

PENGARUH PROPAGASI TERHADAP KOMUNIKASI DATA PADA JARINGAN NIRKABEL

Emy Haryatmi, Busono Soerowirdjo, A. Benny Mutiara

Fakultas Teknologi Industri, Universitas Gunadarma

JL. Margonda Raya No.100, Pondok Cina, Depok

E-mail: amutiara@staff.gunadarma.ac.id

Abstrak

Jaringan nirkabel berkembang dengan pesat di seluruh dunia dengan digunakannya dalam berbagai aplikasi. Agar dapat bekerja dengan baik, kinerja jaringan nirkabel sangat tergantung dari konfigurasi pada Physical Layer (PHY) seperti propagasi, antena, jarak antara transmitter - receiver dan sebagainya. Propagasi yang digunakan dapat digunakan diantaranya adalah propagasi Free Space dan propagasi Two Ray Ground. Selain itu juga terdapat dua metode yang dapat diimplementasikan pada jaringan nirkabel, yaitu metode basic access dan RTS/CTS.

Untuk dapat membandingkan penggunaan kedua metode dalam dua propagasi tersebut diatas, simulasi digunakan sebagai alat perbandingan dimana tolak ukurnya adalah throughput, data yang dibuang (drop) dan kanal efisiensi. Kinerja dari jaringan nirkabel dapat dilihat pada ketiga kondisi tersebut. Hasil dari simulasi dengan topologi yang digunakan memperlihatkan bahwa penggunaan propagasi Two Ray Ground dengan metode basic access memberikan hasil terbaik diantara penggunaan propagasi dan metode yang lain dengan nilai throughput, kanal efisiensi dan jumlah bit yang terbuang tidak lebih dari 0.30 Mbps, 10 % dan 1800 bit tiap detiknya.

Kata kunci: *Jaringan Nirkabel, NS2, Bandwidth, Propagasi*

1. Pendahuluan

Pada saat ini, bidang telekomunikasi telah berkembang dengan pesatnya di seluruh dunia. Perkembangannya sendiri terus berlanjut tiap tahunnya. Banyak peneliti di seluruh dunia selalu mencoba untuk menemukan teknologi baru di bidang ini dengan terus membenahi kekurangan yang ditemukan dari penemuan sebelumnya. Salah satu bidang dalam telekomunikasi yang saat ini sedang banyak digunakan oleh masyarakat luas adalah Jaringan Nirkabel (WLAN). Jaringan Nirkabel ini telah berkembang dengan pesat dimana contoh dari jaringan ini adalah komunikasi data dengan menggunakan infra merah (IrDa) dan Bluetooth. Karena kemampuannya dalam pengiriman data, manusia di seluruh dunia menggunakannya dalam berbagai aplikasi yang berkaitan dengan jaringan nirkabel dimana salah satunya adalah penggunaannya dalam komunikasi data. Untuk mengatasi perkembangan penggunaan komunikasi data dengan jaringan nirkabel, diharapkan jaringan komunikasi di masa mendatang dapat menggunakan jaringan nirkabel dengan lebih baik dalam area lokal maupun area yang luas.

Jaringan nirkabel dibakukan penggunaannya oleh IEEE. Dalam perkembangannya di bidang telekomunikasi, studi grup 802.11 didirikan dibawah proyek IEEE 802 untuk dapat membuat satu standar internasional yang baku yang dapat digunakan di seluruh dunia. Standardisasi 802.11 selalu diperbaharui dan dikembangkan dalam standardisasi 802.11b dimana menyediakan spesifikasi yang lebih baik mengenai Medium

Access Control (MAC) dan Physical Layer (PHY) untuk jaringan nirkabel yang merupakan hal penting ketika akan membangun suatu jaringan nirkabel. Standardisasi 802.11b menyediakan tingkat laju data yang baru pada physical layer-nya yaitu 5.5 Mbps dan 11 Mbps. Kedua laju data ini diharapkan dapat memberikan kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan laju data sebelumnya pada 802.11 yaitu 1 Mbps dan 2 Mbps.

Dalam pengiriman data pada jaringan nirkabel banyak yang perlu diperhatikan seperti jumlah node yang digunakan, jarak antar node, propagasi yang digunakan dan sebagainya. Paper ini akan mengulas pengaruh propagasi bagi pengiriman data terhadap kinerja jaringan nirkabel dengan menggunakan metode *basic access dan RTS/CTS*.

Paper ini memfokuskan pada dua keadaan: (1) Mengamati kinerja *throughput*, kanal efisiensi dan jumlah bit yang terbuang yang dihasilkan dari simulasi dengan menggunakan empat laju data (*data rate*) yang disediakan oleh standardisasi jaringan nirkabel. Simulasi dilakukan dengan menggunakan dua propagasi yang berbeda yaitu propagasi Two Ray Ground dan Free Space yang mengimplementasikan dua metode yaitu metode basic access dan RTS/CTS; dan (2) Membandingkan dan menganalisa hasil simulasi tersebut. Dalam pelaksanaan simulasi terdapat beberapa asumsi yang digunakan yaitu tidak adanya stasiun yang tidak dikenali oleh stasiun lainnya, hanya ada satu stasiun yang aktif yang mengirimkan data dalam semua siklus pengiriman data dimana stasiun yang lain hanya dapat menerima data dan menyediakan *acknowledgement*, kondisi jalur yang ideal,

waktu simulasi, jumlah byte yang dikirimkan dan jumlah stasiun pada kedua propagasi adalah sama.

Paper diorganisasikan sebagai berikut: bagian II akan dibahas secara singkat mengenai teori terkait propagasi, dilanjutkan pada bagian berikutnya metodologi yang digunakan. Bagian IV menyangkut analisis topologi diikuti hasil dan diskusi.

2. Teori

2.1 Arsitektur Jaringan Nirkabel

Standardisasi 802.11 mendefinisikan tiga jenis dari topologi jaringan nirkabel seperti *Basic Service Set* (BSS), *Independent Basic Service Set* (IBSS), dan *Extended Service Set* (ESS). Pada topologi BSS, stasiun yang berada dalam satu area dapat berkomunikasi satu sama lain yang memiliki paling sedikit dua stasiun dalam satu BSS. Stasiun yang tidak termasuk dalam area tersebut tidak dapat berkomunikasi dengan stasiun yang berada dalam BSS. Topologi yang kedua adalah IBSS, dimana pada topologi ini terdiri dari lebih dari dua BSS topologi. Stasiun dalam area IBSS dapat saling berkomunikasi secara langsung dalam kondisi *ad hoc*, *peer-to-peer*, *full-mesh* atau *partial-mesh*. Pada topologi yang terakhir yaitu ESS, terdiri dari satu set atau lebih BSS topologi dimana membentuk satu *subnetwork*. ESS topologi ini dapat dihubungkan dengan menggunakan kabel atau nirkabel sebagai penyangganya (*backbone*). Gambar di bawah mendeskripsikan semua topologi dalam topologi nirkabel ('Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE 802.11 Standard' 1999).

Standardisasi IEEE 802.11 juga mendefinisikan dua model dari jaringan nirkabel. Model dari jaringan nirkabel tersebut adalah jaringan *ad hoc* dan jaringan infrastruktur. Pada jaringan *ad hoc*, konfigurasi adalah *peer-to-peer* dimana tidak ada satu stasiunpun yang berfungsi sebagai server. Jaringan ini biasanya digunakan pada keadaan sementara, sebagai contoh, dua orang yang berada dalam suatu kantor ingin bertukar informasi dengan menggunakan laptop. Namun, jaringan ini tidak dapat berkomunikasi dalam area yang besar (Nedelchev 2001).

Model infrastruktur merupakan suatu grup dari jaringan nirkabel atau BSS yang dihubungkan dengan kabel atau nirkabel sebagai penyangganya. Model ini terdiri dari paling sedikit satu stasiun dimana bertindak sebagai akses *point* yang akan dihubungkan dengan penyangga. Suatu akses point (AP) adalah stasiun dimana menghubungkan semua stasiun dalam suatu grup dari jaringan nirkabel ke sistem distribusi. Keuntungannya, stasiun yang lain yang berada pada BSS yang berbeda dapat saling berkomunikasi dengan adanya penyangga (Nedelchev 2001).

2.2 Hal yang Dibutuhkan dalam Jaringan Nirkabel

Banyak hal sangat dibutuhkan dalam pembangunan suatu jaringan nirkabel (Nicopoliditis, Papadimitriou & Pomportsis 2000; Stallings 2004). Beberapa dari hal tersebut merupakan hal yang penting yang harus digunakan untuk mendapatkan kapasitas yang tinggi, kemampuan berkomunikasi dalam jarak dekat, kemampuan untuk melaksanakan *broadcast* dan koneksi yang tinggi antara stasiun. Hal yang dibutuhkan antara lain: 1) Throughput, 2) Jumlah stasiun yang berada dalam jaringan nirkabel, 3) Koneksi ke penyangga jaringan kabel, 4) Area yang dapat dijangkau 5) Pemakaian daya, 6)Keamanan dan kehandalan, 7) *Roaming*, 8) Topologi yang dinamik, dan 9) Penempatan jaringan operasi dalam daerah yang sama.

2.3 Radio Propagasi

2.3.1 Propagasi Free Space

Model Propagasi Free Space digunakan untuk memperkirakan kekuatan sinyal yang diterima ketika *transmitter* dan *receiver* tidak memiliki penghalang antara mereka (*clear, unobstructed line-of-sight*). Contoh komunikasi yang menggunakan propagasi ini adalah komunikasi satelit dan *microwave line-of-sight radio*. Dengan penggunaan propagasi ini pada skala yang besar, propagasi ini memprediksikan bahwa kekuatan power yang diterima menurun sejalan dengan kenaikan *power* pada jarak antara *transmitter* dan *receiver* (*T-R separation*). *Power free space* diterima oleh antena *receiver* yang dipisahkan dari antena *transmitter* disimbolkan dengan d , yang diberikan oleh rumus berikut:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r \lambda^2 / ((4\pi)^2 d^2 L)$$

dimana, P_t adalah power yang ditransmisikan, $P_r(d)$ adalah power yang diterima dimana merupakan fungsi dari *T-R separation*, G_t adalah tegangan antena pada transmitter, d adalah jarak *T-R separation* dalam meter, L adalah loss factor sistem yang tidak berhubungan dengan propagasi ($L \geq 1$), dan λ adalah panjang gelombang dalam meter. Dimana $\lambda = c/f = 2\pi c/\omega_c$, f adalah frekuensi carrier dalam Hertz, ω_c adalah frekuensi carrier dalam radian per detik, dan c adalah kecepatan cahaya dalam meter per detik. Nilai P_t dan P_r harus memiliki satuan yang sama sedangkan G_t dan G_r tidak memiliki satuan. Nilai losses L ($L \geq 1$) biasanya dikarenakan adanya atenuasi pada jalur transmisi, filter losses dan antena losses dalam sistem komunikasi. Nilai $L = 1$ mengindikasikan tidak adanya loss dalam sistem perangkat keras. Model free space biasanya merepresentasikan daerah komunikasi yang berada disekitar / lingkaran *transmitter*. Jika *receiver* berada di lingkaran

tersebut, semua paket akan diterima. Selain itu, paket tersebut akan tidak mungkin diterima

2.3.2 Propagasi Refleksi Two Ray Ground

Dalam *mobile radio channel*, *single direct path* antara *base station* dan *mobile* terkadang hanya peralatan fisik biasa untuk propagasi dan rumus pada free space kurang akurat jika dalam penggunaannya berdiri sendiri. Model propagasi Two Ray Ground merupakan model yang berguna karena berdasar pada optik geometri dan dapat digunakan untuk direct path dan refleksi dari ground antara *transmitter* dan *receiver*. Model ini dirasa sangat akurat untuk memperkirakan kekuatan sinyal dalam skala luas dengan jarak beberapa kilometer untuk sistem *mobile radio* dengan menggunakan menara yang tinggi. *Power* yang diterima dengan jarak d diberikan oleh:

$$P_r(d) = P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2 / (d^4 L)$$

dimana h_t dan h_r adalah tinggi dari antena transmitter dan receiver, nilai L diasumsikan sama dengan nilai L pada propagasi free space, $L=1$. Untuk parameter yang lain, masih sama dengan parameter pada propagasi free space. Berdasarkan rumus matematika diatas, *power loss* lebih cepat hilang dibandingkan dengan rumus matematika pada model propagasi free space ketika jaraknya bertambah. Namun, Model ini tidak memberikan hasil yang baik untuk jarak yang terlalu dekat dikarenakan osilasi yang disebabkan oleh konstruktif dan destruktif yang merupakan kombinasi dari model ini.

3. Metode

Network Simulator-2, dikenal sebagai NS-2, digunakan sebagai program untuk menjalankan simulasi dari skenario jaringan nirkabel. NS-2 merupakan simulator jaringan diskrit dan simulator yang berbasis *object oriented*. NS-2 mendukung banyak *transport agent*; *routing*; jaringan kabel dan jaringan nirkabel; dan sebagainya. NS-2 menggunakan bahasa C++ dengan memanfaatkan Otcl sebagai *interface* konfigurasinya. Alasan penggunaan dua bahasa pemrograman pada NS-2 karena NS-2 memiliki banyak aplikasi yang berbeda dalam implementasinya. Pertama, karena NS-2 membutuhkan program yang dapat memanipulasi bit, mengimplementasikan *packet header*, dan melakukan algoritma dengan set data yang besar. Kedua, NS-2 membutuhkan program dengan parameter yang bervariasi atau mampu menjalankan skenario dengan jaringan yang luas. Untuk penjelasan lebih lanjut mengenai NS-2 dapat mengakses *website* NS-2 yang tersedia dengan alamat pada (*The Network Simulator ns-2*).

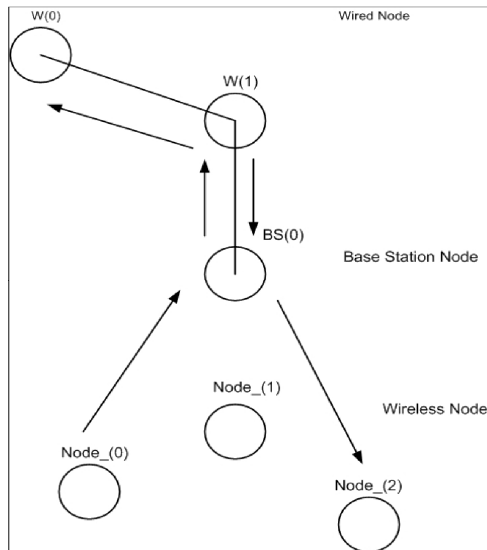
Program yang telah dibuat dengan menggunakan NS-2 biasanya disimpan dengan *extension .tcl* dimana mengimplementasikan kode

tcl. Setelah program tersebut dijalankan, hasil dari program tersebut merupakan *file* dengan *extension .tr*. *File* ini dinamakan *trace file* dimana memberikan informasi lebih lanjut mengenai hasil dari simulasi. Semua keadaan dari hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada *file* ini seperti perjalanan paket dari satu stasiun ke stasiun yang lain. Hasil simulasi dari *file .tcl* dapat pula dilihat pada *file* dengan *extension .nam*. *File* ini biasa dinamakan *Network Animator (Network Animator)* dimana *file* ini sudah termasuk ke dalam satu paket dari NS-2. Fungsi dari *file* ini adalah sebagai penggambaran dari suatu skenario jaringan dalam simulasi seperti topologi, pengiriman paket dan variasi data yang dipakai dalam NAM. Sebagai tambahan, *file* ini juga berisi informasi mengenai semua keadaan pada simulasi ini. Namun, kelemahan dari animator ini adalah tidak mendukung perjalanan data dari satu stasiun ke stasiun lainnya pada simulasi jaringan nirkabel. Karenanya, perkembangan pada topologi jaringan nirkabel terus dilakukan dan diharapkan dapat diperbaiki secepatnya (*Ns-Manual*).

Pengamatan hasil simulasi, pada file *.tr*, bukanlah hal yang mudah untuk dilakukan. Semua informasi mengenai studi simulasi dikumpulkan dalam file ini. Karenanya harus diamati secara cermat supaya data yang nantinya digunakan merupakan data yang tepat dan sesuai dengan hasil simulasi.

4. Analisa Topologi

Pada penelitian mengenai jaringan kabel ataupun nirkabel, dibutuhkan skenario jaringan yang akan digunakan. Skenario jaringan tersebut dinamakan topologi jaringan, dimana pada simulasi ini topologinya menggunakan dua stasiun sebagai jaringan kabel, tiga stasiun sebagai jaringan nirkabel dan satu stasiun sebagai base station. Masing-masing stasiun memiliki karakteristik yang berbeda. Untuk stasiun yang digunakan pada jaringan kabel hal yang perlu diperhatikan adalah dalam penentuan besar bandwidth, delay dan antrian yang akan digunakan pada jaringan tersebut. Sebagai tambahan adalah posisi dari jaringan tersebut apakah tegak lurus atau tidak. Berikut gambar topologi jaringan nirkabel yang digunakan:



Gambar 1. Topologi Jaringan Nirkabel

Topologi tersebut terdiri dari tiga bagian, yaitu: jaringan kabel, base station dan jaringan nirkabel. Jaringan kabel terdiri dari dua stasiun yaitu W(0) dan W(1) dimana setiap stasiun harus diset terlebih dahulu parameternya.

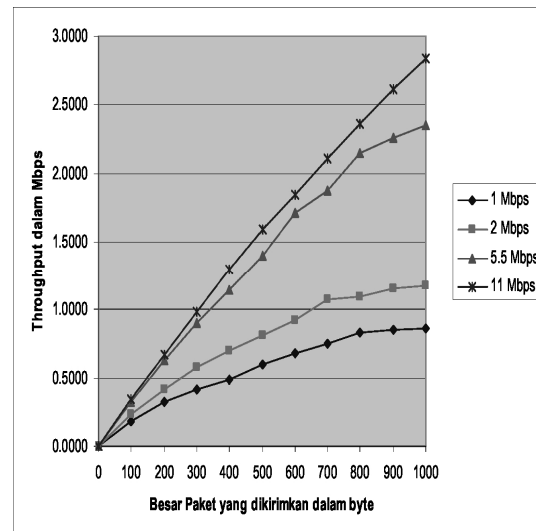
5. Hasil dan Diskusi

5.1 Propagasi Free Space

Hasil simulasi yang pertama adalah dengan menggunakan Free Space sebagai propagasinya. Pada penggunaan propagasi tersebut diterapkan pula dua metode yaitu metode basic access dan RTS/CTS. Penelitian difokuskan pada besarnya throughput yang dihasilkan dari penggunaan laju data 1 Mbps, 2 Mbps, 5.5 Mbps dan 11 Mbps. Throughput adalah banyaknya paket yang melewati media komunikasi dalam satuan bit per detik (*Throughput*).

5.1.1 Metode Basic Access

Penggunaan metode basic access pada simulasi yang pertama terdiri dari penggunaan laju data sebesar 1 Mbps, 2 Mbps, 5.5 Mbps dan 11 Mbps dimana tiap simulasinya menggunakan besar paket dari 100 byte sampai 1000 byte. Hasil simulasi pertama diberikan pada gambar berikut:

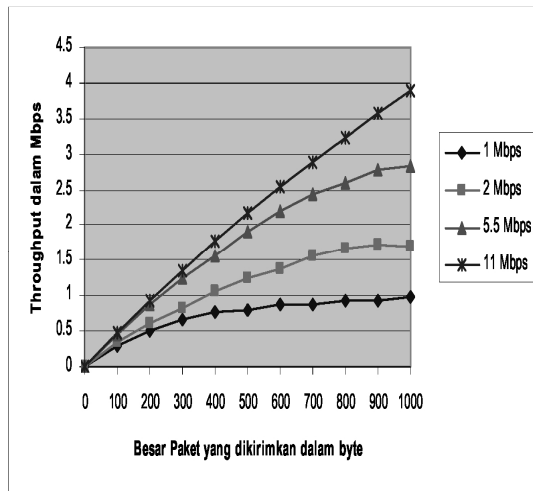


Gambar 2. Throughput Metode Basic Access Pada Propagasi Free Space

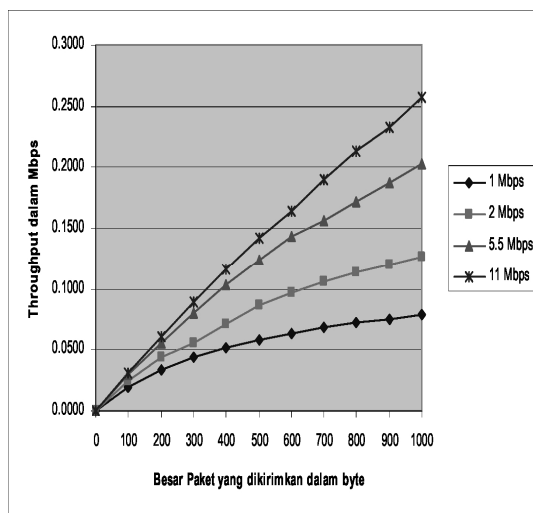
Pada Gambar 2 terlihat bahwa throughput semakin meningkat dengan meningkatnya paket yang dikirimkan. Namun, Jika membandingkan throughput dari laju data yang digunakan, terlihat bahwa semakin besar laju data maka semakin besar pula throughput yang dihasilkan. Sebagai contoh, pada saat pengiriman paket sebesar 500 byte, throughput yang dihasilkan dengan menggunakan laju data 1 Mbps hanya sebesar 0.60 Mbps. Namun dengan menggunakan laju data 11 Mbps throughput yang dihasilkan adalah 1.59 Mbps.

5.1.2 Metode RTS/CTS

Gambar 3 menunjukkan performa dari penggunaan metode RTS/CTS pada propagasi Free Space. Maksimal throughput yang dihasilkan pada metode ini adalah 3.88 Mbps apabila besar paket yang dikirimkan sebesar 1000 byte. Performa dari metode ini semakin membaik dengan digunakannya laju data yang semakin besar. Sebagai contoh, pada saat paket sebesar 500 byte dikirimkan dengan menggunakan laju data sebesar 1 Mbps throughput yang dihasilkan hanya sebesar 0.79 Mbps. Sedangkan apabila dengan menggunakan besar paket yang sama dikirimkan menggunakan laju data 11 Mbps, besar throughput yang dihasilkan adalah sebesar 2.17 Mbps.



Gambar 3. Throughput Metode RTS/CTS Pada Propagasi Free Space



Gambar 4. Throughput Metode Basic Access Pada Propagasi Two Ray Ground

5.2 Propagasi Refleksi Two Ray Ground

Hasil simulasi yang kedua menggunakan propagasi Two Ray Ground dimana propagasi ini merupakan propagasi yang menggunakan refleksi. Maksudnya adalah sinyal yang dikirimkan tidak dapat langsung diteruskan tetapi dipantulkan terlebih dahulu oleh pembatas yang ada didepannya. Sama seperti propagasi Free Space, pada propagasi ini juga diterapkan dua metode yaitu metode basic access dan RTS/CTS dengan menggunakan laju data sebesar 1 Mbps, 2 Mbps, 5.5 Mbps dan 11 Mbps. Hasil simulasi juga masih difokuskan pada throughput Sub bab berikut merupakan hasil dari simulasi.

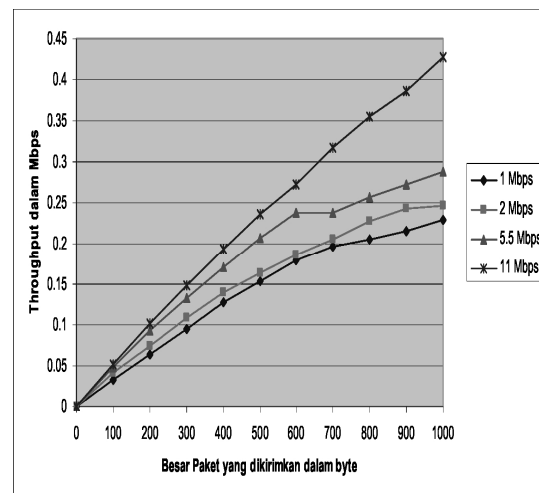
5.2.1 Metode Basic Access

Gambar 4 menunjukkan throughput yang dihasilkan dari simulasi dengan menggunakan

metode basic access. Throughput yang dihasilkan dengan menggunakan laju data sebesar 11 Mbps mencapai lebih dari 0.25 Mbps sedangkan dengan menggunakan laju data sebesar 1 Mbps throughputnya hanya berkisar pada 0.06 Mbps ketika paket yang dikirimkan sebesar 1000 byte.

5.2.2 Metode RTS/CTS

Throughput yang dihasilkan dari simulasi dengan menggunakan metode RTS/CTS diberikan oleh gbr.5. Berdasarkan gambar terlihat pengiriman paket dengan laju data sebesar 11 Mbps masih memberikan maksimum throughput sedangkan dengan laju data sebesar 1 Mbps memberikan minimum throughput. Maksimum throughput dicapai sekitar 0.42 Mbps sedangkan minimum throughput dicapai sekitar 0.27 Mbps ketika paket yang dikirimkan sebesar 1000 byte.



Gambar 5. Throughput Metode RTS/CTS Pada Propagasi Two Ray Ground

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dengan topologi digunakan di mana nodenya berada pada koordinat berikut:

```

$node (2) set Z 0.000000000000
$node_ (2) set Y_ 199.373306816804
$node_ (2) set X_ 591.256560093833
$node_ (1) set Z_ 0.000000000000
$node_ (1) set Y_ 345.357731779204
$node_ (1) set X_ 257.046298323157
$node_ (0) set Z_ 0.000000000000
$node_ (0) set Y_ 239.438009831261
$node_ (0) set X_ 83.364418416244
    
```

Propagasi dan metode yang tepat untuk digunakan dengan topologi tersebut adalah propagasi Two Ray Ground dengan metode basic access dimana dengan menggunakan propagasi dan metode tersebut throughput yang dihasilkan tidak lebih dari 0.30 Mbps, kanal efisiensi maksimal

sebesar 8% dan paket yang dibuang hanya 1760 bit per detik. Hasil tersebut merupakan hasil terbaik berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengan skenario yang telah ditentukan.

Daftar Pustaka

- [1] Nedeltchev, P. 2001, *Wireless Local Area Networks and the 802.11 Standard*, Available:[\[www.cisco.com/warp/public/784/packet/jul01/pdfs/whitepaper.pdf\]](http://www.cisco.com/warp/public/784/packet/jul01/pdfs/whitepaper.pdf).
- [2] *Network Animator*, Available: [\[http://www.isi.edu/nsnam/nam/\]](http://www.isi.edu/nsnam/nam/)
- [3] *The Network Simulator ns-2*, Available: [\[www.isi.edu/nsnam/ns.\]](http://www.isi.edu/nsnam/ns/)
- [4] Nicopoliditis, P., Papadimitriou, G. I. & Pomportsis, A. S. 2000, 'Review: Design Alternative for Wireless Local Area Networks', *International Journal of Communication Systems*, vol. 14, pp. 1 - 42.
- [5] *NS2 Tutorial*, Available: [\[http://nile.wpi.edu/NS/\]](http://nile.wpi.edu/NS/).
- [6] *Ns-Manual*, Available: [\[www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html\]](http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html).
- [7] 'Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification, IEEE 802.11 Standard'1999.
- [8] 'Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz band, IEEE Standard 802.11b'1999.
- [9] 'Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification: High-Speed Physical Layer in 5 GHz Band, IEEE Standard 802.11a'1999.
- [10] Stallings, W. 2002, *Wireless Communications and Networks*, First edn, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [11] Stallings, W. 2004, *Data Communications*, Seventh edn, Pearson Prentice Hall, United State of America.
- [12] *Throughput*, Available: [\[http://www.atis.org/tg2k/throughput.html\]](http://www.atis.org/tg2k/throughput.html).
- [13] Xiao, Y. & Rosdahl, J. 2002, 'Throughput and Delay Limits of IEEE 802.11', *IEEE Communications Letters*, vol. 6, no. No.8, pp. 355-357. Retrieved: 16 April 2003, from IEEE database.
- [14] Zhu, H. & Chlamtac, I. 2003, *An Analytical Model for IEEE 802.11e EDCF Differential Service*, Available: [\[www.utdallas.edu/~zhuhua/publications/icccn03.pdf\]](http://www.utdallas.edu/~zhuhua/publications/icccn03.pdf).