

Perancangan *Broadband RF Power Amplifier* 2,3 GHz pada 4G LTE *Time Division Duplex*

Syifaal Fuada¹

Abstract—This paper reports a design of *Broadband RF Power Amplifier TDD 4G LTE* operating at frequency 2,3 GHz – 2,36 GHz, according to the working frequency of the service provider Smartfren's BTS. This RF Power Amplifier uses class A amplifier with GaN HEMT transistor type CREE CGH40120F. This design is simulated using Advanced Power Design program (ADS) version 2014. The simulation results show that the Power Amplifier is stable ($K > 1$) at a frequency of 2.3 GHz with the S11 and S22 match, generating 43.44 dBm output power 22,08 Watt with a gain of 10.5 dB, return loss of < -5 dB, and maximum power supply efficiency of 39.8%

Intisari—Makalah ini menjelaskan tentang desain *Broadband RF Power Amplifier 4G LTE* yang beroperasi pada frekuensi 2,3 GHz, sesuai dengan frekuensi kerja operator selular Smartfren untuk BTS. *RF Power Amplifier* yang digunakan adalah penguat kelas A dengan transistor jenis GaN HEMT tipe CREE CGH40120F. Rancangan ini disimulasikan menggunakan program Power Advanced Design (ADS) versi 2014. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Power Amplifier dalam keadaan stabil ($K > 1$) pada frekuensi 2,3 GHz dengan S11 dan S22 match, menghasilkan *output power* 43,44 dBm 22,08 watt dengan penguatan 20,5 dB, *return of loss* < -5 dB, dan efisiensi *power supply* maksimum sebesar 39.8%.

Kata Kunci— CREE CGH40120F, RF PA Smartfren, LTE TDD 4G

I. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi nirkabel saat ini berkembang dengan pesat seiring dengan meningkatnya kebutuhan manusia dalam mengakses internet untuk mempermudah segala aktivitasnya. Kehadiran layanan untuk *data rate* yang lebih tinggi akan menjadi solusi untuk menjawab kebutuhan. Oleh karena itu, lahir teknologi 4G Long Term Evolution (4G LTE 4G). Teknologi 4G LTE dirancang untuk meningkatkan kapasitas jaringan dan kecepatan yang menyediakan kapasitas *downlink* di kurang lebih 300 Mbps dan kapasitas *uplink* minimal 75 Mbps.

Di Indonesia, teknologi LTE memiliki daya tarik bagi operator-operator ternama karena dapat diimplementasikan pada jaringan GSM maupun CDMA. Alasan lain yang menjadi daya tarik LTE adalah implementasi jaringannya yang dianggap lebih mudah dan tidak membutuhkan perubahan besar pada infrastruktur sebuah operator. Teknologi 4G LTE memiliki dua cara pengantaran yang dikenal dengan istilah *Frequency Division Duplexing* (FDD)

dan *Time Division Duplexing* (TDD). TDD menggunakan satu frekuensi untuk *uplink* dan *downlink*, hanya dengan pemisahan jeda waktu yang singkat [1].

Keunggulannya adalah kapasitas yang tersedia bisa menjadi lebih besar dibanding FDD, sehingga pembagian arah transmisi lebih cepat, mudah, dan efisien. TDD sangat cocok untuk data yang dikirimkan secara asimetris, misalnya untuk browsing internet, *video surveillance* atau *broadcast* [13]. Operator selular yang menerapkan teknologi ini salah satunya adalah Smartfren.

PT Smartfren Telecom, Tbk. adalah operator penyedia jasa telekomunikasi berbasis teknologi CDMA yang memiliki lisensi selular dan mobilitas terbatas (*fixed wireless access*), serta memiliki cakupan jaringan CDMA EV-DO yang terluas di Indonesia [2]. Smartfren pada tahun 2015 diberitakan akan meluncurkan segera layanan 4G Long Term Evolution (LTE) setelah mendapatkan lokasi frekuensi baru, dari 1,9 GHz (yang digunakan sebelumnya) ke 2,3 GHz [3].

Peranan *power amplifier* dalam BTS untuk operator berbasis 4G LTE sangat penting. Oleh karena itu, dilakukan perancangan *power amplifier Radio Frequency 4G TDD* untuk Smartfren yang bekerja pada frekuensi 2,3 GHz. Berdasarkan data yang didapatkan dari berbagai sumber terkait Smartfren, maka dapat ditarik informasi tentang *bandwidth* dan *available power* (dalam dBm). Dengan demikian dipilihlah transistor yang sesuai spesifikasi, yakni CGH40120F produksi CREE jenis GaN HEMT dengan $V_{ds} = 28$ V dan $I_{ds} = 1$ A [4]. Selanjutnya hasil perancangan tersebut akan disimulasikan menggunakan *software CAD Advance Design System* (ADS) 2014 dari Agilent.

II. RF POWER AMPLIFIER

Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Johannson [5] berupa *RF Power Amplifier* kelas A untuk *mini-BTS* yang bekerja pada frekuensi *downlink band* 2,11 GHz -2,17 GHz, 18 dBm dan menggunakan transistor jenis SiGe. Tegangan *bias* yang digunakan rendah yakni 3,3 V dengan *mirror bias technique* (4 Transistor). Perbedaan penelitian ini terletak pada frekuensi *downlink band*, *power output*, serta teknik *bias*. Peneliti menggunakan *self-bias* untuk penghematan konsumsi daya transistor [6].

Ridho [7] melakukan penelitian RF PA kelas B dengan frekuensi 2,3 GHz yang diaplikasikan pada *mobile WIMAX*. Transistor yang digunakan adalah tipe FLL351ME jenis MESFET. Penelitian serupa dilakukan oleh Julianto [8] yang merancang RF PA kelas E yang bekerja pada multi-frekuensi (0,9 GHz, 1,8 GHz, 2,3 GHz dan 2,6 GHz) dengan efisiensi 52,98% dengan CMOS 0,18Um Tipe-N. Tahap kedua penelitian ini sampai pada simulasi ADS. Perbedaan penelitian ini dengan makalah yg ditulis terletak pada teknik

¹Mahasiswa Pascasarjana S2, Teknik Mikroelektronika, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung (ITB), RT/RW 001/003, Dsn. Gedangan, Ds. Belor, Kec. Purwoasri, Kab. Kediri (64154) Jawa Timur; No. Telp: +62 857-551-361-00; e-mail: syifaalfuada@students.itb.ac.id

matching, yakni memperhatikan *bandwidth* untuk *downlink* operator selular (Smartfren) serta transistor yang digunakan.

Pada makalah ini digunakan transistor jenis GaN HEMT CGH40120F yang didesain khusus untuk penguatan RF PA dengan *high linearity*, *high frequency*, *high stability* dan *high power output*. Aplikasinya telah banyak digunakan dalam rancang bangun RF PA pada menara BTS luar negeri seperti yang dilakukan oleh Saad [9]. Perbedaannya terletak pada frekuensi kerja dan kelas RF PA yang digunakan.

III. METODE

Hasil pada makalah ini adalah berupa RF *Power Amplifier* untuk *downlink* yang diaplikasikan di BTS operator selular Smartfren yang bekerja pada frekuensi 2,3 GHz, *output power* minimal 35 dBm dan linieritas yang baik.

Proses desain RF *Power Amplifier* ini sepenuhnya menggunakan perangkat lunak ADS yang merupakan program profesional khusus untuk merancang rangkaian *microwave*. ADS yang digunakan adalah versi 2014 *licensed for students*. Komputer yang *available* untuk ADS versi ini adalah Windows 7 resolusi 64 bit.

Penentuan transistor merupakan parameter utama agar *power amplifier* yang dirancang mampu bekerja sesuai spesifikasi frekuensi kerja operator Smartfren, dimulai dari uji faktor-K, kemampuan penguatan transistor dan kesesuaian frekuensi kerja transistor. Transistor yang digunakan tidak tersedia di ADS, maka dari itu peneliti melakukan transaksi negosiasi dengan pihak *vendor CREE* untuk mendapatkan transistor CGH GaN HEMT sehingga transistor dapat disimulasikan di ADS. Transistor tipe CGH ini sangat jarang dipakai pada BTS dalam negeri. Optimasi dilakukan menggunakan simulasi *load pull* dan *matching impedance* yang telah tersedia di ADS.

A. Penentuan Spesifikasi Power Amplifier

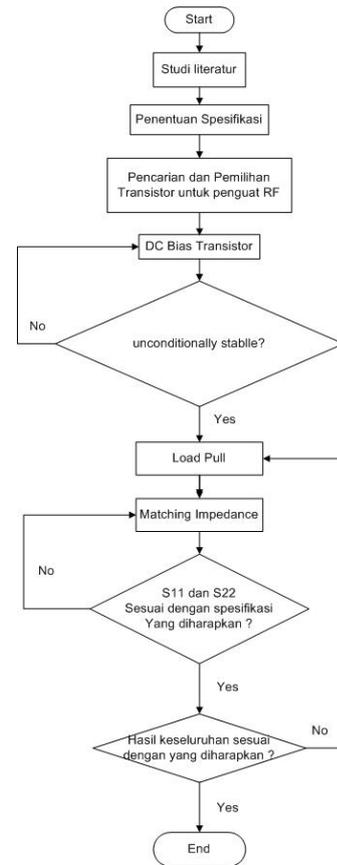
Penentuan spesifikasi *power amplifier* yang digunakan berdasar pada informasi-informasi dari berbagai literatur terkait operator yang bersangkutan, yakni Smartfren. *Bandwidth* = 2330 MHz sampai 2360 MHz dan *power gain* >35 dBm. Dari pertimbangan data *provider* tersebut maka hal yang selanjutnya dilakukan adalah pemilihan transistor.

B. Pemilihan Transistor dan Faktor K, Maximum Available Gain, Power Gain

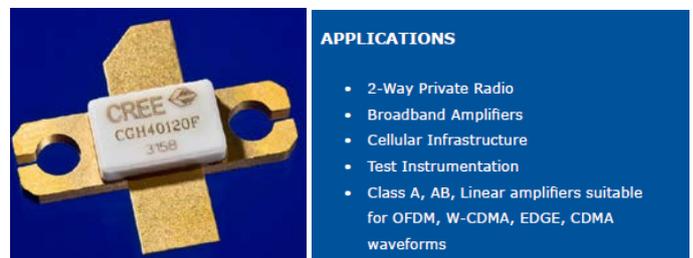
Pada pemilihan transistor, yang harus diperhatikan adalah *rating* arus yang memadai dengan kemampuan menghasilkan *gain*, *output power* dan efisiensi daya yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Dari *datasheet*, CREE CGH40120F [4] cukup baik digunakan dalam perancangan *high power amplifier* ini karena $|S_{11}| < 1$ saat bekerja pada 2,3 GHz, memiliki kekuatan power yang besar dan efisiensi power output yang besar pula. Daerah kerja yang optimal untuk transistor tipe CGH40120F adalah $V_{ds} = 28\text{ V}$ dan $I_{ds} = 1\text{ A}$.

Langkah selanjutnya adalah uji stabilitas transistor yang telah di-bias melalui *S-Parameter*, untuk menentukan

unconditional stability, yaitu harus memenuhi kondisi $K > 1$ dan $|\Delta| < 1$; $|\Delta|$ dinyatakan dengan $S_{11} * S_{22} - S_{12} * S_{21}$ [10].



Gbr. 1 Flowchart kerja.



Gbr. 2 Bentuk fisik transistor CGH40120F dan aplikasinya [4].

Maximum Available Gain (MAG) merupakan indikator besar penguatan yang bisa didapatkan. Menentukan MAG sangat penting di tahap awal karena peneliti bisa menentukan di awal apakah suatu transistor sanggup untuk memberikan penguatan tertentu.

$$MAG = 20 \text{ LOG } \frac{|S_{21}|}{|S_{12}|} + 20 \text{ LOG } (K \pm \sqrt{K^2 - 1}) \quad (1)$$

Langkah selanjutnya adalah uji *power gain* yang merupakan perbandingan antara daya yang hilang pada beban ZL (PL) dengan daya yang diberikan ke bagian *input* pada *two-port network* (Pin). Tipe *gain* ini tidak tergantung

pada ZS sekalipun beberapa komponen aktif tergantung pada ZS, dinyatakan dengan persamaan.

$$Power\ Output = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

C. Load Pull

Simulasi *load-pull* ini dilakukan untuk menentukan nilai impedans beban yang paling sesuai untuk transistor agar mencapai nilai efisiensi maksimum (beban optimal) [11]. Sesudah dimasukkan spesifikasi dan frekuensi operasi amplifier, ADS akan mencari tahu besarnya nilai daya output, *maximum available gain* dan efisiensi daya ketika transistor bekerja dengan impedans beban yang yang paling optimal.

Untuk melakukan simulasi *load-pull*, yang perlu dilakukan adalah mengganti rangkaian *amplifier* yang sudah ada dengan rangkaian *bias* yang telah dirancang [12], kemudian menentukan variabel-variabel yang akan dijadikan acuan pada simulasi rangkaian, yakni: V_{ds} , V_{gs} , frekuensi kerja yang disimulasikan, serta daya penguatan.

D. Matching Impedance

Setelah mengetahui koefisien refleksi beban (r_L), nilai koefisien refleksi sumber bisa dicari supaya input (r_S) transistor diterminasi dengan benar, dilakukan dengan *conjugate matching* dengan persamaan,

$$r_S = \left[S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} r_L}{1 - S_{22} r_L} \right]^* \quad (3)$$

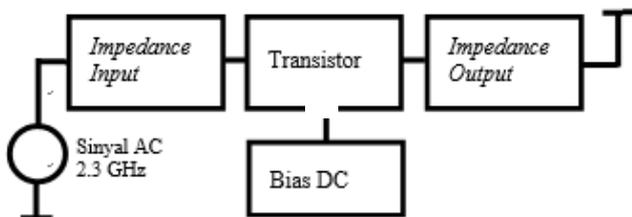
Setelah nilai koefisien refleksi input dan output didapatkan, selanjutnya faktor Q yang merupakan *frequency band* dihitung. Proses *matching* harus menyentuh nilai Q dari salah satu *lumped* yang digunakan pada proses penyesuaian impedans. Persamaannya adalah:

$$Q = \frac{\sqrt{f_1 \times f_2}}{f_1 - f_2} \quad (4)$$

Selanjutnya dilakukan *match* antara input dan output. Parameter S11 dan S22 atau disebut juga *Input Return Loss* (IRL) dan *Output Return Loss* (ORL) berpengaruh pada hasil *gain* serta memberikan gambaran kondisi *match* antara input dan output. Semakin rendah nilai S11 dan S22 maka kondisi *match* semakin baik. Dan perbaikan dalam peningkatan *gain* dapat selalu tercapai melalui proses *match*.

E. Pengujian Daya

Pengujian daya *power amplifier* yang telah dirancang ini dilakukan dengan cara memberikan input AC sesuai dengan frekuensi kerja, yakni 2.3 GHz.



Gbr. 3 Diagram blok pengujian daya *power amplifier*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pembiasan Transistor

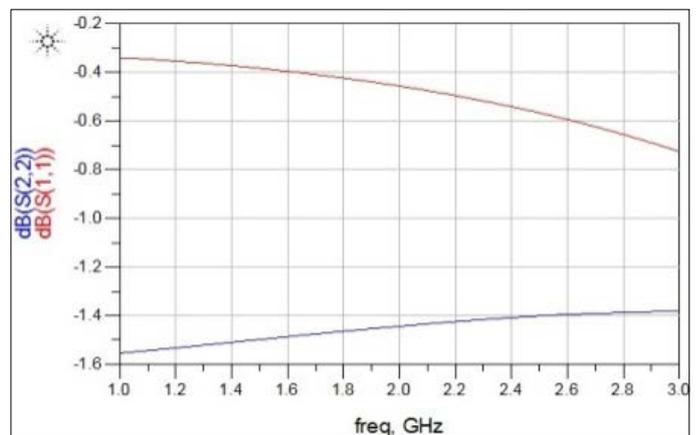
Hal yang pertama kali dilakukan yaitu mencari titik kerja optimal transistor. Didapatkan $V_{gs} = -2,858$ V dengan $V_{ds} = 28$ V dan $I_{ds} = 1$ A (sesuai *datasheet*). Setelah didapat daerah kerja optimal transistor, selanjutnya dilakukan *bias* transistor untuk mendapatkan VDD, R_d & R_g . Didapatkan nilai VDD = 78 V dengan R_d dan $R_g = 50\Omega$.

Setelah didapatkan rangkaian dan nilai Vdd yang sesuai, selanjutnya dilakukan simulasi untuk mencari plot *S-Parameter* dan *K-factor*. Kemudian dibandingkan nilai yang didapat dari simulasi dengan *datasheet* untuk nilai *S-Parameter*.

TABEL I
DATA-DATA TRANSISTOR SETELAH DILAKUKAN BIAS

Parameter	Nilai
S11	$0.943 < 169.827^\circ$
S21	$0.887 < 34.326^\circ$
S12	$0.011 < 40.583^\circ$
S22	$0.843 < 175.122^\circ$
$V_{ds} / I_{ds} / \text{Faktor K}$	27,94 V / 1,001 A / 1,696

Data-data transistor setelah di-*bias* pada simulasi ini telah sama dengan data transistor pada *datasheet*. Dengan demikian transistor siap dipergunakan sesuai frekuensi kerja yakni 2,3 GHz. Gbr. 4 merupakan grafik S11 dan S22 transistor yang telah di-*bias* yang di-*plot* dari frekuensi 1 sampai 3 GHz.



Gbr. 4 Grafik S11 dan S22 transistor sebelum di-*matching*.

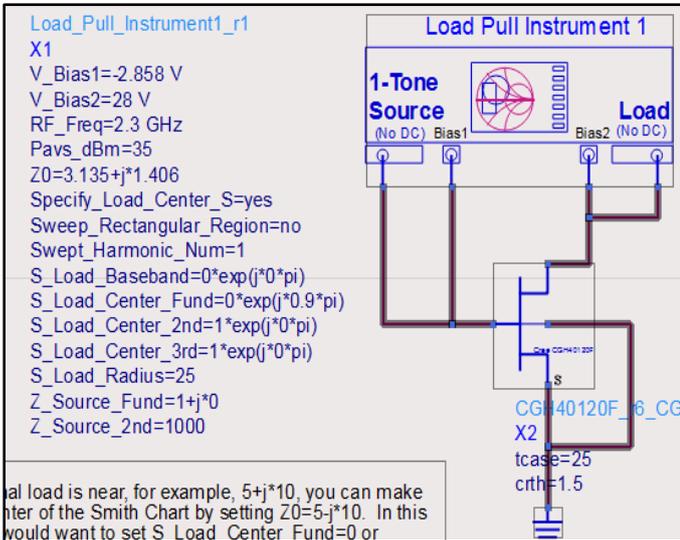
B. Simulasi Load Pull

Simulasi dilakukan menggunakan *HBI Tone Load pull* yang tersedia di *preliminary load pull* pada ADS 2014. Parameter yang digunakan untuk menghasilkan beban optimal adalah tegangan *bias* transistor ($V_{gs} = -2.858$ V; $V_{ds} = 28$ V), frekuensi 2.3 GHz, $Z_o = 50 \Omega$, $S_{Load\ center_Fund} = 0.6 \cdot \exp(j \cdot 0 \cdot \pi)$, dan $S_{Load_Radius} = 25$, seperti ditunjukkan pada Gbr. 5. Data tersebut diisi untuk mendapatkan *output power* dan efisiensi *power output* yang optimal dari penguatan yang dipilih yaitu penguatan tipe penguat kelas A.

Dari hasil mencari nilai efisiensi dan *power output* yang maksimum maka didapatkan efisiensi terbaik yakni 39,511%,

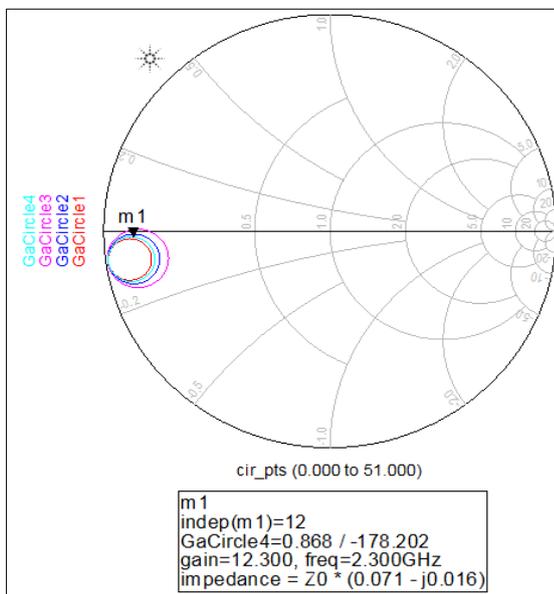
output power sebesar 43,41 dBm dan beban maksimum terbaik yakni $3,135 - j1,406 \Omega$.

Langkah selanjutnya adalah mengulang langkah pada Gbr. 5, dengan memasukkan Z_0 dengan beban yang telah didapat dari *load pull* yakni $3,135 - j1,406 \Omega$ dan S_Load center_Fund = $0 * \exp(j * 0 * \pi)$. Didapatkan data akhir *power amplifier* yang bekerja pada 2.3 GHz dengan efisiensi 39.868% dan *outout power* 43,44dBm.



Gbr. 5. Parameter *Load Pull* di ADS 2014.

Dari hasil *load pull* tersebut didapat titik beban (Γ_L) pada lingkaran *gain circle* yang berada di luar lingkaran kestabilan. Z_0 dinormalisasi 50Ω sehingga bernilai $0,067 - j0,02812 \Omega$. Peneliti memilih titik $m1$ yang maksimum, yakni mendekati nilai 0. Didapatkan nilai $Z_L = 0,071 - j0,016 \Omega$ dan koefisien refleksi $\Gamma_L = 0,868 < -178,202^\circ$.



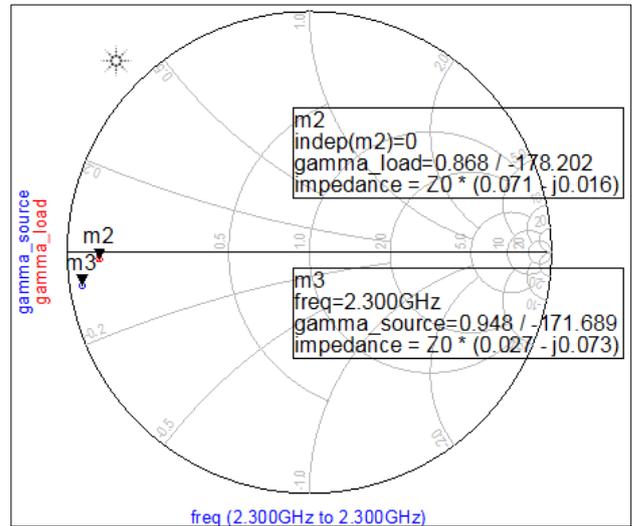
Gbr. 6. Koefisien refleksi pada *load*.

Setelah γ load didapatkan, maka hal yang selanjutnya dilakukan adalah mencari nilai koefisien refleksi *source*

dengan memasukkan rumus. Maka didapatkan nilai koefisien refleksi *source* $\Gamma_S = 0,948 < -171,698^\circ$ dengan memasukkan (3) pada ADS. *Source code* ditunjukkan pada Gbr. 7 dan hasil simulasi ditunjukkan pada Gbr. 8.

```
Eqn gamma_source = conj(S11+(S12*S21*gamma_load)/(1-S22*gamma_load))
Eqn gamma_load = m1[0]
```

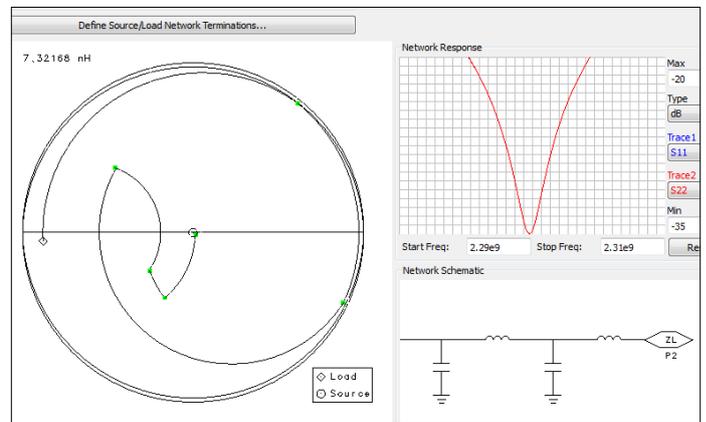
Gbr. 7. *Source code* untuk menentukan *source*.



Gbr. 8. Koefisien refleksi pada *source*.

C. Impedance Matching

Tahap pertama dalam *impedance matching* adalah menentukan faktor Q yang merupakan *frequency band* dengan memasukkan $f_1 = 2300$ MHz dan $f_2 = 2360$ MHz ke dalam (4). Proses *matching* harus menyentuh nilai Q dan ditarik menuju nilai 1 pada *smith chart*. Didapatkan nilai $Q = 38$.

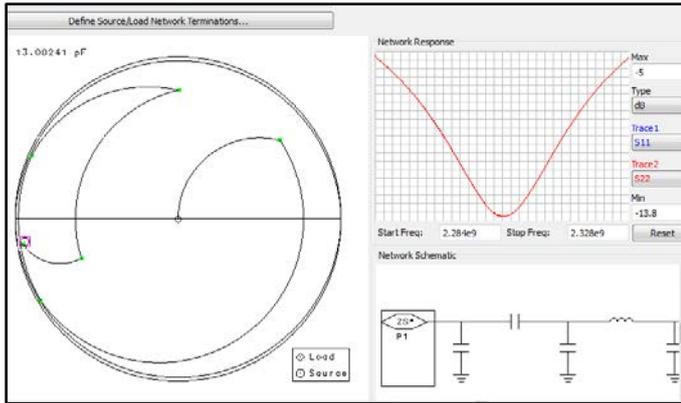


Gbr. 9 *Matching input*.

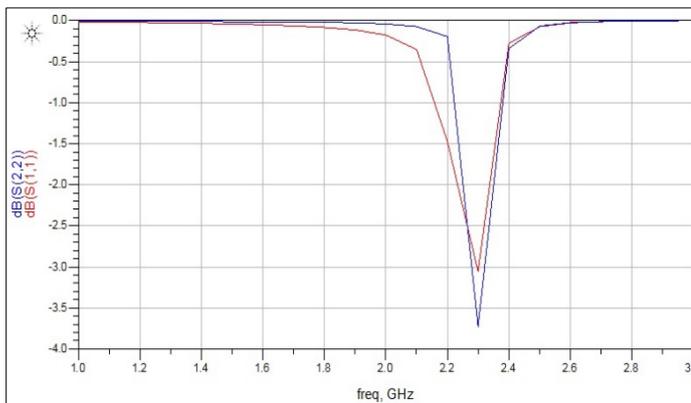
Tahap *impedance matching* ini dilakukan pada *source impedance matching* dan *load impedance matching* dengan memasukkan Γ_L pada *load* dan Γ_S pada *source* dengan memperhatikan kurva yang merupakan ilustrasi *bandwidth* operator Smartfren.

Hasil *matching input* adalah enam siklus dan *matching output* enam siklus. Rangkaian lengkap rancangan *power*

amplifier ini ditunjukkan pada Gbr. 13. Tabel II dan Tabel III merupakan nilai-nilai kapasitor dan induktor dalam rangkaian *matching*.



Gbr. 10. *Matching output*.



Gbr. 11 Plot S11 dan S22 setelah *matching input* dan *output*.

TABEL II

NILAI KOMPONEN INDUKTOR DAN KAPASITOR PADA *IMPEDANCE INPUT*

Komponen	Nilai
L1	3,89517 nH
L2	16, 60739 nH
L3	7,32168 nH
C1	5,8969 pF
C2	3,40178 pF
C3	971,13114 fF

TABEL III

NILAI KOMPONEN INDUKTOR DAN KAPASITOR PADA *IMPEDANCE OUTPUT*

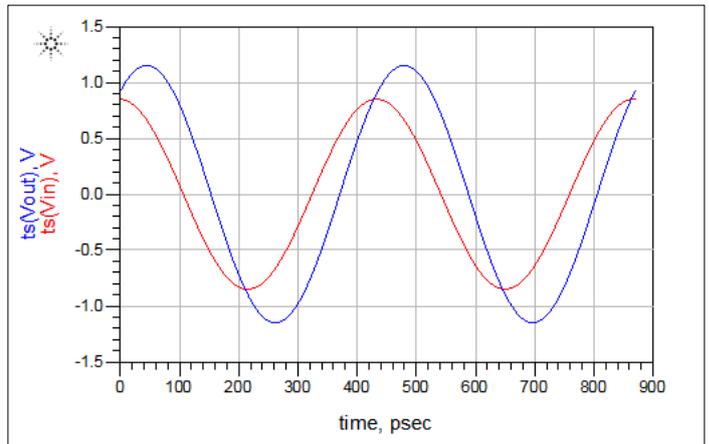
Komponen	Nilai
L4	1,65729 nH
L5	8,9526 nH
C4	13,00241 pF
C5	1,18748 pF
C6	5,34509 pF
C7	5,53953 pF

Gbr. 11 merupakan plot S11 dan S22 setelah dilakukan *matching*. Plot dilakukan dari frekuensi 1 GHz sampai 3 GHz. Terlihat bahwa grafik S11 maupun S22 pada *high power*

amplifier berbeda dengan Gbr 4. Grafik tampak mengerucut pada frekuensi kerja 2,3 GHz. Hal ini sesuai dengan yang diharapkan yaitu nilai *input return of loss (IRL)* dan *output return of loss (ORL)* lebih kecil dari -5dB. Dengan demikian *impedance matching* telah berhasil.

D. Pengujian Penguatan Daya

Pengujian daya *power amplifier* yang telah dirancang ini dilakukan dengan cara memberikan input AC sesuai dengan frekuensi kerja, yakni 2.3 GHz, seperti tampak pada Gbr. 3. Kemudian *Pin* dan *Pout* di-plot, Hasil pengujian ditunjukkan pada Gbr. 12. Tabel IV merupakan hasil simulasi penguatan daya yang dilakukan oleh ADS, yang menunjukkan *power amplifier* yang dirancang telah berhasil, sebelum dilakukan *matching* penguatan sebesar 7,75 dB dan setelah *matching* penguatan daya sebesar 20,5 dB. Perhitungan manual juga dapat dilakukan dengan mengacu pada (2).



Gbr. 12. Pengujian daya RF *power amplifier*.

TABEL IV
PERBANDINGAN PENGUATAN DAYA

Penguatan Daya sebelum <i>matching</i> (f=2,3 GHz)	Penguatan Daya setelah <i>matching</i> (f=2,3 GHz)
7,754	20,5

V. KESIMPULAN

Perancangan *power amplifier* kelas A dengan linieritas yang baik dapat bekerja dengan baik pada frekuensi 2.3GHz. Hal ini dikarenakan $K > 1$, IRL dan ORL < -5 dB dengan penguatan 20,5 dB. Output power 43,44 dBm 22,08Watt, *return of loss* < -5 dB, namun efisiensi *power supply* maksimum sebesar 39.8%. Efisiensi ini masih rendah namun dapat diminimalkan dengan kombinasi antar penguat, misalnya A+AB, A+E, A+F dan sebagainya. Dengan keberhasilan simulasi, maka rancangan *power amplifier* ini direkomendasikan untuk diwujudkan dalam bentuk *microstrip hardware*.

UCAPAN TERIMAKASIH

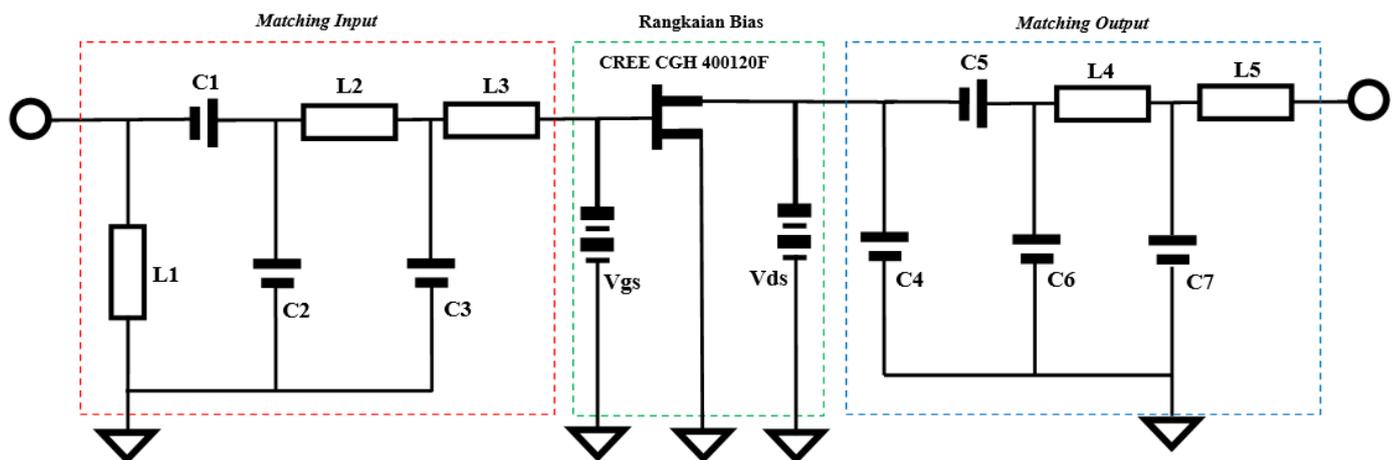
Terimakasih peneliti ucapkan kepada pengampu dosen mata kuliah *Radio Frequency Integrated Circuit (EL5209)*, yakni bapak Basuki Rachmatul Alam. Proyek ini merupakan hasil tugas akhir mata kuliah RF yang peneliti tempuh pada

semester II S2 di Institut Teknologi Bandung. Juga kepada Sdri. Hilda Afifah yang banyak membantu dalam menyelesaikan makalah ini. Kemudian terima kasih peneliti haturkan kepada Keysight Technologies Inc., Agilent Tehnologies Inc., yang telah memberikan lisensi edukasi perangkat lunak “Advanced Design System” (ADS). Terakhir kepada perusahaan CREE yang telah memberikan *Device Model Installation in ADS* yakni properti transistor CGH yang digunakan sehingga dapat disimulasikan pada ADS versi 2014 dengan baik.

REFERENSI

[1] Dalia Sadek, et al “Passive Front End for LTE TDD Transceiver”. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). Volume 116 – No. 8, April 2015. p. 6-11.
 [2] Sekilas profil perusahaan smartfren [Online]. Tersedia: <http://www.smartfren.com/ina/overview/>, diakses pada 16 Mei 2015
 [3] Kurniawan, E. “Smartfren Siap Menggelar 4G” [Online]. Tersedia: (<http://www.selular.id/insight/2014/12/smarfren-siap-menggelar-4g/>). Diakses pada 16 Mei 2015
 [4] Datasheet, “CGH40120F 120W RF Power GaN HEMT”, CREE, Inc, USA, 2014 [Online] Tersedia di www.cree.com/rf , diakses pada 28 Mei 2015.

[5] Ted Johansson, Noora Solati and Jonas Fritzin, “A high-linearity SiGe RF power amplifier for 3G and 4G small basestations”, International journal of electronics (Print), (99), 8, p. 1145-1153, 2012
 [6] Worku, F.Y. “Bias Circuit for RF Power Amplifiers”, Thesis Master of Science Thesis in Wireless and Photonics Engineering Department of Microtechnology and Nanoscience, Chalmers University Of Technology, Gothenburg, Sweden, 2011
 [7] Ridho, D. “Perancangan High Power Amplifier untuk Mobile WIMAX pada frekuensi 2,3 GHz” Skripsi S1 Fakultas Teknik Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia Jakarta, 2009
 [8] Julianto, F. “Perancangan Multi Band Power Amplifier Class-E pada Frekuensi 900MHz, 1800MHz, 2300MHz dan 2600MHz”. Skripsi S1 Fakultas Teknik Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia Jakarta. 2012
 [9] Paul saad et al, “A highly efficient 3.5 GHz inverse class-F GaN HEMT power amplifier” International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2010, 2(3-4), p. 317-324.
 [10] Vendelin, G. “Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques” (Second Edition). Canada: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005
 [11] Taş, D.G. “A GaN HEMT Class AB RF Power Amplifier” MMS 12th Mediterranean Microwave Symposium, Istanbul, September 2012
 [12] Srirattana, N. “High-Eficiency Linear RF Power Amplifiers Development”. Disertation at School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology, USA, 11 April 2005
 [13] Z. Yonis, et al. “LTE-FDD and LTE-TDD for Cellular Communications”. Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, KL, Malaysia, 27-30 p. 1467-1471 Maret, 2012.



Gbr. 13. Rangkaian RF power amplifier kelas A untuk aplikasi LTE 4G 2,3 GHz pada BTS operator Smartfren.