skenario yang diamati, yaitu LAA menginterferensi Wi-Fi, Wi-Fi menginterferensi LAA dan skenario ideal (koeksistensi LAA dan Wi-Fi).
3. Setiap skenario memiliki nilai *throughput* dan *latency* masing-masing, dimana nilai tersebut akan digunakan untuk menganalisa QoS.
4. Simulasi masing-masing skenario dilakukan dengan menggunakan 3 skema (8 UE, 20UE dan 32 UE per operator) dengan konfigurasi *transport* yang berbeda (UDP dan TCP).

2.10 Alur Penelitian

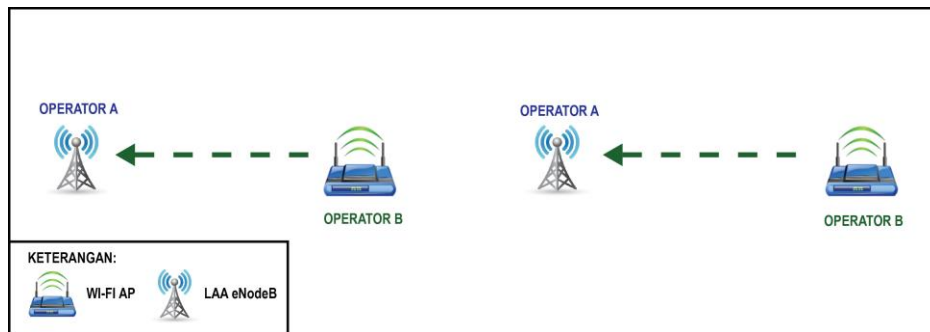


Gambar 4 Diagram Alir Penelitian

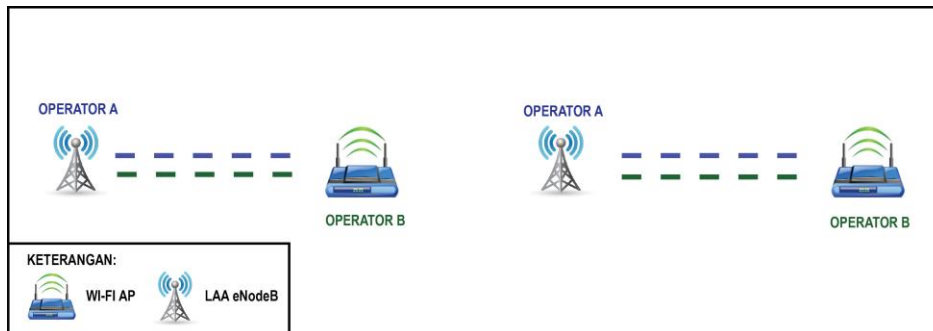
2.11 Skenario Simulasi



Gambar 5 Ilustrasi LAA menginterferensi Wi-Fi



Gambar 6 Ilustrasi Wi-Fi menginterferensi LAA



Gambar 7 Ilustrasi Penerapan LBT pada LAA

Skenario yang diuji berdasarkan parameter pada simulasi jaringan sebagai berikut.

Tabel 1 Parameter Simulasi

| Parameter | Nilai |
|----------------------|--|
| Bandwidth Sistem | 20 MHz |
| Carrier Frequency | 5 GHz (channel 36) |
| Jumlah User | 16, 40 dan 64 |
| Transport Protokol | TCP dan UDP |
| Jarak antar Operator | 5 meter |
| Traffic Model | FTP Model 1 as in TR36.814. FTP model file size: 0.5 Mbytes $\lambda = 0.5, 1.5$ dan 2.5 |
| CCA-ED | -62, -72 dan -82 dBm |

3. Pembahasan

Data yang didapatkan dari hasil skenario simulasi dan pengujian akan dianalisis berdasarkan parameter KPI (QoS) yaitu *throughput* dan *latency*. Pada data hasil simulasi *throughput* diukur berdasarkan *transport* UDP dan TCP untuk masing-masing 3 skema penambahan pelanggan. Penggunaan LBT pada LAA didapatkan *throughput* dan *latency* yang adil baik pada operator LAA maupun Wi-Fi.

3.1. FTP over UDP Application

Tabel 2 Rekapitulasi Akhir FTP over UDP

| Operator | Throughput (Mbps) | | | | Latency (ms) | | | | |
|------------|---------------------------|-------|-------|---------|--------------|-------|-------|---------|-------|
| | Max | Min | Mean | Std Dev | Max | Min | Mean | Std Dev | |
| Skenario 1 | 8 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 74.27 | 15.05 | 63.48 | 10.29 | 89.36 | 30.57 | 38.80 | 11.63 |
| | B | 71.94 | 36.87 | 70.60 | 4.598 | 57.94 | 30.41 | 31.48 | 3.525 |
| | 20 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 73.34 | 44.19 | 65.84 | 5.199 | 82.39 | 32.52 | 38.12 | 9.177 |
| | B | 71.94 | 70.79 | 71.33 | 0.327 | 57.94 | 30.50 | 31.58 | 3.681 |
| Skenario 2 | 32 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 73.34 | 44.19 | 65.84 | 5.199 | 82.39 | 32.52 | 38.12 | 9.177 |
| | B | 71.94 | 70.79 | 71.33 | 0.327 | 57.94 | 30.50 | 31.58 | 3.681 |
| | 8 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 42.58 | 10.51 | 35.46 | 6.107 | 147.4 | 49.29 | 62.26 | 14.84 |
| | B | 97.70 | 45.05 | 85.59 | 14.26 | 57.29 | 21.11 | 26.09 | 6.493 |

| | | 20 UE per Operator | | | | | | | | |
|------------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|--|
| Skenario 3 | A | 42.58 | 7.310 | 35.76 | 6.542 | 315 | 49.29 | 64.38 | 8.401 | |
| | B | 97.65 | 45.95 | 85.04 | 14.09 | 56.53 | 21.20 | 26.21 | 6.500 | |
| | | | 32 UE per Operator | | | | | | | |
| | A | 42.58 | 7.310 | 35.76 | 6.542 | 315.0 | 49.298 | 64.38 | 8.401 | |
| | B | 97.65 | 45.95 | 85.04 | 14.09 | 56.53 | 21.206 | 26.21 | 6.500 | |
| | | | 8 UE per Operator | | | | | | | |
| A | 126.4 | 26.22 | 112.6 | 19.15 | 103.7 | 17.84 | 20.91 | 7.369 | | |
| B | 115.8 | 0.021 | 100.4 | 17.88 | 552.3 | 17.99 | 24.05 | 36.19 | | |
| | | 20 UE per Operator | | | | | | | | |
| A | 126.3 | 26.22 | 112.0 | 18.72 | 60.04 | 17.86 | 20.88 | 5.012 | | |
| B | 114.3 | 0.021 | 99.63 | 18.36 | 552.3 | 18.09 | 26.83 | 50.79 | | |
| | | 32 UE per Operator | | | | | | | | |
| A | 126.3 | 15.487 | 111.9 | 20.89 | 212.15 | 17.86 | 22.67 | 19.62 | | |
| B | 113.9 | 37.971 | 100.4 | 18.39 | 67.706 | 18.33 | 21.96 | 8.059 | | |

Pada Tabel 2 rekapitulasi akhir simulasi FTP *over* UDP, didapatkan hasil terbaik masing-masing dengan menggunakan nilai lambda terendah 0.5. Selain itu ED *threshold* yang ditetapkan pada simulasi ini tertinggi yaitu - 62 dBm, yang artinya LAA memiliki nilai ambang batas yang tinggi yang dapat mempengaruhi tingginya parameter KPI yang didapatkan. Pada *transport* UDP ini merupakan *full buffer* yang memberikan kesempatan lebih pada LAA untuk mentransmit data dibandingkan WI-Fi.

Tabel 3 Jain's Fairness Index FTP over UDP

| Jain's Fairness Index | Throughput | | | Latency | | |
|-----------------------|------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | 16 UE | 40 UE | 64 UE | 16 UE | 40 UE | 64 UE |
| Skenario 1 | 0.997 | 0.998 | 0.998 | 0.989 | 0.991 | 0.991 |
| Skenario 2 | 0.857 | 0.857 | 0.857 | 0.856 | 0.849 | 0.849 |
| Skenario 3 | 0.996 | 0.996 | 0.997 | 0.995 | 0.984 | 0.999 |

Dari ketiga skenario yang telah dikerjakan, skenario 3 (ideal) memiliki hasil simulasi dengan parameter KPI terbaik diantara skenario yang lainnya. Hal ini dapat terjadi karena efisiensi dan penggunaan mekanisme LBT yang tepat. Selain itu, untuk kasus adanya interferensi dari sistem lain menjadikan tantangan sendiri dan membutuhkan mekanisme yang sesuai dengan lingkungan sistem tersebut.

3.2 FTP over TCP Application

Tabel 4 Rekapitulasi Akhir FTP over TCP

| Operator | Throughput (Mbps) | | | | Latency (ms) | | | | |
|--------------------|--------------------|--------|-------|---------|--------------|-------|--------|---------|-------|
| | Max | Min | Mean | Std Dev | Max | Min | Mean | Std Dev | |
| Skenario 1 | 8 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 59.206 | 9.397 | 26.07 | 13.660 | 59.20 | 9.239 | 13.842 | 5.323 |
| | B | 12.567 | 1.069 | 11.58 | 1.7353 | 19.02 | 3.118 | 9.1003 | 1.816 |
| | 20 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 47.37 | 1.446 | 37.68 | 8.0982 | 26.38 | 9.239 | 13.339 | 3.070 |
| | B | 12.56 | 1.069 | 11.58 | 1.7353 | 19.02 | 3.118 | 9.1003 | 1.816 |
| 32 UE per Operator | | | | | | | | | |
| A | 47.37 | 13.35 | 38.22 | 6.9608 | 59.20 | 9.397 | 13.916 | 5.334 | |
| B | 12.56 | 1.611 | 11.67 | 1.4198 | 19.02 | 4.241 | 9.1547 | 1.731 | |
| Skenario 2 | 8 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 10.36 | 0.006 | 7.119 | 3.0518 | 38.81 | 8.432 | 19.158 | 5.802 |
| | B | 69.19 | 27.60 | 54.65 | 10.002 | 14.37 | 5.320 | 9.0141 | 1.842 |
| | 20 UE per Operator | | | | | | | | |
| | A | 10.24 | 0.049 | 7.475 | 2.7251 | 57.13 | 8.114 | 20.459 | 7.978 |
| | B | 68.45 | 23.28 | 52.49 | 10.798 | 19.78 | 5.695 | 9.2501 | 2.240 |
| 32 UE per Operator | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--|
| Skenario 3 | A | 10.24 | 0.049 | 7.536 | 2.6511 | 57.13 | 8.114 | 20.624 | 7.978 | |
| | B | 68.45 | 23.28 | 52.96 | 9.6228 | 19.78 | 5.695 | 9.3327 | 2.070 | |
| | 8 UE per Operator | | | | | | | | | |
| | A | 27.25 | 2.53 | 21.21 | 3.37 | 25.12 | 4.83 | 8.791 | 3.16 | |
| | B | 98.41 | 6.99 | 81.77 | 16.4 | 33.39 | 4.12 | 6.083 | 3.40 | |
| | 20 UE per Operator | | | | | | | | | |
| | A | 26.49 | 3.63 | 21.24 | 2.78 | 21.58 | 6.05 | 8.960 | 3.04 | |
| | B | 97.89 | 6.99 | 81.34 | 15.8 | 24.78 | 4.19 | 6.083 | 2.81 | |
| | 32 UE per Operator | | | | | | | | | |
| | A | 26.55 | 2.32 | 20.50 | 4.08 | 28.12 | 4.18 | 9.649 | 4.42 | |
| | B | 96.97 | 34.1 | 79.78 | 16.1 | 26.36 | 4.12 | 6.025 | 2.00 | |

Pada Tabel 4 didapatkan hasil rekapitulasi akhir FTP over TCP, yang berarti paket mengalir melalui koneksi TCP. Pada *transport* TCP dideskripsikan sebagai *finite buffer* yang menyediakan kontrol aliran. Dapat dilihat bahwa *throughput* berbanding lurus dengan *latency* yang dihasilkan. Namun, pada skema ini menghasilkan KPI yang lebih rendah pada operator A (LAA) dibandingkan dengan skema UDP sebelumnya karena pada *finite buffer* (buffer terbatas) memberikan kesempatan lebih pada operator Wi-Fi untuk dapat mentransmisikan data.

Tabel 5 Jain's Fairness Index FTP over TCP

| Jain's Fairness Index | Throughput | | | Latency | | |
|-----------------------|------------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | 16 UE | 40 UE | 64 UE | 16 UE | 40 UE | 64 UE |
| Skenario 1 | 0.870 | 0.780 | 0.779 | 0.959 | 0.965 | 0.959 |
| Skenario 2 | 0.628 | 0.639 | 0.639 | 0.885 | 0.875 | 0.875 |
| Skenario 3 | 0.743 | 0.744 | 0.741 | 0.967 | 0.964 | 0.949 |

4. Kesimpulan

1. Kinerja mekanisme *Listen Before Talk* (LBT) pada LAA terhadap Wi-Fi bergantung pada faktor diantaranya penggunaan mekanisme *duty cycle* yang merupakan perbandingan antara penggunaan LTE dan Wi-Fi, Penggunaan *duty cycle* = 1 pada UDP menghasilkan *throughput* pada operator Wi-Fi dan LAA untuk 64 pengguna sebesar 65.84 Mbps dan 71.33 Mbps sementara *latency* sebesar 38.12 ms dan 31.58 ms. Sedangkan penggunaan *duty cycle* = 0 menghasilkan *throughput* pada operator LAA dan Wi-Fi sebesar 35.75 Mbps dan 85.04 Mbps sementara *latency* sebesar 64.38 ms dan 26.21 ms. Faktor lainnya adalah penggunaan *user arrival time* (λ), penggunaan $\lambda = 0.5$ dengan energy detection = -62 mendapatkan *throughput* pada operator LAA dan Wi-Fi sebesar 112.85 Mbps dan 101.38 Mbps sedangkan *latency* sebesar 22.85 ms dan 22.16 ms. Sementara penggunaan $\lambda = 2.5$ menghasilkan *throughput* sebesar 106.90 Mbps dan 88.04 Mbps sedangkan *latency* sebesar 25.09 ms dan 25.59 ms.
2. Penggunaan jumlah UE yang lebih banyak menghasilkan parameter KPI yang lebih rendah. Untuk dapat menghasilkan parameter yang baik pada trafik tinggi dibutuhkan alokasi yang lebih tinggi. Index *fairness* menunjukkan nilai pada skenario 1 sebesar 0.997 dan 0.989 untuk 16 UE sedangkan 0.998 dan 0.991 untuk 64 UE untuk *throughput* dan *latency* secara berturut-turut pada FTP over UDP. Sedangkan pada FTP over TCP 0.870 dan 0.959 untuk 16 UE sedangkan 0.779 dan 0.959 untuk 64 UE untuk *throughput* dan *latency* secara berturut-turut. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah UE berpengaruh terhadap performansi baik dari KPI *integrity* maupun *fairness*.

Daftar Pustaka:

- [1] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; "Study on Licensed Assisted Access to Unlicensed Spectrum", (Release 13), *3GPP TR 36.889 V13.0.0*, Juni. 2015.
- [2] Giupponi, L. Henderson, T. Bojovic, B. Miozzo, M. "Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3", *Cornell University Library*, Juli. 2016.
- [3] LTE-U Forum. "LTE-U SDL Coexistence Specifications", 2015.
- [4] Signal Research Group. "The Prospect of LTE and Wi-Fi Sharing Unlicensed Spectrum", 2015.
- [5] What is NS-3. <https://www.nsnam.org/overview/what-is-ns-3/>[Online]. Diakses pada 28 Februari 2018.
- [6] IEEE Project 802, "Coexistence Lessons Learned", IEEE 802.19-14/0080r2, 2014.