

## ANALISIS KINERJA RF POWER AMPLIFIER PADA FREKUENSI 3 GHz UNTUK APLIKASI RADAR CC-OFDM-MIMO

Prasetyono Hari Mukti<sup>\*1</sup>, A. Krisna Wikantyo<sup>1</sup>, Reyhan Adinathan Wibowo<sup>1</sup>,  
Devy Kuswidiastuti<sup>1</sup>, Gamantyo Hendrantoro<sup>1</sup>, Yuyu Wahyu<sup>2</sup> dan Purwoko Adhi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Kampus ITS Sukolilo, Jalan Raya ITS, Surabaya 60111, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Riset Telekomunikasi, Badan Riset dan Inovasi Nasional  
Jl. Cicitu Lama, Bandung 4013, Indonesia

<sup>\*</sup>E-mail : [prasetyono@ee.its.ac.id](mailto:prasetyono@ee.its.ac.id)

### Abstrak

Indonesia sebagai negara kepulauan yang sangat luas memerlukan sebuah teknologi pengawasan yang dapat memantau pergerakan objek di wilayah kedaulatan Indonesia, baik itu wilayah darat, laut, maupun udara. Salah satu teknologi yang digunakan adalah sistem radar. Berbagai teknologi radar telah dikembangkan, dari mulai radar konvensional hingga modern. Terkini, telah diusulkan sebuah teknologi baru yang dapat menjadi kandidat untuk meningkatkan kinerja radar AESA, yaitu Radar berbasis CC-OFDM-MIMO. Hanya saja, teknologi ini masih dalam tahap pembuktian konsep, sehingga perlu pengujian lebih lanjut dalam bentuk prototipe. Salah satu komponen yang perlu dikembangkan dalam prototipe radar CC-OFDM-MIMO ini adalah modul *Power Amplifier*. Sehingga, pada makalah ini, kami membahas pengembangan modul *Power Amplifier* yang dirancang menggunakan komponen komersial. Selain karena biaya produksi yang murah, pengembangan dari komponen komersial ini juga untuk turut meningkatkan kemampuan dalam negeri dalam merancang komponen/modul gelombang mikro. Modul *Power Amplifier* ini dilengkapi dengan *Automatic Load Switching* yang berfungsi untuk mengatur mekanisme *switching* pada *Power Amplifier* berdasarkan mode Radar yang digunakan. Karena proses fabrikasi yang masih memerlukan waktu lama, pada makalah ini modul *Power Amplifier* yang dikembangkan diverifikasi secara numerik terhadap parameter kinerja return loss, gain, titik kompresi P1dB, dan titik perkalian intermodulasi orde 3 (IP3). Dari hasil pengujian tersebut, diperoleh hasil bahwa modul *power amplifier* yang dikembangkan memiliki *gain* sebesar 14.5dB, OP1dB sebesar 28.5 dBm, saturasi pada daya output 30.5 dBm, dan bekerja pada frekuensi 3GHz untuk implementasi sistem penguat pada model radar CC-OFDM-MIMO.

*Kata kunci: automatic load swicthing, CC-OFDM-MIMO, power amplifier, radar*

### Abstract

Indonesia, as a very large archipelagic country, requires surveillance technology that can link the movement of objects in Indonesia's habitat, be it land, sea or air. One of the technologies used is a radar system. Various radar technologies have been developed, ranging from conventional to modern radar. Recently, a new technology has been proposed which could be a candidate to improve the performance of AESA radar, namely CC-OFDM-MIMO based radar. However, this technology is still in the proof of concept stage, so it needs further testing in prototype form. One of the components that needs to be developed in the CC-OFDM-MIMO radar prototype is the Power Amplifier module. So, in this paper, we discuss the development of a Power Amplifier module designed using commercial components. Apart from cheap production costs, the development of commercial components is also to help increase domestic capabilities in designing microwave components/modules. This Power Amplifier module is equipped with Automatic Load Switching which functions to regulate the switching mechanism on the Power Amplifier based on the Radar mode used. Because the fabrication process still requires a long time, in this paper the Power Amplifier module is developed numerically for the performance parameters of return loss, gain, P1dB compression point, and order 3 intermodulation point (IP3). From the test results, it was obtained that the power amplifier module developed had a gain of 14.5dB, OP1dB of 28.5 dBm, saturation at an output power of 30.5 dBm, and worked at a frequency of 3GHz for implementing an amplifier system in the CC-OFDM-MIMO radar model.

*Keywords: automatic load swicthing, CC-OFDM-MIMO, power amplifier, radar*

### 1. Pendahuluan

Sebagai negara kepulauan yang sangat luas dan posisinya yang sangat strategis di kawasan Pasifik, Indonesia

memerlukan sebuah teknologi handal yang dapat mendukung berbagai upaya pengawasan terhadap wilayah kedaulatan negara, baik itu pengawasan militer maupun sipil. Berbagai teknologi pengawasan terus dikembangkan,

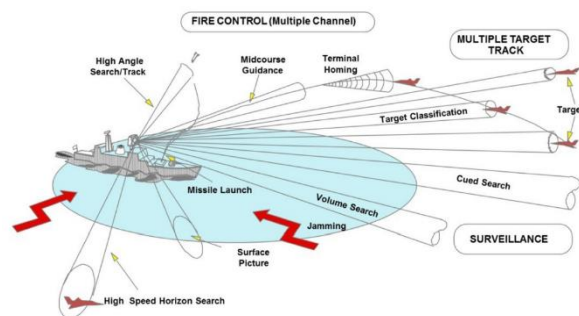
salah satunya adalah teknologi Radar. Dalam aplikasinya, teknologi Radar ini banyak dikembangkan untuk berbagai keperluan, seperti deteksi target, pengawasan, meteorology, otomotif dan diagnostic medis [1], [2].

Untuk memenuhi berbagai kebutuhan aplikasi, Teknologi Radar terus berevolusi dari Radar konvensional menuju Radar modern. Radar modern yang berkembang saat ini memerlukan kemampuan *scanning*. Kemampuan *scanning* tersebut dapat diimplementasikan dengan 2 (dua) metode, yaitu *Mechanical Scanning* dan *Electronic Beam Scanning*.

Pada *mechanical scanning*, hal ini dapat diperoleh dengan menggunakan *rotator* mekanik. Akan tetapi, teknik ini memiliki kelemahan yaitu periode *scanning* yang lambat dan potensi rendahnya tingkat akurasi sudut karena kesalahan mekanik [3]. Metode kedua yang dapat dikembangkan untuk mengatasi kelemahan metode pertama adalah *Electronic Beam Scanning*. Metode ini dapat diterapkan dengan menggunakan teknik *Phased-Array*, di mana antena disusun secara array dengan pengaturan fasa menggunakan phase shifter [4]. Selain mengurangi kesalahan sudut dan biaya produksi, teknik ini dapat memberikan gain antena yang tinggi dengan *beamwidth* yang sempit sehingga dapat memberikan jangkauan yang lebih jauh dan akurasi deteksi yang lebih baik. Akan tetapi, metode *electronic beam scanning* ini masih memiliki kelemahan yaitu kebutuhan komponen pengatur fasa yang sangat banyak sehingga menjadikan biaya produksi tinggi kembali dan terbatasnya periode *time-on-target*.

Metode lain yang dapat dikembangkan yaitu dengan menerapkan Radar *Multi-beam*. Pada metode ini, sejumlah *beam* dibentuk secara bersamaan dan terus-menerus pada kedua sisi, baik pemancar maupun penerima dengan sudut angular yang berbeda. Dengan menggunakan metode ini, kelemahan periode *time-on-target* yang terbatas dapat diatasi. Berbagai aplikasi telah dikembangkan menggunakan aplikasi ini, di antaranya Radar *surveillance* [5], [6], *automotive radar* [7], [8], *radar imaging* [9], [10], dan radar dan komunikasi terintegrasi [11], [12], etc. Aplikasi lain dari radar *multi-beam* ini adalah Radar *Active electronically scanned array* (AESA). Keunggulan AESA sebagai radar *multi-beam* ini diilustrasikan pada gambar 1. Salah satu bentuk pengembangan terbaru yang berpotensi dapat meningkatkan kinerja Radar *Multi-beam* tersebut adalah Radar berbasis *Circulating Code* (CC) yang diterapkan pada sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) *Multiple-input-multiple-output* (MIMO) atau disingkat menjadi CC-OFDM-MIMO [14]. Akan tetapi, pengembangan Radar-CC-OFDM-MIMO tersebut masih dalam tahap pembuktian konsep yang memerlukan pengujian lebih lanjut dalam bentuk prototipe. Untuk melakukan pengujian prototipe tersebut, berbagai modul perangkat keras perlu dirancang, salah satunya adalah *Power Amplifier* di sisi pemancar. *Power Amplifier*

merupakan salah satu komponen yang sangat penting karena memiliki fungsi menguatkan sinyal yang dipancarkan oleh pemancar. Penguatan ini diperlukan agar sinyal yang dipancarkan dapat mencapai jarak target maksimum yang diharapkan karena faktor redaman propagasi.



Gambar 1 Ilustrasi teknologi Radar AESA [13]

Salah satu bentuk pengembangan terbaru yang berpotensi dapat meningkatkan kinerja Radar *Multi-beam* tersebut adalah Radar berbasis CC-OFDM-MIMO [14]. Akan tetapi, pengembangan Radar CC-OFDM-MIMO tersebut masih dalam tahap pembuktian konsep yang memerlukan pengujian lebih lanjut dalam bentuk prototipe. Untuk melakukan pengujian prototipe tersebut, berbagai modul perangkat keras perlu dirancang, salah satunya adalah *Power Amplifier* di sisi pemancar. *Power Amplifier* merupakan salah satu komponen yang sangat penting karena memiliki fungsi menguatkan sinyal yang dipancarkan oleh pemancar. Penguatan ini diperlukan agar sinyal yang dipancarkan dapat mencapai jarak target maksimum yang diharapkan karena faktor redaman propagasi.

Berbagai jenis *Power Amplifier* telah banyak dikembangkan dalam literature, baik yang berbasis tabung maupun berbasis *solid-state*. Karena sistem Radar-CC-OFDM-MIMO yang sedang dikembangkan ini memiliki karakteristik yang ringkas, maka *Power Amplifier* yang digunakan adalah *Power Amplifier* berbasis *solid-state*.

Berbagai jenis *Power Amplifier* berbasis *solid-state* (SSPA) telah banyak dikembangkan pada banyak literatur. [15][16][17]. Pada [16], Formicone mengembangkan SSPA berbasis GaN yang bekerja pada rentang frekuensi 432-438 MHz dengan lebar pulsa dan *duty cycle* sebesar masing-masing 88  $\mu$ s dan 6,7%.

Berbagai modul *Power Amplifier* telah banyak tersedia di pasaran. Akan tetapi karena faktor biaya yang mahal juga untuk mendukung peningkatan kemampuan dalam negeri dalam merancang modul *Power Amplifier*, maka *Power Amplifier* yang dipaparkan dalam makalah ini dirancang dari basis komponen yang kemudian menjadi sebuah modul *Power Amplifier* yang sesuai dengan kebutuhan spesifikasi yang telah ditentukan. Selain itu, modul *Power*

Amplifier ini akan menggunakan *Automatic Load Switching* yang berfungsi untuk mengatur mekanisme *switching* pada *Power Amplifier* berdasarkan mode Radar yang digunakan.

## 2. Perancangan Modul Power Amplifier

Dalam melakukan perancangan modul *Power Amplifier* ini, terdapat beberapa langkah perlu dilakukan, yaitu: (1) Penentuan spesifikasi sistem Radar-CC-OFDM yang akan dirancang, (2) Perhitungan *Link-Budget* propagasi sinyal radar, (3) Penentuan Spesifikasi Modul *Power Amplifier* yang akan dirancang, dan (4) Perancangan dan analisis kinerja modul *Power Amplifier* yang dikembangkan.

### 2.1. Spesifikasi Sistem Radar CC-OFDM-MIMO

Sebagai langkah awal dalam perancangan modul *Power Amplifier* ini, maka perlu ditentukan terlebih dahulu spesifikasi Sistem Radar yang akan dikembangkan menjadi sebuah prototype. Secara ringkas, spesifikasi Radar tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Sistem Radar-CC-OFDM

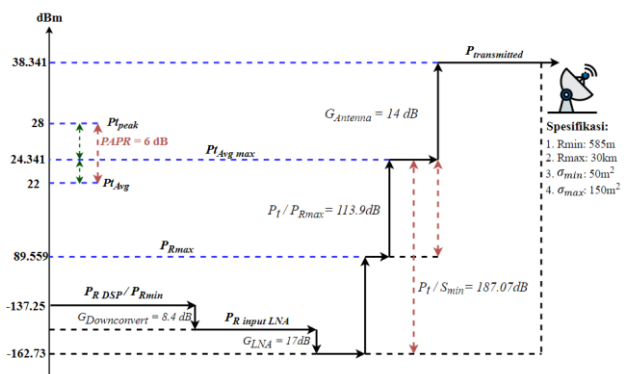
Parameter	Nilai
Frekuensi (GHz)	3
Gain Antenna Tx/ Rx (dBi)	14
RCS Maksimum (m <sup>2</sup> )	150
RCS Minimum (m <sup>2</sup> )	50
Jarak Maksimum Target (km)	30
Jarak Minimum Target (m)	585
Sensitivitas Radar Target (dBm)	-137,25
Bandwidth (MHz)	10,24
Subband	4
Bandwidth per Subband (MHz)	2,56
Jumlah Subcarrier per Sub-band	256
Subcarrier Spacing Frequency, SCS (kHz)	10
Durasi per Simbol (ms)	0.1
Jumlah Simbol per Round Trip Radar	2
Duty Cycle Transmitter	50%
Iterasi Post Doppler	32
Bandwidth Post Doppler (Hz)	156.25
SNR (dB)	12
Noise Figure (dB)	2,811

### 2.2. Perhitungan Link-Budget

Langkah selanjutnya yang perlu dilakukan dalam melakukan perancangan modul *Power Amplifier* sebagai bagian dari perancangan prototype sistem Radar ini adalah perhitungan *Link-budget*. Perhitungan *link budget* tersebut dilakukan untuk melakukan prediksi kebutuhan alokasi daya yang perlu dicapai pada sistem radar agar memenuhi target kinerja sistem radar yang telah ditentukan. Hasil dari perhitungan *link-budget* ini digunakan untuk menentukan spesifikasi komponen *Power Amplifier* yang akan digunakan untuk merancang modul *Power Amplifier*.

Berbeda dengan perhitungan *link-budget* pada sistem komunikasi pada umumnya, perhitungan *link-budget* untuk

sistem Radar memiliki tambahan parameter khusus seperti *range ambiguity* yang direpresentasikan sebagai jarak maksimum dan *radar cross section* (RCS). Dengan mengacu pada parameter kinerja sistem Radar yang ditampilkan dalam Tabel 1, maka kita akan memperoleh rincian kebutuhan alokasi daya dalam bentuk grafik tangga seperti yang ditampilkan pada gambar 2.



Gambar 2 Visualisasi *Link Budget* pada Radar

### 2.3. Penentuan Spesifikasi Modul Power Amplifier

Setelah perhitungan *Link-budget* sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, langkah selanjutnya yang perlu dilakukan adalah penentuan spesifikasi modul *Power Amplifier*. Penentuan spesifikasi modul *Power Amplifier* ini dilakukan melalui beberapa tahap, meliputi (1) Pemilihan komponen *Power Amplifier* dan (2) Analisis kinerja dari alternatif komponen yang telah dipilih.

Langkah pertama dilakukan dengan tujuan untuk mendapat beberapa alternatif komponen yang dapat digunakan dalam merancang modul *Power Amplifier*. Pemilihan komponen tersebut didasarkan pada beberapa parameter utama kinerja *Power Amplifier*, meliputi suplai daya, gain, titik kompresi 1 dB (P1dB) dan titik perkalian intermodulasi orde 3 (IP3). Berdasarkan hasil perhitungan *link-budget* yang telah dilakukan pada bagian sebelumnya, kita dapat memperoleh informasi bahwa untuk mencapai kebutuhan jarak jangkauan target yang diharapkan kita perlu menggunakan *Power Amplifier* dengan nilai P1dB sebesar 24,34 dB.

Tabel 2. Spesifikasi *Power Amplifier*

Parameter	Nilai
Tipe Komponen	HMC637BPM5E
Voltage Supply ( $V_{dd}$ )	12 V
Current Supply ( $I_{dd}$ )	345 mA
Gain	15.5 dB
OP1dB	28 dBm
Saturasi	30.5 dBm

Setelah mengumpulkan berbagai informasi datasheet dan melakukan analisis parameter kinerja dari komponen *Power Amplifier* yang tersedia, *Power Amplifier* yang

dipilih dalam penelitian ini adalah tipe HMC637BPM5E yang merupakan keluaran Analog Device. Spesifikasi lengkap dari komponen *Power Amplifier* yang dipilih ditunjukkan pada Tabel 2.

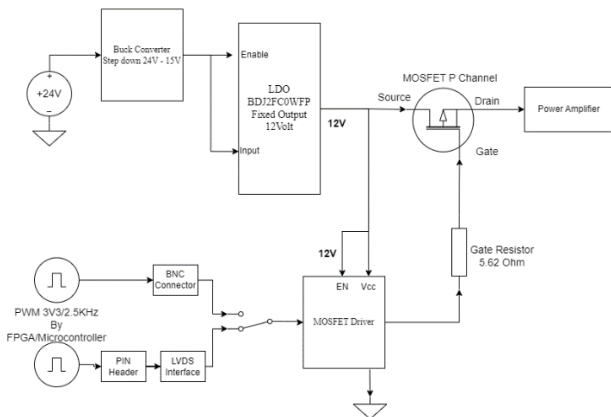
### 2.4. Perancangan Modul *Power Amplifier*

Langkah selanjutnya setelah pendefinisian parameter spesifikasi modul dan pemilihan komponen utama *Power Amplifier* adalah perancangan modul *Power Amplifier* yang dilengkapi fitur *Automatic Load Switching* yang berfungsi untuk mengatur mekanisme *switching* pada *Power Amplifier* berdasarkan mode Radar yang digunakan. Blok diagram penyusun modul *Power Amplifier* tersebut ditunjukkan pada

Gambar 3. Dengan rincian komponen utama seperti yang ditampilkan pada

Tabel 3.

Secara khusus, fitur *Automatic Load Switching* akan bekerja berdasarkan jenis mode Radar yang digunakan, apakah radar bekerja dalam mode *transmit* atau *receive*. Hal ini direpresentasikan melalui sinyal pulsa yang dikirimkan, apakah pada kondisi HIGH atau kondisi LOW. Kondisi sinyal pulsa ini menjadi input bagi MOSFET *Driver*. Jika sinyal pada kondisi HIGH, maka MOSFET *Driver* akan memberikan sinyal ON untuk menjadikan MOSFET P-channel ON, begitupun sebaliknya.



Gambar 3. Blok Diagram Modul *Power Amplifier*

Input terhadap MOSFET *Driver* ini dapat dipilih secara manual menggunakan DIP *Switch* yang tersedia pada modul. Jika modul *Power Amplifier* akan dioperasikan menggunakan menggunakan emulator sinyal TTL secara langsung, maka DIP *Switch* dapat digeser untuk mengarah pada konektor BNC. Akan tetapi, jika modul *Power Amplifier* akan dioperasikan secara terintegrasi dengan modul pembangkitan sinyal yang menggunakan sinyal LVDS, maka DIP *Switch* dapat digeser untuk mengarah pada input LVDS yang menerima sinyal LVDS dari modul

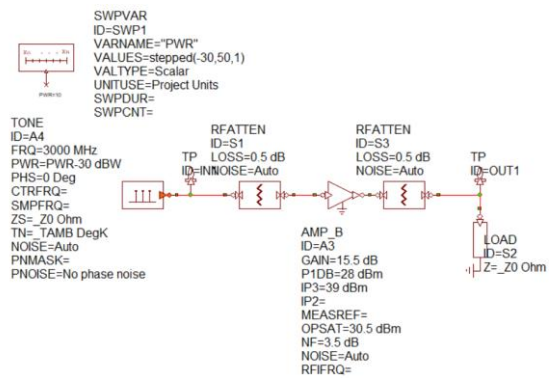
pembangkit sinyal. Keuntungan lain dari penerapan modul fitur ini adalah fleksibilitas terhadap *duty cycle* yang digunakan.

Tabel 3 Komponen utama modul *Power Amplifier*

Komponen	Seri
<i>Power Amplifier</i>	HMC637BPM5E
Buck Converter	LMR51450SDRRR
LDO	BDJ2FC0WFP-E2
MOSFET <i>Driver</i>	MIC44F19YMME-TR
P-channel MOSFET	ISP26DP06NMSATMA1

### 3. Analisis kinerja modul *Power Amplifier*

Tahap terakhir yang perlu dilakukan dalam proses perancangan modul *Power Amplifier* ini adalah verifikasi kinerja *Power Amplifier* yang telah dirancang. Verifikasi ini dilakukan secara numerik dengan menggunakan perangkat lunak AWR Microwave Office. Parameter yang diverifikasi pada tahapan ini meliputi return loss, gain, titik kompresi P1dB, dan titik perkalian intermodulasi orde 3 (IP3). Seluruh parameter tersebut diverifikasi dengan menggunakan blok diagram sistem seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram simulasi sistem *Power Amplifier*

#### • Return Loss dan Gain

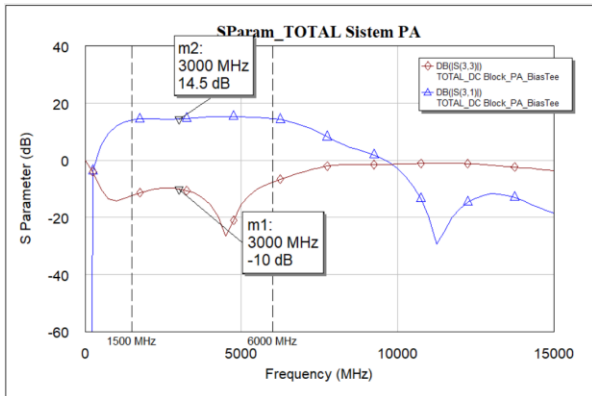
Parameter pertama yang dipertimbangkan dalam melakukan verifikasi kinerja modul *Power Amplifier* adalah return loss dan gain. Kedua parameter ini dapat dianalisis melalui grafik s-parameter seperti ditunjukkan pada

Gambar 5. Kinerja *Power Amplifier* terhadap parameter return loss dapat diamati melalui kurva S33 yang diindikasikan oleh warna merah sedangkan kinerja terhadap parameter gain dapat diamati melalui kurva S31 yang ditunjukkan oleh warna biru.

Melalui kurva S33, kita dapat mengamati bahwa nilai return loss sistem pada saat bekerja pada frekuensi 3 GHz adalah sekitar 10dB. Hal ini masih dapat ditoleransi karena



nilai minimum return loss yang diizinkan utk memiliki redaman pada saat pengiriman sinyal adalah 10dB. Sementara itu, dengan mengamati kurva S31 yang berwarna biru kita dapat mengamati bahwa amplifier memiliki gain sekitar 14,5 dBi pada saat amplifier bekerja pada frekuensi 3 GHz. Nilai gain tersebut mengalami penurunan sekitar 1 dB dari nilai spesifikasi yang berasal dari *datasheet* komponen. Hal ini disebabkan oleh adanya kondisi ketidaksesuaian impedansi dan redaman dari saluran transmisi yang digunakan.



Gambar 5. Grafik S-parameter dari Power Amplifier yang dirancang

- OP1dB dan IP3

Selain parameter *gain* dan *return loss*, parameter lain yang dipertimbangkan dalam melakukan verifikasi kinerja Power Amplifier adalah (1) nilai saturasi yang direpresentasikan dengan titik kompresi 1dB (P1dB) seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 6 dan kondisi harmonisa Power Amplifier yang direpresentasikan oleh titik perkalian intermodulasi orde 3 (IP3) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

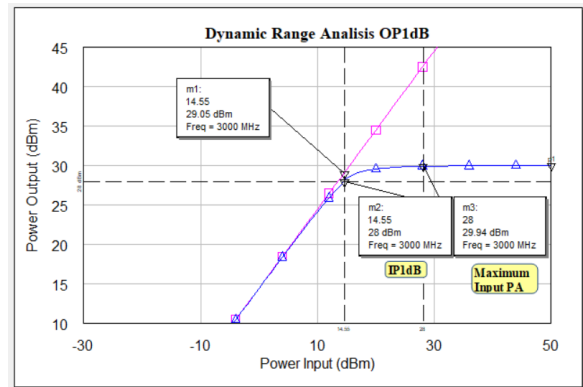
Dari

Gambar 6, kita dapat mengamati bahwa modul Power Amplifier memiliki nilai saturasi sebesar 28 dBm pada saat diberikan input sebesar 14,55 dBm. Hal ini mengindikasikan bahwa modul Power Amplifier yang dirancang akan memiliki nilai daya keluaran konstan sebesar 28 dBm pada setiap nilai daya masukan yang diberikan lebih besar dari 14,55 dBm. Kondisi ini perlu menjadi perhatian ketika melakukan perancangan sistem secara keseluruhan.

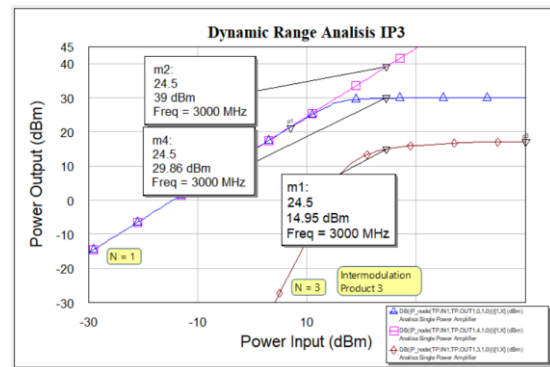
Hasil dari keseluruhan analisis dari *planning link budget* hingga evaluasi parameter, maka didapati klasifikasi range daya input pada Power Amplifier seperti pada gambar 8.

Pendekatan yang dilakukan untuk menentukan module Power Amplifier juga dilakukan dengan melakukan

analisis rangkaian *cascaded transmitter* untuk dapat menentukan perkiraan daya input yang akan diterima oleh Power Amplifier yang berasal dari subsistem sebelumnya. Pendekatan perhitungan dan analisis dilakukan dengan memanfaatkan *software* AWR yang berfungsi sebagai *tools* dalam melakukan analisis rangkaian sistem pada ranah *microwave frequency*.

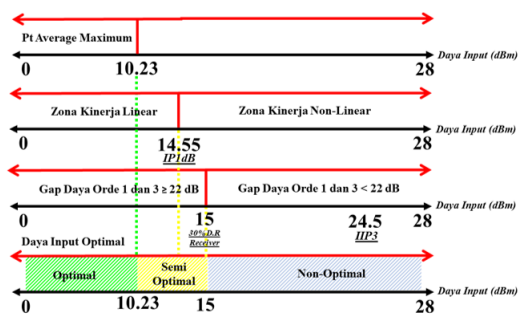


Gambar 6. Grafik relasi input-output P1dB Power Amplifier

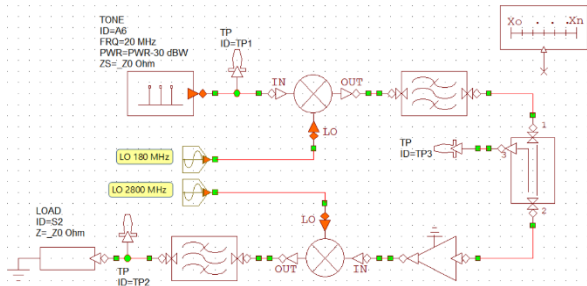


Gambar 7. Dynamic Range IP3

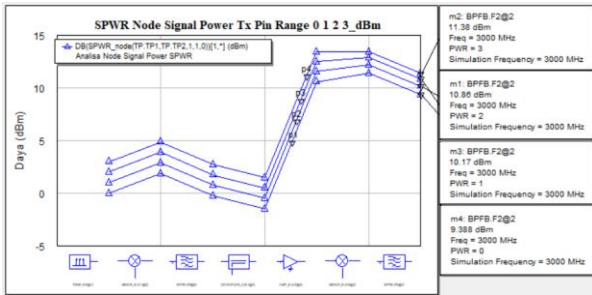
Analisis dilakukan dengan melakukan penyusunan *schematic* diagram total sistem *transmitter* untuk keseluruhan subsistem, termasuk *frequency up converter* dan Power Amplifier sebagai pembentuk sistem *transmitter*. Pembentukan *schematic* sistem *transmitter* dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 8. Visualisasi Analisis Daya Input Optimal Power Amplifier



Gambar 9. Rangkaian Analisis Schematic Sistem Power Amplifier

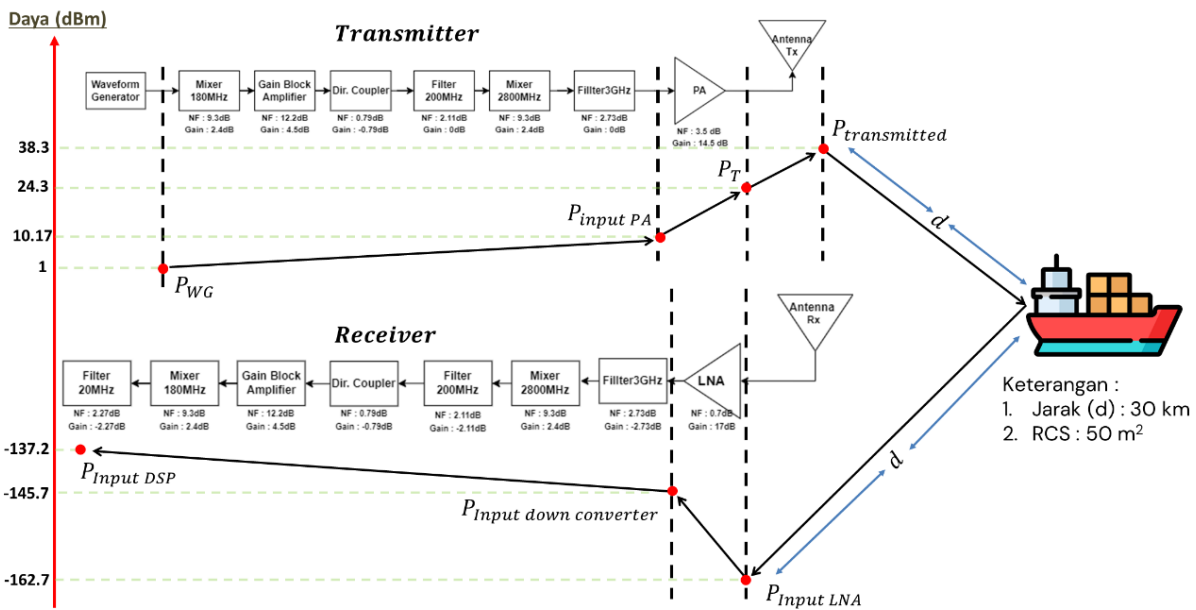


Gambar 10. Analisis Pertambahan Daya pada Sistem Transmitter

Schematic yang telah tersusun ini lantas dilakukan analisis berupa rentang alokasi daya sinyal yang dibentuk dari modul *waveform generator* hingga output dari subsistem *frequency up converter* sebagai input dari *Power Amplifier*. Analisis yang dilakukan dipengaruhi oleh parameter dasar dari setiap komponen aktif yang tersusun seperti adanya daya saturasi dan *losses* berupa *noise figure* tiap komponen, Hasil dari analisis alokasi daya sistem transmitter dapat dilihat padagambar 10.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengerjaan analisis dan evaluasi, didapati bahwa sistem *Power Amplifier* yang dibangun menggunakan HMC637BPM5E sebagai komponen inti dengan spesifikasi gain bernilai 15.5 dB, OP1dB bernilai 28.5 dBm dan saturasi bernilai 30.5 dBm dimana pada spesifikasi kinerja *Power Amplifier* yang terpilih bekerja pada rentang klasifikasi optimal. Adapun pada rancang bangun sistem *Power Amplifier* memiliki keunggulan berupa sistem tambahan *power regulator* sebagai *DC stabilizer* dan *automatic load switching* untuk memenuhi parameter *duty cycle switching Power Amplifier*.



Gambar 11 Visualisasi Kinerja Total Sistem Radar

## Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) melalui dana Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dengan skema Program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) Batch 2 Tahun 2022 dengan Kontrak Induk Nomor: 79/IV/KS/11/2022 dan Nomor 2582/PKS/ITS/2022 tanggal 30 Nopember 2022.

## Referensi

- [1]. S. Costanzo, F. Spadafora, A. Borgia, H. O. Moreno, A. Costanzo and G. DiMassa, "High Resolution Software Defined Radar System for Target Detection", *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2013.
- [2]. A. Prabaswara, A. Munir and A.B. Suksmono, "GNU Radio Based Software-Defined FMCW Radar for Weather Surveillance Application", in *the proceeding of The 6th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA 2011)*, 2011
- [3]. M. I. Skolnik, Radar Handbook, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2008.
- [4]. C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2012.
- [5]. D. Gromek, P. Samczyński, J. Misiurewicz, M. Malanowski, K. Kulpa, A. Gromek, A. Gadós, A. Jarzebska, and M. Smolarczyk, "Implementation and results of new high resolution SAR modes for an airborne maritime patrol radar," *Int. J. Electron. Telecommun.*, vol. 59, no. 3, pp. 213–218, Sep. 2013, doi: 10.2478/eletel-2013-0025.
- [6]. M. Losacco, M. Schiaffino, F. Perini, L. Lama, A. Mazro, D. Cutaiar, J. Borg, W. Villadei, M. Reali, P. Di Lizia, M. Massari, G. Bianchi, G. Pupillo, A. Mattana, G. Naldi, C. Bertolotti, and M. Roma, "The multibeam radar sensor BIRALES: Performance assessment for space surveillance and tracking," in *Proc. IEEE Aerosp. Conf.*, Mar. 2019, pp. 1–14.
- [7]. J. Moghaddasi and K. Wu, "Multifunctional transceiver for future radar sensing and radio communicating data-fusion platform," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 818–838, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2530979.
- [8]. H. Krishnaswamy and H. Hashemi, "A 4-channel 4-beam 24-to-26 GHz spatio-temporal RAKE radar transceiver in 90 nm CMOS for vehicular radar applications," in *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers*, Feb. 2010, pp. 214–215, doi: 10.1109/ISSCC.2010.5433954.
- [9]. T. X. H. Luo, W. W. L. Lai, R. K. W. Chang, and D. Goodman, "GPR imaging criteria," *J. Appl. Geophysics*, vol. 165, pp. 37–48, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jappgeo.2019.04.008.
- [10]. K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart, B. Thomas, G. Chattopadhyay, and P. H. Siegel, "THz imaging radar for standoff personnel screening," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 169–182, Sep. 2011, doi: 10.1109/TTHZ.2011.2159556.
- [11]. S. D. Liyanaarachchi, C. Baquero Barneto, T. Riihonen, M. Heino, and M. Valkama, "Joint multi-user communication and MIMO radar through full-duplex hybrid beamforming," in *Proc. 1st IEEE Int. Online Symp. Joint Commun. Sens. (JC&S)*, Feb. 2021, pp. 1–5, doi: 10.1109/JCS52304.2021.9376319.
- [12]. X. Liu, T. Huang, N. Shlezinger, Y. Liu, J. Zhou, and Y. C. Eldar, "Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, pp. 3929–3944, 2020, doi: 10.1109/TSP.2020.3004739.
- [13]. Kellett, W. Dawber, W. Wallace and J. Branson, "Multifunction Maritime Radar and RF Systems—Technology Challenges and Areas of Development," in *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 37, no. 4, pp. 6–20, 1 April 2022.
- [14]. Kuswidiastuti, L. P. Ligthart and G. Hendratoro, "A Transmitter Design for the Multi-beam CC-OFDM Azimuth Scanning MIMO Radar," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 53682–53702, 2022.
- [15]. K. H. Kim *et al.*, "2.7 - 3.1 GHz, 1.5 kW Pulsed Solid-State Power Amplifier with Automatic Gain Equalization Circuit for Radar Application," in *2007 IEEE Radar Conference*, Boston, MA: IEEE, Apr. 2007, pp. 1044–1048. doi: 10.1109/RADAR.2007.374404.
- [16]. G. Formicone, J. Burger, J. Custer, R. Keshishian, and W. Veitschegger, "A study for achieving high power and efficiency based on high bias operation in C- and X-band GaN Power Amplifiers," in *2018 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR)*, Jan. 2018, pp. 39–42. doi: 10.1109/PAWR.2018.8310062.
- [17]. Y. Yang, M. Zhang, W. Che, H. Chen, and Q. Cai, "High power S-band GaN-based Power Amplifier for radar systems," in *2015 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Suzhou, China: IEEE, Jul. 2015, pp. 1–3. doi: 10.1109/IMWS-AMP.2015.7324922.