

IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN ALGORITMA VITERBI PADA PLATFORM LABVIEW**Hendra Setiawan^{1*}, Dwi Ana Ratna Wati¹, Henik Setyaningsih¹**¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia
Kampus Terpadu UII, Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55581

*Email: hendra.setiawan@uii.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan implementasi dan pengujian dekoder Viterbi pada platform Labview. Algoritma Viterbi yang digunakan merupakan komponen wajib pada standar wireless LAN IEEE 802.11. Pengujian dilakukan dengan membuat convolutional encoder untuk menghasilkan deretan bit yang merupakan masukan bagi dekoder Viterbi. Sebelum dimasukkan ke dekoder viterbi, deretan bit tersebut melewati model kanal AWGN dan model kanal Rayleigh flat fading. Dari hasil pengujian diperoleh unjuk kerja bit error rate (BER) 10^{-6} pada nilai signal to noise ratio (SNR) 8,6dB di kanal AWGN. Unjuk kerja tersebut dapat ditingkatkan dengan memperbesar nilai traceback. Sedangkan pada model kanal Rayleigh flat fading untuk menghasilkan unjuk kerja BER 10^{-4} diperlukan SNR 7dB lebih tinggi dibandingkan SNR pada kanal AWGN. Dibandingkan dengan penelitian lainnya yang sejenis, unjuk kerja yang diperoleh dari hasil pengujian menggunakan Labview tidak terpaud jauh dengan pengujian menggunakan platform lainnya.

Kata kunci: decoder Viterbi, convolutional encoder, Labview, traceback

1. PENDAHULUAN

IEEE 802.11 merupakan standar yang dikeluarkan oleh *institute of electrical and electronics engineering* (IEEE) pada tahun 1999 (Bhoyar et.al, 2013). Standar ini terdiri serangkaian spesifikasi kendali aksies medium dan lapisan fisik untuk mengimplementasikan komunikasi *wireless local area network* (WLAN) di frekuensi 2,4 3,6, 5, dan 60GHz. Berkaitan dengan lapisan fisik, standar ini mengalami perkembangan yang pesat sehingga dihasilkan beberapa varian standar seperti IEEE.802.11a, IEEE.802.11b, IEEE.802.11g, IEEE.802.11n, dan IEEE.802.11ac dengan kemampuan transfer data mencapai lebih dari 1Gbps (Gong et al., 2015).

Dari berbagai standar terbaru yang ada di group 802.11, terdapat sebuah komitmen yang sampai sekarang masih dipatuhi yaitu semua standar yang telah dikeluarkan harus mempunyai kemampuan (*compatible*) untuk standar pertama yaitu 802.11a. Konsep ini dikenal dengan *backward compatibility* (Perahia dan Stacey, 2013). Salah satu komputasi terberat di lapisan fisik pada standar 802.11a adalah komputasi dekoder Viterbi yang juga masih digunakan untuk beberapa varian standar 802.11 berikutnya. Sehingga perancangan dan evaluasi dekoder Viterbi masih terus dilakukan seiring perkembangan software simulator dan teknologi perangkat keras yang ada.

Dekoder Viterbi berada di sisi penerima dengan fungsi untuk melakukan *decode* dan koreksi terhadap data yang dikirim. Di sisi pengirim, data disandikan dengan menggunakan *forward error correction* (FEC) yang merupakan salah satu cara mendeteksi *error* yang memungkinkan penerima memperbaiki *error* secara otomatis tanpa permintaan *transmisi* ulang.

Penelitian sebelumnya tentang FEC telah banyak dilakukan sebelumnya seperti dikerjakan oleh Setiawan (2014) dalam penelitiannya optimasi FEC dilakukan dengan kode Hamming, kode BCH, dan kode Reed-Solomon. Kinerja utama yang diukur dalam penelitian ini adalah tingkat kemampuan metode konvolusi dalam mengoreksi kesalahan data selama *transmisi* dengan menghitung banyaknya bit yang mampu dikoreksi dari bit-bit yang salah (dari 0 menjadi 1 dan sebaliknya) dengan pembangkitan data secara acak. Hasil dari penelitian ini didapat bahwa besarnya *bit error rate* (BER) sangat dipengaruhi oleh besarnya perbandingan energi bit dan energi derau (E_b/N_0) dan perbandingan jaringan pada *transmisi* menggunakan konvolusi lebih tinggi dibandingkan tanpa konvolusi. Kelemahan dalam penelitian ini adalah belum tercapainya simulasi untuk kerapatan data tinggi (hingga batas maksimum *bit ratenya*) dan belum tercapainya simulasi *channel* yang lebih kompleks dengan memperhitungkan *multipath* dan *fading effect*, *interferensi* dan faktor-faktor propagasi radio.

Algoritma dekoder Viterbi bekerja menggunakan data yang diterima sebelumnya dan menghitung jarak konstelasi antar data yang berurutan (mencari jarak minimum yang memiliki nilai akumulasi *error matrix* yang terkecil). Prosedur selanjutnya adalah memperkirakan data yang paling mungkin diterima sehingga bit yang salah dapat dideteksi dan diperbaiki sehingga tidak terjadi data *error* atau data tidak valid pada penerima informasi data (Viterbi dan Omura, 2013).

Penelitian lain yang dilakukan oleh Chandra et.al (2013) yang melakukan analisis dan pengujian terhadap dua algoritma yang digunakan untuk mengawasandikan sandi turbo yaitu Soft-Output Viterbi Algorithm (SOVA) dan Maximum A Posteriori Algorithm (MAP). Hasil penelitian ini diperoleh algoritma MAP memberikan kemampuan koreksi yang sedikit lebih baik daripada SOVA, namun dengan kompleksitas algoritma MAP yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan SOVA.

Dalam sebuah jurnal ilmiah, Katta (2014), membahas konvolusi kode dengan algoritma Viterbi menggunakan matlab dengan *constraint length* 4 dan *bit rate* 1/2. Hasilnya grafik antara BER dan SNR dengan perbandingan *soft decision* dan *hard decision*, didapat bahwa *soft decision* tidak dapat menggunakan *hamming distance metric* karena resolusi yang terbatas. Dalam penelitian ini belum tercapainya simulasi *channel* yang lebih kompleks.

Sivasankar dan Thangarani (2014), membahas tentang aplikasi kenerja Viterbi untuk komunikasi *wireless* dimana Desain encoder konvolusi dan decoder Viterbi menggunakan FPGA (*Field Programmable Gate Array*) disimulasikan dan diimplementasikan dengan menggunakan verilog hdl dan xilinx spartan 3e kit. Pada pembahasannya menggunakan *constrain length* 3 dan 7 serta menggunakan *code rate* 1/2, hal ini kompatibel dengan banyak standar umum seperti 3GPP, IEEE 802.16 dan LTE. Hasil yang diperoleh daya yang diperlukan pada decoder Viterbi adalah 0,0081 watt dengan Xilinx Xpower Analyzer. Kesimpulannya analisis pada *constrain bit* menunjukkan bahwa semakin panjang *constrain bit* semakin meningkatkan *hardware* kompleksitasnya, dalam penelitian ini hanya perbandingan performansi power yang digunakan dalam hardware antara *constrain length* 3 dan 7 tidak memperhitungkan noise lainnya.

Implementasi dekoder Viterbi dengan menggunakan Matlab dilakukan oleh Lanning dan Chiheng (2012). Pada penelitian ini disajikan skema simulasi FEC dengan Matlab, dan melakukan dekode dengan Viterbi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa dekoder Viterbi merupakan cara paling tepat untuk mendekode sistem encoder FEC.

He, J et.al. (2012) menyajikan sistem dekoder Viterbi dengan kecepatan tinggi dan konsumsi daya yang rendah dengan menggunakan *trellis coded modulation* (TCM). Dari penelitian ini diperoleh bahwa dekoder Viterbi merupakan bagian paling dominan untuk menentukan konsumsi daya keseluruhan. Implementasi dekoder Viterbi dengan *coding rate* 3/4 menunjukkan bahwa dengan metode dekoder Viterbi konvensional, dengan menggunakan precomputation dapat mengurangi konsumsi daya sebanyak 70% tanpa mengorbankan kinerja sistem dengan mengabaikan penurunan kecepatan proses.

Penelitian sejenis yang hanya berkaitan dengan optimasi kecepatan proses dekoder Viterbi dilakukan oleh Chakraborty et.al. (2013). Perancangan yang dilakukan menggunakan Gate Diffused Input Logic (GDIL) yang kemudian diimplementasikan di perangkat FPGA Virtex 6. Hasil pengukuran kecepatan proses diperoleh bahwa sistem yang diusulkan mampu menurunkan tunda proses sebesar 41%. Sedangkan penelitian lain yang fokus pada konsumsi daya dekoder Viterbi saja salah satunya dilakukan oleh Yu (2016). Yu, 2016, mampu merancang dekoder Viterbi dengan jumlah gerbang 26,2 ribu dan konsumsi daya 11mW saat frekuensi clock 73MHz.

Dekoder Viterbi banyak digunakan pada berbagai standar komunikasi wireless sehingga masih banyak penelitian yang dilakukan berkaitan dengan teknik dekoder ini, diantaranya berkaitan dengan implementasi dan unjuk kerja sistem. Implementasi teknik dekoder Viterbi dapat dilakukan baik di platform *software* maupun *hardware*. Salah satu implementasi *software* yang sering digunakan adalah dengan menggunakan MATLAB. Karena teks *based* maka implementasi dengan MATLAB memerlukan penguasaan bahasa pemrograman C yang bagus. Bagi yang tidak menyukai pemrograman teks *based* maka pemrograman berbasis model (*model based*) merupakan solusi yang terbaik. Salah satu *software* perancangan sistem yang berbasis pada model adalah LabVIEW.

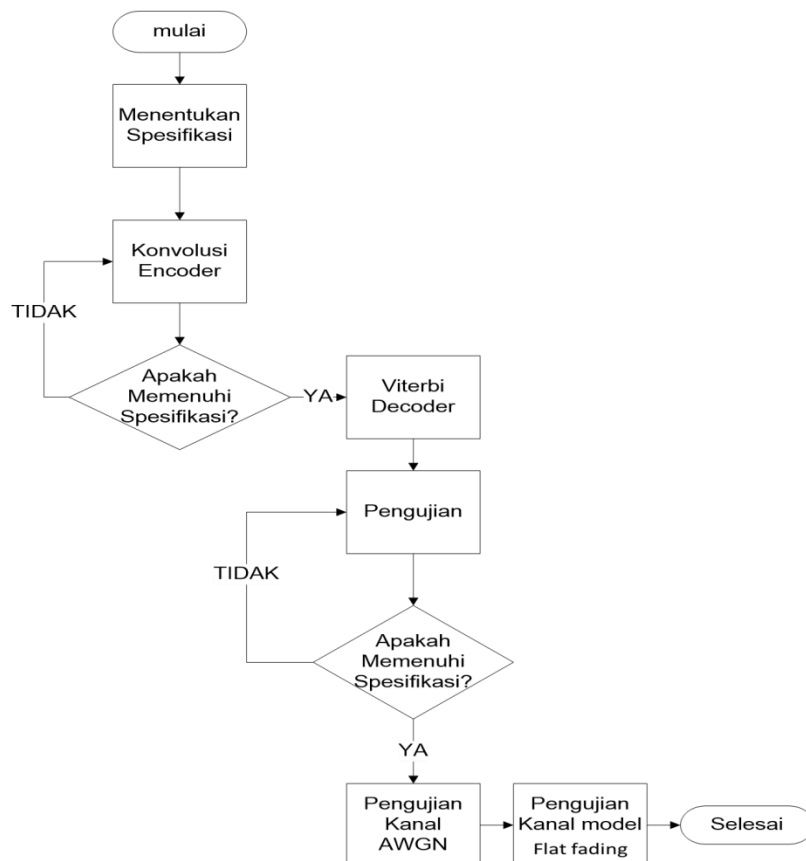
LabVIEW adalah sebuah bahasa pemrograman grafis yang menggunakan *icon* sebagai pengganti barisan kalimat atau teks untuk menciptakan program. Apabila bahasa pemrograman berbasis teks seperti Visual Basic menggunakan urutan instruksi dan kode tertentu untuk

menentukan jalannya program, maka LabVIEW menggunakan aliran data dalam bentuk Gambar yang dapat disusun dari kiri ke kanan (Artanto, 2009). *Software* ini pertama kali dikembangkan oleh perusahaan *National Instruments* (NI) pada tahun 1986. LabVIEW merupakan kepanjangan dari *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* (Jumianto, 2014).

Software LabVIEW ini telah dipakai secara luas di industri dan laboratorium-laboratorium sebagai sebuah *software* standar untuk alat akuisisi data dan instrumentasi. LabVIEW merupakan *software multiplatform*, yaitu *software* yang dapat dijalankan pada *Windows, Mac, Linux, PDA, platform-platform real-time*, dan bahkan dapat ditanamkan pada *chip* FPGA dan mikroprosesor-mikroprosesor 32-bit (Jumianto, 2014). Dari beberapa kelebihan tersebut, maka penggunaan *software* LabVIEW untuk mensimulasikan dan memodelkan layer fisik SC-FDMA dirasa menjadi pilihan yang tepat.

2. METODOLOGI

Penelitian ini meliputi perancangan sistem FEC dan dekoder Viterbi. Masing-masing bagian dilakukan pengujian secara terpisah sebelum digabungkan. Setelah secara fungsional bekerja dengan baik dan telah memenuhi ketentuan yang telah ditetapkan diawal, maka FEC dan dekoder Viterbi digabungkan dalam suatu sistem untuk kemudian dilakukan pengujian dalam beberapa kondisi kanal. Urutan proses tersebut digambarkan dalam diagram alir Gambar 1. berikut ini:



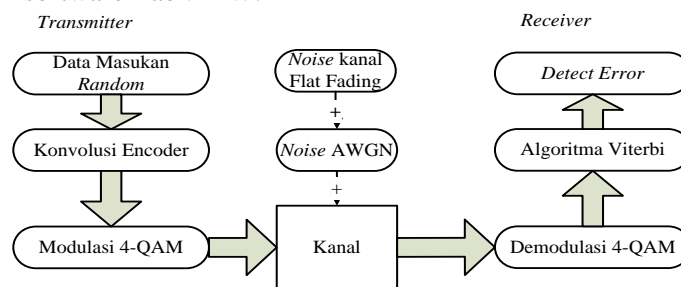
Gambar 1. Diagram alir penelitian

Sebelum dilakukan perancangan dan simulasi, langkah awal yang terlebih dahulu diperlukan adalah penentuan parameter dan spesifikasi sistem yang akan dibuat. Tabel 1 berikut merupakan spesifikasi yang digunakan dalam penelitian ini yang ditentukan berdasarkan standart wireless LAN 802.11a.

Tabel 1. Parameter sistem

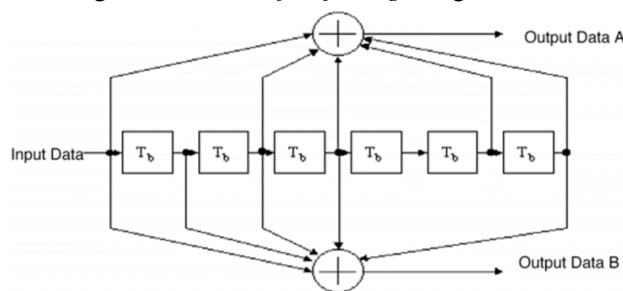
Parameter	Nilai
Frekuensi kerja (fc)	5GHz
Kecepatan data maksimum	54Mb/s
kecepatan data input FEC per sampling	1
kecepatan data output FEC per sampling	2
Code rate	1/2
Panjang register	7
Generator polinomial	$g_0 = 133_8, g_1 = 171_8$
Skema modulasi	QPSK
Target BER	10^{-6}

Perancangan dan model yang akan dibuat dibangun di platform LabVIEW. Untuk keperluan pengujian unjuk kerja, maka beberapa blok yang terait dengan dekoder Viterbi dibuat sebagai pelengkap. Gambar 2 menunjukkan diagram blok perencanaan simulasi sistem secara keseluruhan dengan menggunakan software LabVIEW.



Gambar 2. Sistem pengujian

Sistem dimulahi dengan pembangkit data acak (data random) yang akan membangkitkan minimum 10^6 data digital yang selanjutnya dikirim ke FEC untuk dilakukan pengkodean. Berkaitan dengan FEC, Gambar 3 menunjukkan model FEC yang dirancang berdasarkan IEEE 802.11a (IEEE, 2012) dengan coding rate 1/2 dan constraint length 7. Karena code rate yang digunakan 1/2, maka jumlah data yang dihasilkan FEC adalah 2×10^6 bit. Data tersebut kemudian dikirim ke QAM modulator untuk diubah ke diagram konstelasi sebelum dilewatkan ke kanal transmisi. Di kanal transmisi, data mengalami perubahan karena adanya tambahan derau dan mengalami *multipath fading*. Dalam penelitian ini digunakan model *flat fading* dengan Rician *multipath*.



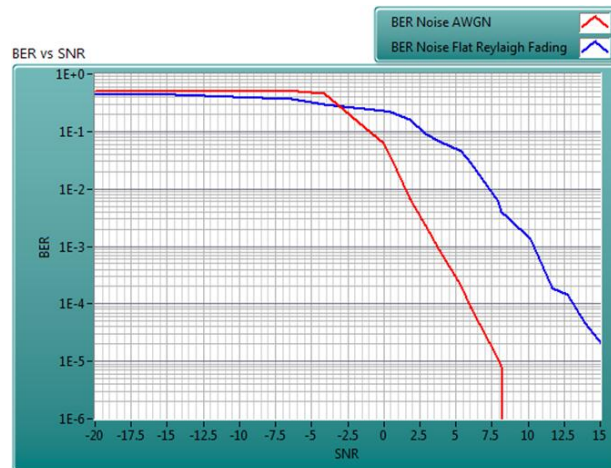
Gambar 3. Model convolutional encoder yang dibuat

Di sisi penerima, data dari kanal diterima dan dilakukan demodulasi untuk mendapatkan kembali data digital baseband. Data tersebut dimasukkan ke dekoder Viterbi dengan lebar data dua bit dalam satu *sampling*-nya. Hasil dekoder Viterbi ini dibandingkan dengan data asli untuk mendapatkan nilai *bit error rate* (BER). Dalam penelitian ini target BER yang ingin dicapai adalah 10^{-6} .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

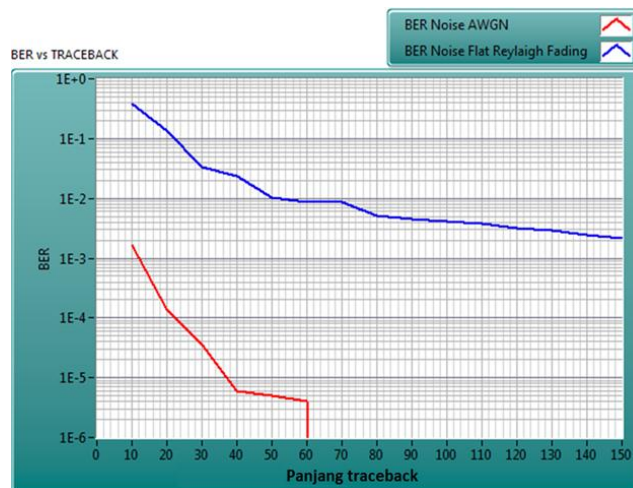
Parameter yang dipertimbangkan dalam pengujian sistem keseluruhan meliputi SNR, model kanal dan panjang *traceback*. Rentang parameter SNR yang diujikan dari -20dB sampai dengan

maksimum 15dB. Pada pengujian BER sebagai fungsi SNR diperoleh grafik di Gambar 4. Dari Gambar 4 terlihat bahwa untuk mencapai nilai BER 10^{-6} pada kanal AWGN diperlukan SNR minimal sebesar 8,6dB, sedangkan pada model kanal *multipath* diperlukan SNR yang lebih besar. Untuk mencapai BER 10^{-5} , terdapat selisih SNR antara kanal AWGN dan *multipath fading* sebesar 8dB, dengan unjuk kerja sistem di kanal *multipath* lebih buruk daripada kanal AWGN. Hal ini dapat dimaklumi karena model kanal *multipath* memberikan dampak yang lebih buruk ke sinyal yang diterima.



Gambar 4. Hasil pengujian BER sebagai fungsi SNR

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh traceback terhadap unjuk kerja yang dihasilkan. Untuk pengujian ini SNR dibuat konstan pada nilai 8,6dB, sedangkan panjang traceback dibuat bervariasi dari 10 sampai 150 dengan kenaikan per 10. Pengujian tersebut dilakukan untuk model kanal AWGN dan *multipath* dengan hasil ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengujian pengaruh panjang traceback terhadap BER

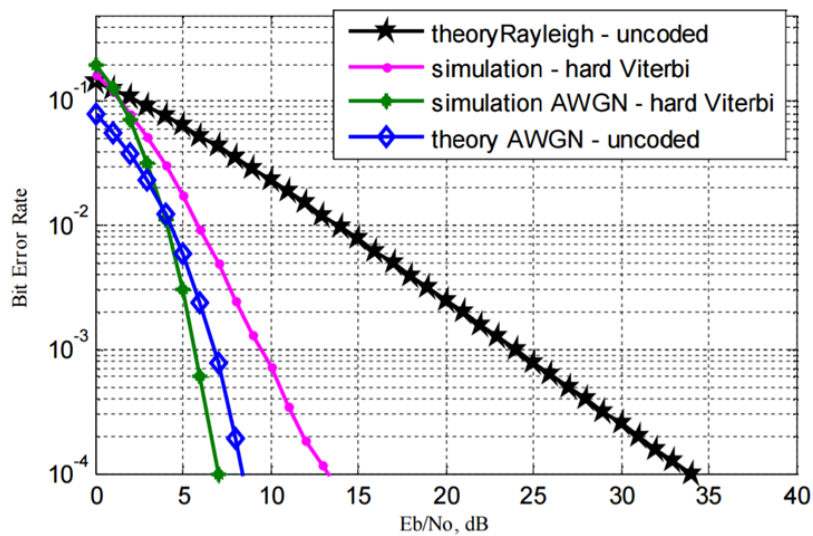
Dari hasil pengujian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, nampak bahwa untuk mencapai nilai BER 10^{-6} pada kanal AWGN dan SNR 8,6dB maka diperlukan panjang traceback minimal 60. Apabila panjang traceback diperbesar dengan unjuk kerja yang sama maka dimungkinkan untuk menurunkan nilai SNR.

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 5 juga nampak bahwa panjang *traceback* sangat berpengaruh pada unjuk kerja sistem, dimana pada kanal AWGN dan SNR 8,6dB setiap penambahan 10 data *traceback* maka nilai BER turun sebesar 0,5 dari nilai sebelumnya. Artinya untuk mencapai BER yang sama dengan nilai SNR yang lebih kecil maka diperlukan panjang *traceback* yang lebih besar.

Selanjutnya untuk perbandingan dengan kanal *multipath* diperoleh bahwa terdapat selisih yang cukup besar antara unjuk kerja di kanal AWGN dan *multipath* dengan variable panjang *traceback*. Dari Gambar 5 juga terlihat jelas bahwa walaupun panjang *traceback* telah mencapai 150, namun BER tidak mampu mencapai 10^{-3} .

Apabila dibandingkan dengan penelitian Islam dan Khandaker (2012) dimana implementasi algoritma Viterbi yang dilakukan dengan modulasi *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) pada *constraint length* 4 dengan channel AWGN (Gambar 6). Tabel 2. menunjukkan perbandingan antara penelitian Islam dan Khadaker (2012) dengan penelitian ini.

Combine BER for BCC with Viterbi decoding (TB=15) for BPSK in Rayleigh fading and AWGN chann



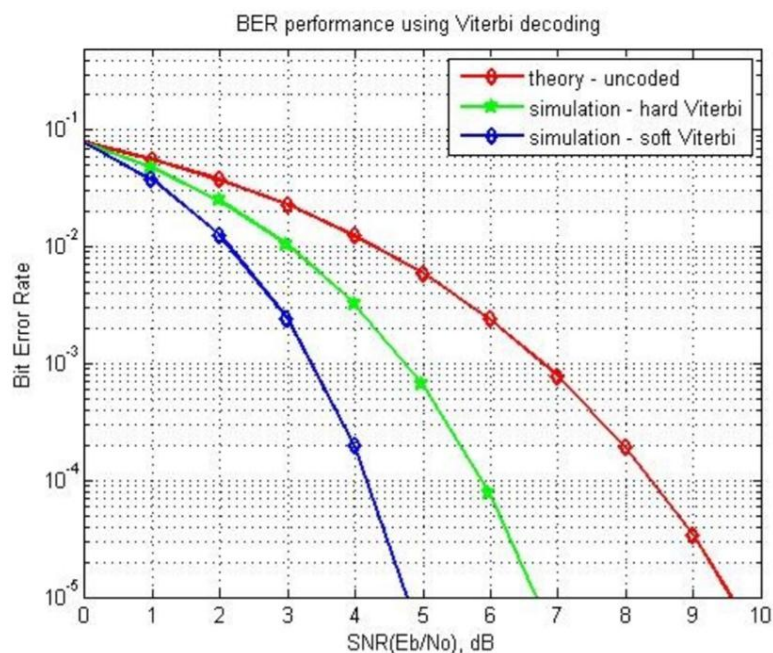
Gambar 6. Hasil yang diperoleh Islam dan Khandaker (2012)

Tabel 2. Perbandingan hasil penelitian dengan Islam dan Khandaker

Parameter	Penelitian ini	Penelitian Islam & Khadaker
Modulasi	QPSK	BPSK
Kanal AWGN, Nilai SNR saat BER = 10^{-4}	6dB	7dB
Kanal Raleigh, Nilai SNR saat BER = 10^{-4}	13dB	13dB

Hasil yang diperoleh pada penelitian tersebut adalah BER mencapai 10^{-4} pada SNR 7dB sebagaimana diperlihatkan di Gambar 6. Hasilnya lebih bagus pada penelitian ini karena pada BER 10^{-4} , SNR yang diperlukan sebesar 6 dB. Pada penelitian menggunakan kanal Rayleigh diperoleh BER mencapai 10^{-4} pada SNR sebesar 13dB yang berarti sama dengan hasil penelitian ini. Sedikit perbedaan di kanal AWGN dapat dikarenakan jenis modulasi yang berbeda serta panjang *traceback* yang berbeda, karena penelitian Islam dan Khandaker (2012) tidak dinyatakan panjang *traceback* dengan pasti.

Penelitian lainnya juga dilakukan oleh Katta (2014) dengan *constraint length* 4 hasilnya dapat dilihat pada Gambar 7 pada simulation hard Viterbi hasilnya pada SNR 6,8 diperoleh BER mencapai 10^{-5} sehingga hasil penelitian Katta sedikit lebih lebih baik dari penelitian ini (lihat Tabel 3). Hal ini dimungkinkan dengan penggunaan teknik modulasi yang memberikan unjuk kerja yang lebih baik, dimana simulasi di penelitian Katta (2014) menggunakan BPSK dan bukan QPSK. Selain itu perbedaan panjang *traceback* juga dapat menyebabkan perbedaan hasil simulasi yang diperoleh. Meskipun demikian hasil penelitian Katta mendekati hasil penelitian yang dilakukan di sini.



Gambar 7. Hasil yang diperoleh Katta (2014)

Tabel 2. Perbandingan hasil penelitian dengan Islam dan Khandaker

Parameter	Penelitian ini	Penelitian Katta (2014)
Modulasi	QPSK	Tidak diketahui
Kanal AWGN, Nilai SNR saat BER = 10 ⁻⁵	7,8dB	6,8dB

4. KESIMPULAN

4.1. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari pembahasan di atas adalah:

- (1) Pada penelitian ini telah berhasil dilakukan pemodelan dan simulasi FEC dan dekoder Viterbi untuk standar IEEE 802.11a dengan menggunakan LabVIEW.
- (2) Untuk mencapai nilai BER 10⁻⁶ pada kanal AWGN dan SNR 8,6dB maka diperlukan panjang traceback minimal 60.
- (3) Simulasi pada kanal Rayleigh *flat fading* diperoleh penurunan unjuk kerja sebesar 8dB dibandingkan simulasi pada kanal AWGN.
- (4) Panjang *traceback* sangat berpengaruh pada unjuk kerja sistem, dimana pada kanal AWGN dan SNR 8,6dB setiap penambahan 10 data traceback maka nilai BER turun sebesar 0,5 dari nilai sebelumnya.
- (5) Hasil perbandingan dengan penelitian lain diperoleh bahwa unjuk kerja yang diperoleh di penelitian ini tidak terpaut jauh dengan penelitian lainnya yang sejenis, sehingga Labview dapat menjadi alternatif platform simulasi sistem komunikasi wireless.

4.2. Saran

Adapun beberapa saran yang dapat dilakukan untuk perbaikan penelitian di masa depan adalah:

- (1) Melibatkan blok lainnya yang belum terlibat di penelitian ini, diantaranya blok *scrambler*, *convolutional encoder*, *interleaver*, *deinterleaver*, FFT dan IFFT.
- (2) Perlunya kajian mendalam tentang kompleksitas.
- (3) Diperlukan kajian lanjutan untuk kondisi optimal dari segi traceback dan unjuk kerja yang dihasilkan.
- (4) Simulasi dengan model kanal lainnya misalkan kanal model A, B, D untuk kondisi WLAN.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan bantuan pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Artanto, D. (2009). Alat Peraga CT Scan Berbasis LabVIEW, p.6.
- Bhoyar, R., Ghonge, M., & Gupta, S. (2013). Comparative Study on IEEE Standard of Wireless LAN/Wi-Fi 802.11 a/b/g/n. *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, 2(7).
- Chakraborty, D., Raha, P., Bhattacharya, A., & Dutta, R. (2013, January). Speed optimization of a FPGA based modified Viterbi Decoder. In *Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2013 International Conference on*(pp. 1-6). IEEE.
- Chandra, D., Setiyanto, B., & Kusumawardani, S. S. (2013). Implementasi pada FPGA atas Soft-Output Viterbi Algorithm (SOVA) untuk Pengawasandian Turbo. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, 2(4).
- Gong, M. X., Hart, B., & Mao, S. (2015). Advanced wireless lan technologies: IEEE 802.11 ac and beyond. *GetMobile: Mobile Computing and Communications*, 18(4), 48-52.
- He, J., Liu, H., Wang, Z., Huang, X., & Zhang, K. (2012). High-speed low-power Viterbi decoder design for TCM decoders. *IEEE transactions on very large scale integration (vlsi) systems*, 20(4), 755-759.
- IEEE Standards Association. (2012). 802.11-2012-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.
- Islam, M. S., & Khandaker, M. U. (2012). Performance comparison of Rate $\frac{1}{2}$ Convolutional Codes with BPSK on Rayleigh and AWGN channels for Memory or Memory less condition, *IJCIT*, 2(2), 14-19.
- Jumianto, S., Mujadin, A., & Elfidasari, D. (2014). Rancang Bangun Alat Ukur Viskositas Dalam Rangka Pengembangan Modul Praktikum Fisika Dasar. *Seri Sains Dan Teknologi*, 2(1), 48-51.
- Katta, K. (2014). Design of Convolutional Encoder and Viterbi Decoder using MATLAB. *International Journal for Research in Emerging Science and Technology*, 7.
- Lanning, M. E. N., & Chiheng, G. E. (2012). Simulation and Realization of Viterbi Decoder with Matlab in the Communication System. *Electronic Science and Technology*, 3, 010.
- Perahia, E., & Stacey, R. (2013). *Next Generation Wireless LANS: 802.11 n and 802.11 ac*. Cambridge university press.
- Setiawan, E. F. (2014). *Simulasi Kode Hamming, Kode Bch, Dan Kode Reed-Solomon Untuk Optimalisasi Forward Error Correction* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Sivasankar, G., & Thangarani, L. (2014). Performance Analysis Of Viterbi Decoder For Wireless Applications. *Advanced Computing*, 5(4), 1.
- Viterbi, A. J., & Omura, J. K. (2013). *Principles of digital communication and coding*. Courier Corporation.
- Yu, C., Lin, B. S., Cheng, P. H., & Su, Y. S. (2016). Low-power multi-standard Viterbi decoder for wireless communication applications. *International Journal of Electronics Letters*, 4(2), 228-238.