

PENGUKURAN UNJUK KERJA MODULASI GMSK PADA SOFTWARE-DEFINED RADIO PLATFORM

Eko Marpanaji¹, Bambang Riyanto², Armein Z.R. Langi³, Adit Kurniawan⁴

¹Jurusan Pendidikan Teknik Elektronika, Fakultas Teknik -UNY, Karangmalang Yogyakarta

^{2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, STEI, ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung

e-mail: eko@uny.ac.id¹, ekoaji332@students.itb.ac.id¹, briyanto@lssk.ee.itb.ac.id², langi@lss.ee.itb.ac.id³, adit@lstrgm.ee.itb.ac.id⁴

Abstract

This paper addresses performance measurement of Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) modulation which is implemented on Software-Defined Radio (SDR) platform using Universal Software Radio Peripheral (USRP) from GNU Radio. GMSK modulation is very popular and is adopted as GSM cellular phone modulation standard. The results of this research can be used as basic concept in developing wireless communication system based on SDR technology which is needed in Next-Generation Networks (NGN). The GMSK performance is measured in terms of Packet Error Rate (PER) with several of Eb/No, bit rate, modulation frequency, payload size, and gain values. Based on this research, the lowest PER can be achieved by setting Eb/No value equal to 20 dB, optimum bit rate = 256 kbps, $BT \geq 0.25$, optimum payload size = 4092 bytes, and optimum gain equal to 100.

Keywords: gaussian minimum shift keying, packet error rate, software-defined radio, usrp.

Abstrak

Tulisan ini memaparkan hasil penelitian tentang pengujian unjuk kerja modulasi GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) yang diimplementasikan pada sebuah platform Software-Defined Radio (SDR) atau Software Radio (SWR). Modulasi GMSK sangat populer dan digunakan sebagai standar modulasi telepon seluler GSM saat ini. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar pengembangan sistem komunikasi digital nirkabel berbasis SDR yang sangat diperlukan dalam pengembangan Next Generation Networks (NGN) di masa yang akan datang. Unjuk kerja modulasi GMSK diukur berdasarkan nilai Packet Error Rate (PER) yang dihasilkan dari berbagai variasi nilai Eb/No, bit rate, frekuensi modulasi, ukuran data yang dikirimkan, dan penguatan secara software. Berdasarkan hasil pengujian, nilai PER dari arsitektur SDR yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan unjuk kerja yang baik (nilai PER sangat kecil) pada saat nilai Eb/No adalah 20 dB; nilai bit rate optimum 256 kbps; nilai $BT \geq 0,25$; ukuran data optimum 4092 byte; gain (software) yang optimum adalah 100.

Kata kunci: gaussian minimum shift keying, packet error rate, software-defined radio, usrp.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi di masa datang tetap mengutamakan komunikasi berbasis nirkabel karena memiliki beberapa keuntungan terutama terhadap kebutuhan mobilitas pengguna. Sejalan dengan perkembangan tersebut, perubahan standar komunikasi begitu cepat dan isu kompatibilitas antar standar menjadi masalah yang serius bagi *provider*, karena sebagian besar teknologi komunikasi yang dikembangkan diimplementasikan dalam bentuk perangkat keras [1]. Perubahan standar komunikasi selalu mendorong investasi perangkat keras yang baru dan akan mengakibatkan mahalnya biaya langganan. Piranti komunikasi yang diperlukan bagi pengguna juga cepat kedaluwarsa sehingga pengguna selalu dipaksa untuk membeli perangkat komunikasi yang baru untuk memperoleh layanan baru yang diinginkan. Kondisi tersebut menyebabkan masyarakat tingkat ekonomi menengah kebawah tidak mampu menikmati layanan yang diberikan.

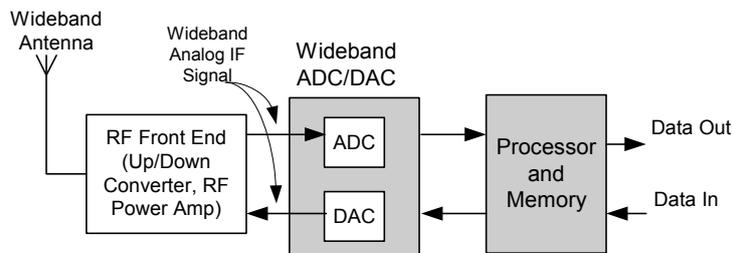
Software-Defined Radio (SDR) merupakan teknologi komunikasi berbasis nirkabel yang fungsinya ditentukan oleh perangkat lunak. SDR memiliki sifat fleksibel dan dapat dikonfigurasi

ulang sehingga perubahan standar dapat dilakukan pada perangkat lunak tanpa harus mengganti perangkat kerasnya. Teknologi SDR sangat dinantikan kehadirannya untuk pengembangan sistem telekomunikasi di masa datang yang tetap mengutamakan komunikasi nirkabel, termasuk untuk pengembangan telepon seluler dan bergerak generasi ke 3 (3G), *Next Generation Networks* (NGN), dan *Rural-Next Generation Networks* (R-NGN).

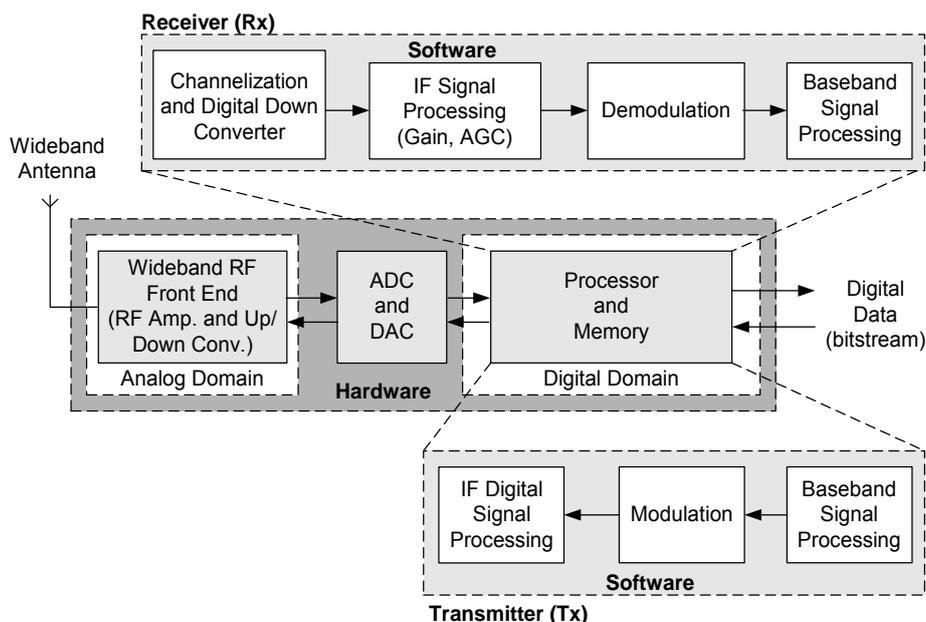
Software-Defined Radio (SDR), ada yang menyebut juga *Software Radio* (SWR), diperkenalkan pertama kali pada tahun 1991 oleh Joseph Mitola [2][3]. Istilah SDR ini digunakan untuk menunjuk sebuah kelas radio yang dapat dikonfigurasi ulang atau diprogram ulang [4], sehingga menghasilkan sebuah jenis perangkat komunikasi nirkabel dengan mode dan band frekuensi ditentukan oleh fungsi perangkat lunak.

Secara ideal, SDR memiliki keuntungan karena sifat fleksibilitas (*flexibility*), lengkap dan dapat dikonfigurasi ulang secara mudah (*complete and easy reconfigurability*), dapat diskala (*scalability*), dapat diprogram ulang (*reprogrammability*), serta dapat diperluas (*expandability*) [2][5].

Arsitektur SDR ideal akan menempatkan ADC/DAC sedekat mungkin dengan antenna untuk melakukan konversi analog ke digital atau digital ke analog, sehingga membutuhkan wideband ADC/DAC. Fungsi radio akan dilakukan oleh perangkat lunak yang dijalankan oleh prosesor, sehingga lebih fleksibel [2][4][6][7]. Namun demikian, keterbatasan teknologi dan mahalnya wideband ADC/DAC mendorong untuk sedikit mengubah arsitektur SDR dalam menempatkan ADC/DAC sehingga menjadi realistis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Arsitektur SDR Realistis



Gambar 2. Arsitektur SDR untuk Transmitter dan Receiver

Arsitektur SDR yang lebih realistis menempatkan wideband ADC/DAC setelah *Down Converter/Up Converter*, sehingga konversi analog ke digital atau sebaliknya berkaitan dengan sinyal *Intermediate Frequency (IF)* yang lebih rendah dibanding sinyal *Radio Frequency (RF)*. Arsitektur ini saat ini banyak dikembangkan dan dalam proses penelitian untuk implementasinya. Arsitektur SDR dilihat dari segi perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan dengan mengacu pada arsitektur SDR realistis ditunjukkan pada Gambar 2. Arsitektur tersebut saat ini banyak digunakan para peneliti dalam rangka mengembangkan teknologi SDR untuk berbagai keperluan, termasuk peneliti-peneliti SDR yang tergabung dalam kelompok GNU Radio dengan menggunakan ujung depan (*front end*) yang disebut *Universal Software Radio Peripheral* atau USRP. Istilah SWR digunakan sebagai alternatif istilah SDR yang menggunakan komputer pribadi (PC) atau *General Purpose Processor (GP)* sebagai prosesornya.

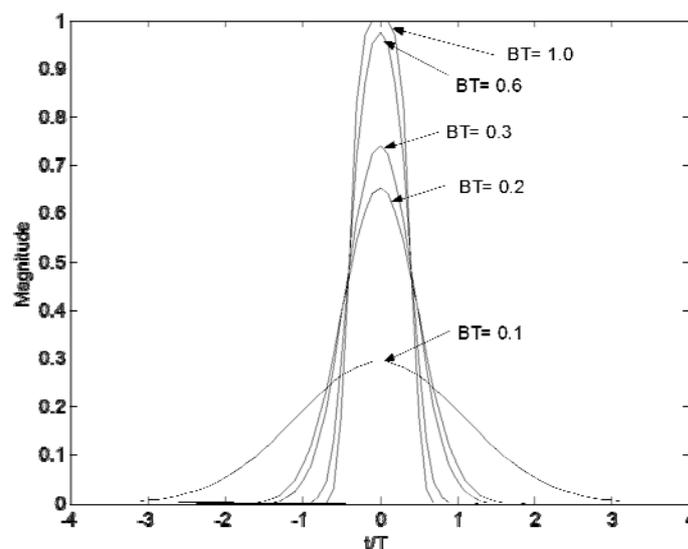
Malm (2005) dan Valentin (2006) mengembangkan lapisan *data link layer* untuk *tesbed software radio* menggunakan USRP GNU Radio dengan menguji *latency* dari RTT (*round trip time*) untuk pengiriman paket [8][9]. Pada penelitiannya, Malm dan Valentin juga menggunakan modulasi GMSK namun tidak menguji unjuk kerja skema modulasi tersebut. Paper ini akan melaporkan hasil pengujian unjuk kerja skema modulasi GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) yang diimplementasikan pada sebuah platform SDR dilihat dari nilai *Packet Error Rate (PER)*, sehingga diharapkan dapat melengkapi hasil penelitian Malm dan Valentin tersebut.

GMSK merupakan turunan dari MSK dimana pulsa kotak yang digunakan dalam modulasi MSK diganti dengan pulsa sinusoida dan ditambah dengan menerapkan tapis *Gaussian* dalam pembentukan pulsanya. Tanggapan tapis *Gaussian* akan menghasilkan sinyal yang memiliki *side lobe* yang rendah dan *main lobe* yang lebih sempit dibanding pulsa kotak. Karena modulasi menggunakan tapis *Gaussian* maka modulasi ini kemudian disebut dengan *Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK)*. Hubungan antara bandwidth pada awal modulasi (B) dengan perioda bit (T) merupakan bandwidth dari sistem modulasi GMSK. Pada sistem seluler GSM nilai perkalian bandwidth dengan perioda bit ini dipilih sama dengan 0,3 (BT = 0,3) dengan laju bit saluran sebesar 270,8 kbps.

Tanggapan tapis Gaussian ditentukan dengan persamaan [10]:

$$g(t) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\log 2}} BT_b \left(\frac{t}{T_b} - \frac{1}{2} \right) \right) - \operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\log 2}} BT_b \left(\frac{t}{T_b} - \frac{1}{2} \right) \right) \right] \quad (1)$$

Gambar 3 berikut ini menunjukkan hasil simulasi tanggapan tapis *Gaussian* dari persamaan (1) dengan variasi nilai BT.

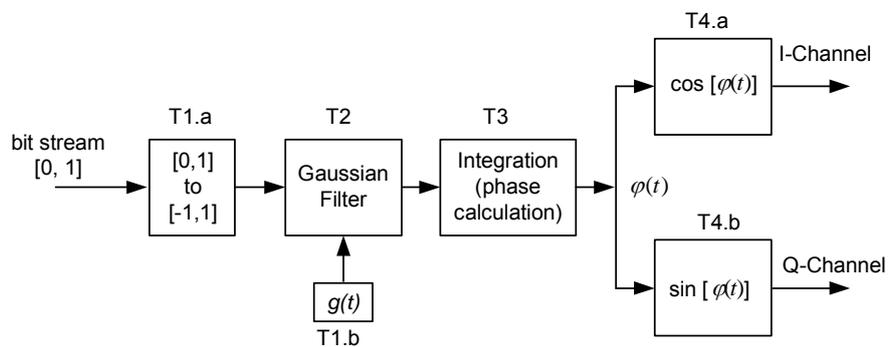


Gambar 3. Tanggapan tapis *Gaussian* dengan variasi nilai BT

Gambar 4 menunjukkan blok diagram sebuah modulator GMSK. Proses yang terjadi pada modulator dimulai dengan mengubah bit stream $x(n)$ dengan level 0 dan satu menjadi bipolar stream bit $x'(n)$ dengan level -1 dan 1. Setelah itu, bipolar stream bit ditapis dengan tapis Gaussian yang memiliki tanggapan tapis $g(t)$. Proses tapis ini pada dasarnya melakukan konvolusi antara bipolar bit stream $x'(n)$ dengan $g(t)$. Hasil konvolusi kemudian diintegrasikan untuk menghitung nilai fase $\varphi(t)$. Fase ini akan menentukan sinyal I-channel dan Q-channel dengan menggunakan persamaan:

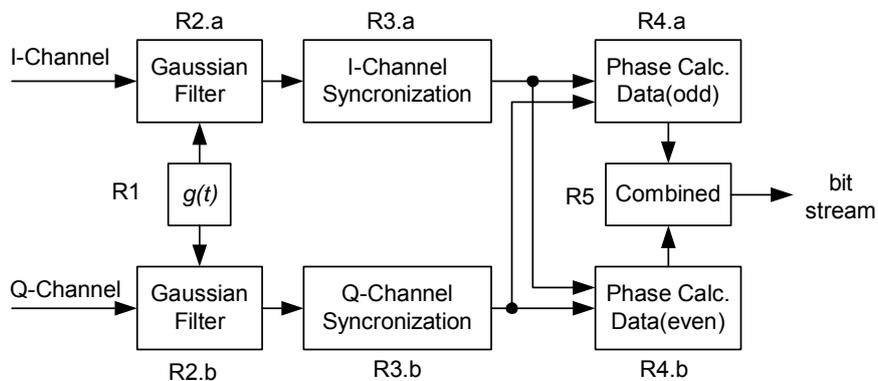
$$I = \cos(\varphi(t)) \quad (2)$$

$$Q = \sin(\varphi(t)) \quad (3)$$



Gambar 4. Modulator GMSK

Sinyal *I-channel* dan *Q-channel* inilah yang akan ditransmisikan ke udara dan akan diproses oleh demodulator GMSK. Proses yang terjadi pada GMSK demodulator untuk memperoleh kembali bit stream sinyal informasi secara lengkap ditunjukkan Gambar 5. Sinyal I-channel dan Q-channel akan diproses secara terpisah dalam hal filtering dan sinkronisasinya. Proses selanjutnya adalah perhitungan fase untuk deretan data yang memiliki indeks bilangan ganjil dan genap secara terpisah dari sinyal I-channel dan Q-channel hasil sinkronisasi untuk mendeteksi deretan bit dengan level 0 dan 1 kembali. Akhirnya, deretan bit secara lengkap dapat diperoleh dengan menggabungkan kedua deretan bit sehingga diperoleh kembali deretan bit sinyal informasi seperti yang dikirimkan oleh GMSK modulator.



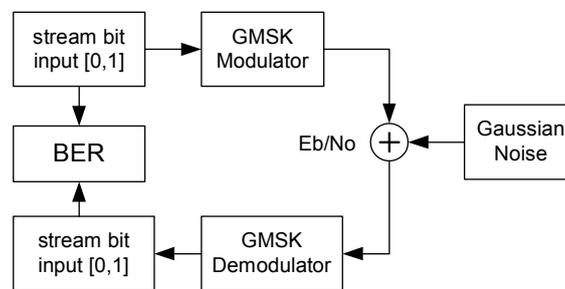
Gambar 5. Demodulator GMSK

Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan dalam membangun *platform* perangkat lunak radio untuk komunikasi nirkabel. Paper ini merupakan bagian dari penelitian yang sedang dilakukan dalam mengembangkan *platform* SDR dengan menggunakan komponen-komponen komoditas, dan akan menjawab pertanyaan penelitian “bagaimana membangun *platform* SDR menggunakan komponen komoditas?”.

2. METODE PENELITIAN

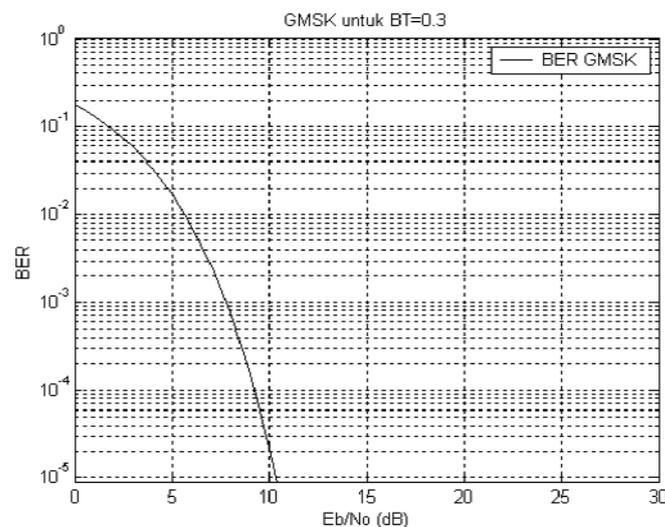
2.1. Simulasi BER Modulasi GMSK

Saluran *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) dapat mempengaruhi sinyal yang ditransmisikan sehingga mengakibatkan kesalahan informasi. Perbedaan pesan yang dikirim dengan pesan yang diterima pada sistem komunikasi digital biasanya dinyatakan dengan *bit error rate* (BER). Konfigurasi simulasi BER modulasi GMSK ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil simulasi pengaruh saluran AWGN terhadap BER untuk skema modulasi GMSK ditunjukkan pada Gambar 7. Simulasi bertujuan untuk mengamati nilai BER yang diperoleh akibat perubahan kualitas sinyal atau sering dinyatakan sebagai nilai E_b/N_0 , dimana E_b adalah energi tiap bit dan N_0 adalah daya noise yang biasanya dinyatakan dalam dB.



Gambar 6. Konfigurasi Simulasi BER Modulasi GMSK

Gambar 7 menunjukkan simulasi nilai BER berdasarkan nilai E_b/N_0 . Berdasarkan hasil simulasi untuk beberapa nilai E_b/N_0 , maka nilai $BER \leq 10^{-3}$ apabila $E_b/N_0 \geq 5$. Dengan demikian, BER sebesar 10^{-3} dapat diperoleh jika perbandingan antara E_b terhadap N_0 lebih besar atau sama dengan 5.



Gambar 7. Hasil simulasi BER terhadap variasi nilai E_b/N_0

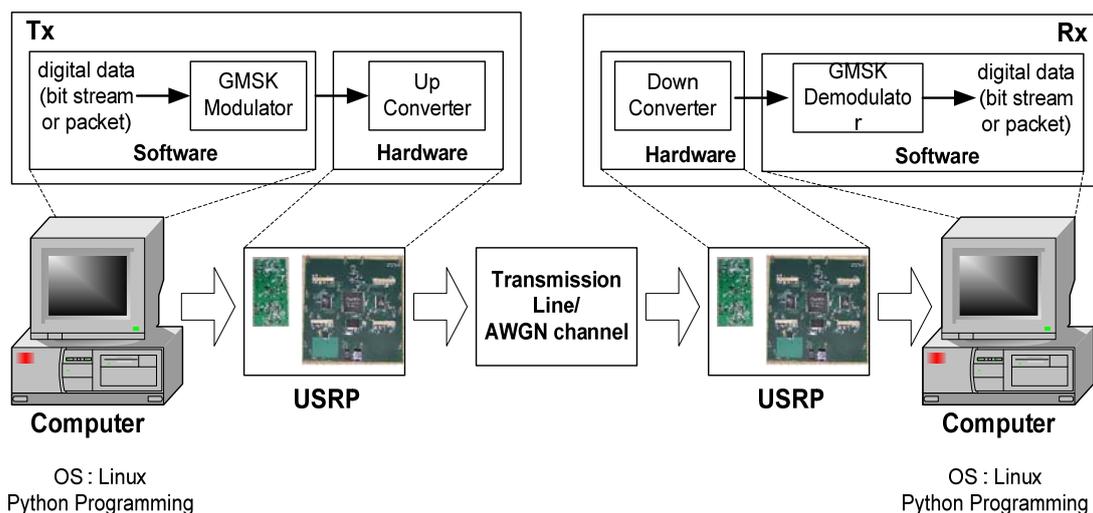
2.2. Konfigurasi Sistem SDR

Penelitian ini menggunakan arsitektur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, yaitu menggunakan perangkat ujung depan yang berfungsi sebagai up/down converter dan menggunakan komputer pribadi (PC) sebagai prosesornya. Penelitian ini menggunakan 2 buah komputer pribadi (PC) dengan spesifikasi seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Komputer yang digunakan harus memiliki port USB versi 2.0 untuk mendukung koneksi dengan board USRP. Bahasa pemrograman yang digunakan adalah Python dengan beberapa fungsi blok ditulis menggunakan bahasa C++.

Tabel 1. Spesifikasi Komputer yang digunakan dalam penelitian

No	Komponen	Komputer 1	Komputer 2
1.	Processor	AMD Athlon XP1800+, 1.53 GHz, FSB 533 MHz	Intel Pentium 4, 2.93 Ghz, FSB 533 MHz
2.	RAM	DDR 333 MHz, 256 Mbyte	DDR 400 MHz, 2 x 256 MByte
3.	Operating System	Linux Fedora Core-4, 2.6.11-1.i369	Linux Fedora Core-4, 2.6.11-1.i369

Konfigurasi sistem SDR yang menggunakan PC sebagai prosesornya sering disebut juga dengan istilah *Software Radio* atau disingkat SWR. Konfigurasi sistem SDR yang digunakan dalam penelitian ini secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Konfigurasi sistem pengujian skema modulasi GMSK berbasis SDR

Sistem SDR menggunakan perangkat ujung depan yang disebut dengan USRP dengan fungsi utama menghasilkan sinyal IF digital dan sebuah komputer PC sebagai pengolah sinyal digital tersebut. Sebagian besar perangkat lunak yang digunakan untuk menjalankan fungsi radio dikerjakan oleh komputer yaitu channel coding berupa pembentukan paket dan proses modulasi/demodulasi. USRP dan komputer dihubungkan melalui port USB 2.0. Spesifikasi USRP dan komputer yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada bagian berikut ini.

Universal Software Radio Peripheral (USRP) merupakan sebuah perangkat ujung depan (*front end*) dalam sebuah arsitektur SDR yang sekarang banyak digunakan oleh para peneliti SDR dari kelompok GNU Radio. Ujung depan ini melakukan beberapa fungsi antara lain: (1) mengubah frekuensi sinyal RF (*Radio Frequency*) menjadi sinyal IF (*Intermediate Frequency*) atau sering disebut sebagai *down-converter* dan proses sebaliknya yang sering disebut dengan *up-converter*; (2) melakukan konversi dari sinyal IF analog menjadi sinyal IF digital menggunakan A/D converter dan proses sebaliknya menggunakan D/A converter; (3) melakukan proses digital down converter (DDC) dan desimasi untuk menurunkan laju data

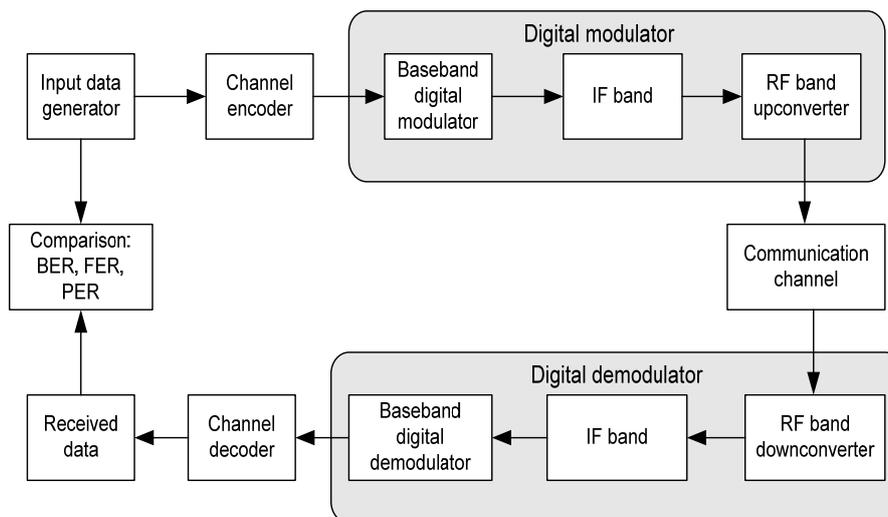
digital yang akan dikirimkan melalui port USB. Proses ini dilakukan dengan menggunakan sebuah chip FPGA; (4) melakukan komunikasi dengan komputer (mengirim dan menerima sinyal digital) menggunakan antarmuka port USB 2.0. USRP terdiri dari sebuah *main board* untuk menjalankan proses (2), (3), dan (4), serta beberapa *daughterboard* untuk melakukan proses (1). USRP mendukung 4 buah *daughterboard* yaitu dua buah *daughterboard* untuk pemancar (Tx) dan dua buah *daughterboard* untuk penerima (Rx).

Spesifikasi main board USRP yang digunakan dalam penelitian ini adalah: port USB 2.0 untuk koneksi dengan komputer, ADC 12-bit dengan kecepatan sampling 64 MSPS sehingga dengan prinsip *aliasing* dapat melakukan proses digitasi dengan jangkauan frekuensi *aliasing* -32 MHz sampai dengan 32 MHz, DAC 14 bit dengan frekuensi clock 128 MSPS, sehingga memiliki frekuensi *Nyquist* sebesar 64 MHz dan sinyal analog yang dihasilkan terbatas 10 mWatt. Sedangkan untuk *daughterboard* yang digunakan adalah Basic Tx dan Basic Rx sehingga belum ada proses *down/up converter* dan frekuensi pemancar terbatas maksimum 50 MHz.

2.3. Kriteria Pengukuran Unjuk Kerja

Blok diagram pengujian unjuk kerja ditunjukkan pada Gambar 9. Kriteria pengujian arsitektur SDR dapat diukur melalui profile QoS (*Quality of Service*) [4][11]:

1. *Bit Error Rate* (BER) cukup rendah ($10^{-6} \leq BER \leq 10^{-3}$)
2. *Grade of Service* (GoS) > 95%
3. *Delay Spread* < 100 ms
4. *Packet Lost Rate* (PLR) < 10^{-2}



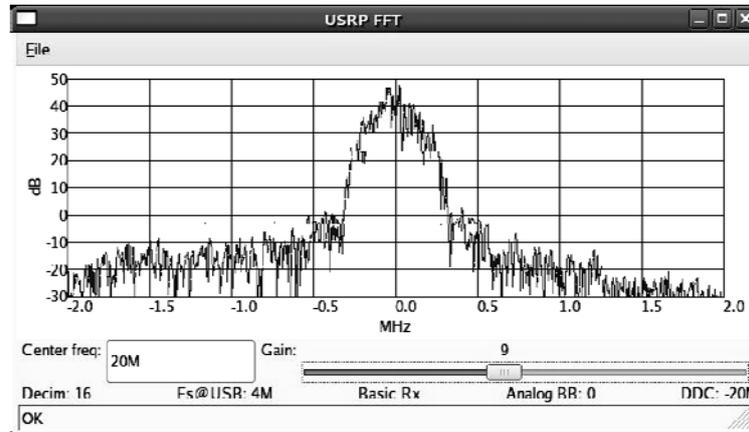
Gambar 9. Pengukuran Unjuk Kerja melalui BER, FER atau PER

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini mengamati unjuk kerja dari sistem komunikasi data digital berbasis SDR menggunakan skema modulasi GMSK. Saluran transmisi menggunakan kabel koaksial RG58 untuk menghubungkan sistem pemancar dengan sistem penerima. Hal ini dilakukan karena daya output pemancar dari *daughterboard* masih sangat kecil (hanya berkisar 1 mW) sehingga belum layak untuk transmisi menggunakan saluran udara.

Unjuk kerja sistem komunikasi data digital berbasis SDR menggunakan skema modulasi GMSK ini diamati dari nilai *Packet Error Rate* (PER) yang dihasilkan dengan melakukan variasi perubahan nilai bit rate, perbandingan E_b/N_0 , frekuensi modulasi, nilai perkalian BT tanggapan tapis *Gaussian*, dan besar ukuran data yang dikirimkan.

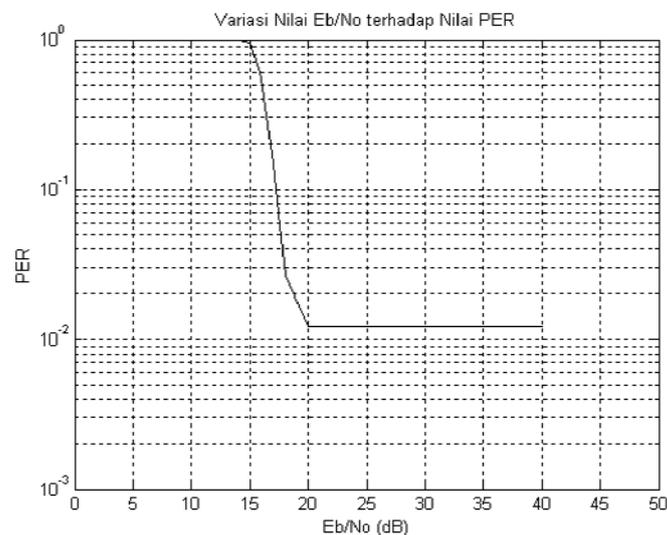
Pengujian unjuk kerja sistem SDR dengan menggunakan skema modulasi GMSK dilakukan dengan menjalankan file `benchmark_gmsk_tx.py` untuk sistem pemancar dan `benchmark_gmsk_rx.py` untuk sistem penerima. Hasil pengujian nilai PER dari berbagai variasi beberapa parameter tersebut di atas disajikan pada Gambar 10 sampai dengan 16.



Gambar 10. Spektrum modulasi GMSK

3.1. Pengaruh Nilai Eb/No terhadap nilai PER

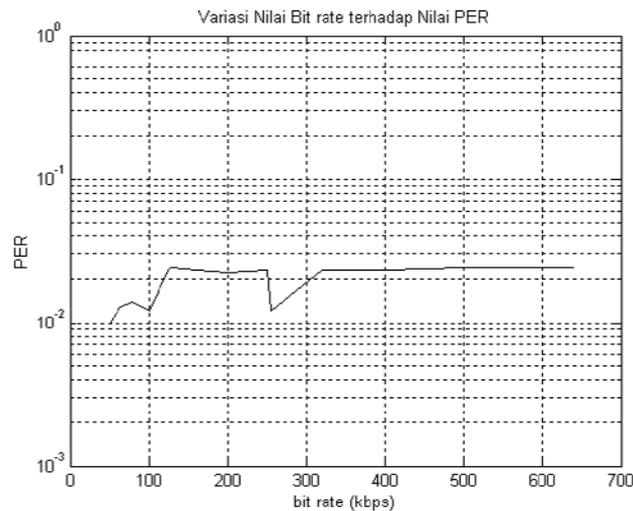
Gambar 11 menunjukkan grafik hubungan antara variasi nilai perbandingan Eb/No terhadap nilai PER yang dihasilkan. Berdasarkan grafik tersebut nampak bahwa semakin besar Eb/No maka semakin kecil nilai PER dan untuk Eb/No > 20 dB nilai PER sangat kecil sekali. Dengan demikian unjuk kerja GMSK sangat baik jika nilai Eb/No > 20 dB.



Gambar 11. Variasi nilai Eb/No terhadap nilai PER

3.2. Pengaruh Nilai Bit Rate terhadap Nilai PER

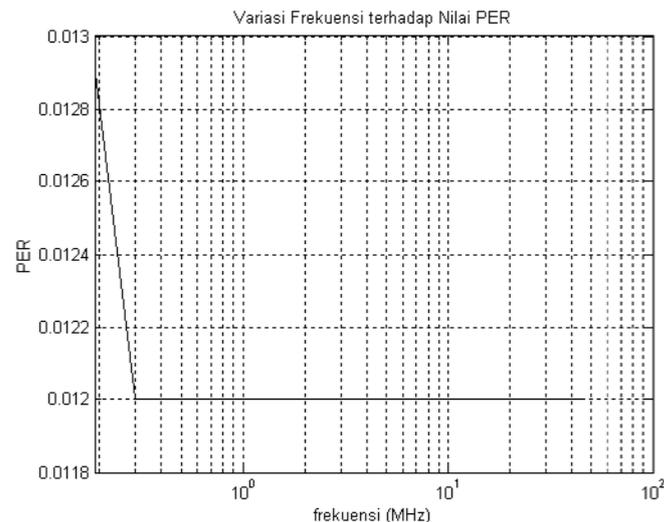
Gambar 12 menunjukkan hubungan antara variasi nilai bit rate terhadap nilai PER yang dihasilkan. Berdasarkan grafik tersebut, dapat dinyatakan bahwa semakin besar bit rate maka semakin besar pula nilai PER, saat bit rate > 128 kbps tampak nilai PER relatif konstan. Satu hal yang menarik adalah saat bit rate = 256 kbps diperoleh nilai PER yang kecil. Dengan demikian nilai optimum untuk bit rate adalah 256 kbps.



Gambar 12. Variasi nilai bit rate terhadap nilai PER

3.3. Pengaruh Nilai Frekuensi terhadap Nilai PER

Gambar 13 merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara perubahan besarnya frekuensi modulasi GMSK terhadap nilai PER yang dihasilkan. Pada penelitian ini nilai frekuensi maksimum yang dicoba adalah 44 MHz, dan untuk frekuensi di atas 44 MHz tidak dapat dipenuhi oleh USRP + Basic TX yang ada. Dari grafik yang ada ternyata frekuensi tidak berpengaruh terhadap nilai PER, tetapi terdapat nilai frekuensi minimum yang diperlukan untuk membawa sinyal dengan bit rate 256 kbps, yaitu untuk bit rate 256 kbps diperlukan frekuensi carrier minimal 0.19 MHz. Hasil penelitian ini tentu akan sangat berbeda jika digunakan antena dan medium transmisi udara (wireless). Redaman pada medium transmisi kabel koaksial sendiri akan semakin meningkat jika frekuensi diperbesar hanya pada percobaan ini range frekuensi yang digunakan masih sesuai dengan daerah kerja kabel koaksial.

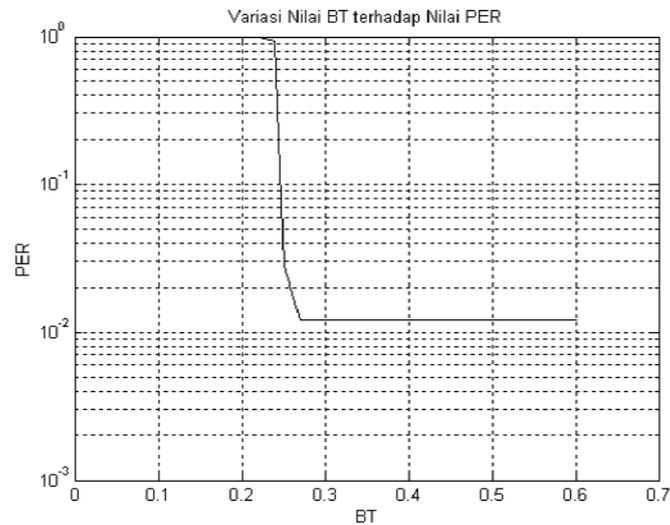


Gambar 13. Variasi besarnya frekuensi modulasi GMSK terhadap nilai PER

3.4. Pengaruh Nilai BT terhadap Nilai PER

Gambar 14 menunjukkan hubungan antara variasi nilai perkalian BT pada tapis Gaussian terhadap nilai PER yang dihasilkan. Berdasarkan grafik tersebut nampak bahwa

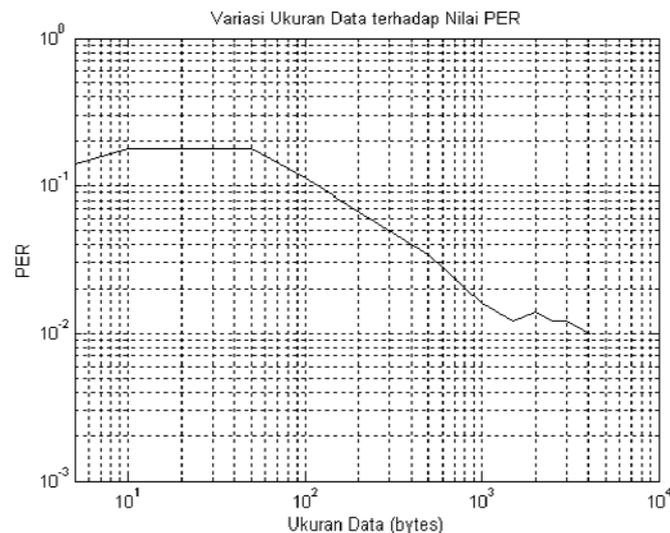
semakin besar nilai BT maka semakin kecil nilai PER yang dihasilkan dan nilai PER relatif konstan saat nilai BT > 0.27. Dengan mempertimbangkan standar pada sistem komunikasi GSM maka digunakan nilai optimum BT = 0.3.



Gambar 14. Variasi nilai BT terhadap nilai PER

3.5. Pengaruh Besarnya Ukuran Data terhadap Nilai PER

Gambar. 15 menunjukkan hubungan antara besarnya ukuran data yang dikirimkan dalam tiap paket terhadap nilai PER yang dihasilkan. Berdasarkan grafik tersebut dapat dikatakan bahwa secara umum semakin besar ukuran data yang menjadi payload pada paket maka semakin kecil pula nilai PER yang diperoleh. Ukuran data 4092 bytes merupakan ukuran data maksimum yang dapat ditangani dalam sistem ini. Dengan demikian nilai optimum untuk ukuran payload adalah 4092 byte.



Gambar 15. Variasi besarnya ukuran data terhadap nilai PER

3.6. Pengaruh Nilai Gain terhadap Nilai PER

Gambar 16 menunjukkan hubungan antara variasi besarnya nilai gain psecara software terhadap nilai PER yang dihasilkan. Berdasarkan grafik tersebut nampak bahwa semakin besar

-
- [6] Lehr, W., “**Software Radio: Implication for Wireless Services, Industry Structure, and Public Policy**”, [http:// itc.mit.edu/itel/docs/2002/Software_Radio_Lehr_Fuencis.pdf](http://itc.mit.edu/itel/docs/2002/Software_Radio_Lehr_Fuencis.pdf), 2002.
 - [7] Gutttag, J., “**Software Radio for Adaptive Networking**”, http://web.mit.edu/deshpande/center/downloads/presos/ideastream2003_wireless.pdf, 2003.
 - [8] Valentin, S., Malm, H. V., and Karl, H., “**Evaluating The GNU Software Radio Platform for Wireless Testbeds**”, http://typo3.cs.uni-paderborn.de/fileadmin/Informatik/AG-Karl/Pubs/TR-RI-06-273-gnuradio_testbed.pdf, February, 2006.
 - [9] Malm, H. V., “**Implementing Physycal and Data Link Control Layer in the GNU Radio Software-Defined Radio Platform**”, http://typo3.cs.uni-paderborn.de/fileadmin/Informatik/AG-Karl/Pubs/vmalm05-sa-gsr_aloha.pdf, 2005.
 - [10] Haykin, S., “**Communication System**”, 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, pp. 396-402, 2004.
 - [11] Harada, H., Prasad, R., “**Simulation and Software Radio for Mobile Communications**”, Boston: Artech House, 2002.