

Pengaruh Teknik Modulasi terhadap Penerimaan Daya pada Sistem Transfer Daya Nirkabel Frekuensi Radio Berbasis *Software-Defined* Radio

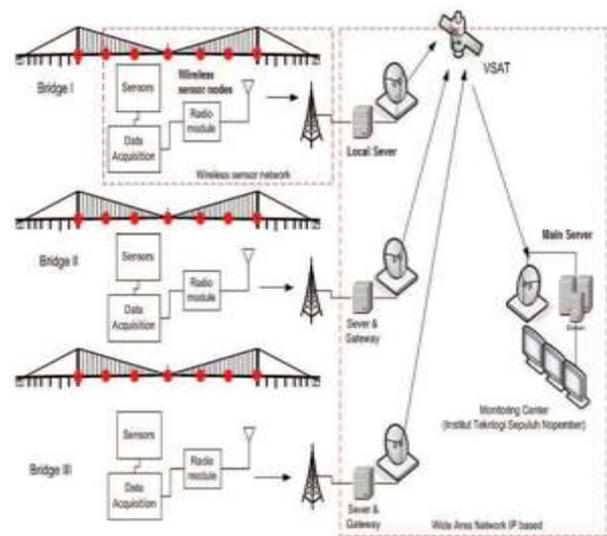
Tobi Wibialma Natha, Puji Handayani dan Eko Setijadi
Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: puji@ee.its.ac.id

Abstrak—Wireless Power Transfer (WPT) merupakan teknik pengisian daya tanpa kabel sebagai hubungan fisik. Terdapat penelitian yang sedang berlangsung pada Proyek Kolaborasi Pusat ITS berjudul “Wahana Nirawak: Aspek Keamanan Data, Pengisian Energi, dan Desain Antena 26 GHz” mengenai sistem WPT berupa pesawat nirawak (drone) yang mengisi daya node-node yang sulit dijangkau pada JSN. Gelombang RF ditransmisikan kemudian disearahkan menjadi gelombang DC pada sisi penerima, sehingga dinamakan RF WPT. Diduga PAPR sinyal memengaruhi efisiensi penerimaan daya pada sistem WPT, terutama pada transmisi sinyal multitone. Sehingga penelitian ini mengamati tentang pengaruh teknik modulasi yang digunakan terhadap kinerja penerimaan daya pada sistem WPT, dengan sinyal pemodulasi tone tunggal dan jamak. Dengan memodelkan pemancar menggunakan SDR HackRF One dan penerima menggunakan rectenna, teknik modulasi divariasikan melalui pemrograman pada software GNU Radio. Modulasi yang dikaji meliputi: AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi, dengan frekuensi pembawa 2.45 GHz. Metode penelitian adalah eksperimen, memisahkan pemancar dan penerima pada jarak tertentu dengan komunikasi line-of-sight, kemudian diambil data berupa Daya Terima RF, Output Tegangan DC, dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC. Apabila dievaluasi dari segi efisiensi konversi daya, teknik modulasi 4-tone merupakan yang paling efisien dengan $\eta_{(RF-DC)}$ mencapai 80.34% pada jarak 40 cm. Pada 60 hingga 120 cm, nilai efisiensi dari kelima teknik modulasi mengalami penurunan yang signifikan menjadi 1-10%. Semakin tinggi PAPR maka efisiensi konversi juga naik, dengan membandingkan PAPR dari modulasi AM 1-tone, 2-tone, dan 4-tone.

Kata Kunci—GNU Radio, RF Power Transfer, SDR, Teknik Modulasi, WPT.

I. PENDAHULUAN

TEKNOLOGI IoT berkembang pesat beberapa tahun ini, ditandai dengan semakin maraknya penggunaan sensor nirkabel dan peralatan yang menggunakan RFID. Walaupun terdapat perkembangan pada beberapa bidang yang dapat membantu realisasi dari sebuah perangkat otonom, ada satu masalah yang menjadi sebuah keterbatasan: yaitu lifetime yang terbatas pada perangkat tersebut, dikarenakan kebutuhan daya dan sumber daya perangkat. Teknologi utama yang digunakan untuk mencatu sensor-sensor nirkabel adalah baterai yang dapat diisi ulang. Penggunaan sensor nirkabel dalam jumlah besar menyebabkan kebutuhan daya menjadi penting dan dapat menimbulkan permasalahan lain yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Perangkat mungkin untuk diletakkan pada daerah yang sulit atau bahkan tidak dapat diakses. Solusi permasalahan ini adalah menerapkan Radio Frequency Wireless Power Transfer (RF WPT) yang mampu menambah lifetime dan performa dari sensor nirkabel

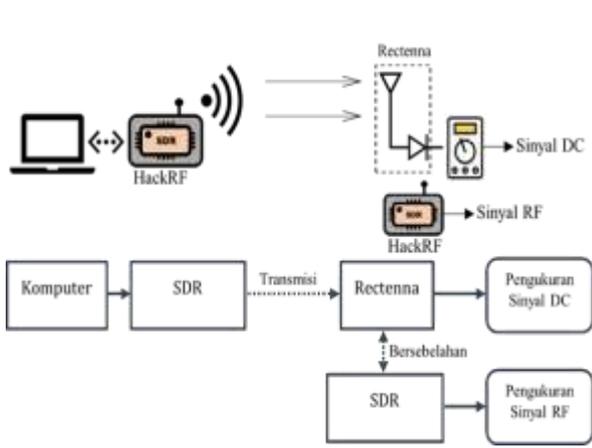


Gambar 1. Contoh aplikasi WSN untuk SHMS.

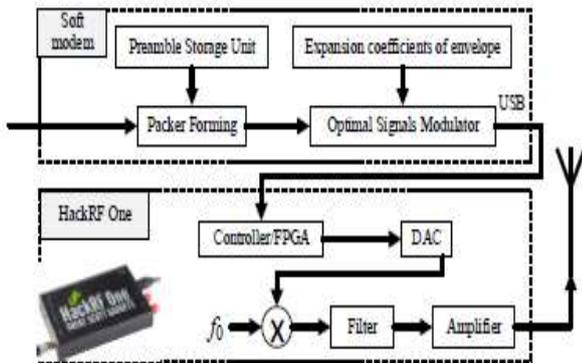
[1]. Seperti penelitian yang saat ini sedang berjalan pada Proyek Kolaborasi Pusat ITS berjudul “Wahana Nirawak: Aspek Keamanan Data, Pengisian Energi, dan Desain Antena 26 GHz”, yang salah satu proyeknya adalah pemanfaatan pesawat nirawak (drone) yang memancarkan gelombang RF untuk mengisi daya node-node yang sulit dijangkau pada jaringan sensor nirkabel. Implementasi solusi ini memungkinkan untuk mengisi daya perangkat dari jarak jauh.

Kekurangan yang ada dari transmisi daya RF jarak jauh adalah rendahnya efisiensi sistem secara keseluruhan dikarenakan pelemahan sinyal RF. Diduga PAPR (Peak to Average Power Ratio) dari sinyal memengaruhi efisiensi dari penerimaan daya pada sistem WPT, terutama pada transmisi sinyal multisine atau multitone [2-3]. Sehingga perlu diteliti dalam Tugas akhir ini mengenai teknik modulasi dengan sinyal pemodulasi tone tunggal dan tone jamak yang optimal untuk transfer energi pada sistem WPT, dengan cara mengetahui pengaruh teknik modulasi yang digunakan terhadap daya terima dan efisiensi konversi tegangan DC pada rectenna / rectifier antenna (penerima RF WPT).

Metode penelitian yang digunakan berupa eksperimen, dengan sistem WPT penelitian dimodelkan sebagai berikut: Pemancar menggunakan SDR HackRF One (tersambung dengan laptop); Penerima menggunakan rectenna (rectifier antenna) dan SDR lain yang difungsikan sebagai Spectrum Analyzer. Variasi teknik modulasi dilakukan melalui software GNU Radio untuk mengatur transmisi dari SDR. Data yang diambil meliputi: Daya Terima RF ($P_{(in\ RF)}$), Output Tegangan DC ($V_{(out\ DC)}$), dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC ($\eta_{(RF-DC)}$). Dari data tersebut dilakukan analisa perbandingan antara hasil pengukuran dari setiap



Gambar 2. Diagram blok sistem WPT penelitian.



Gambar 3. Diagram blok SDR HackRF One.

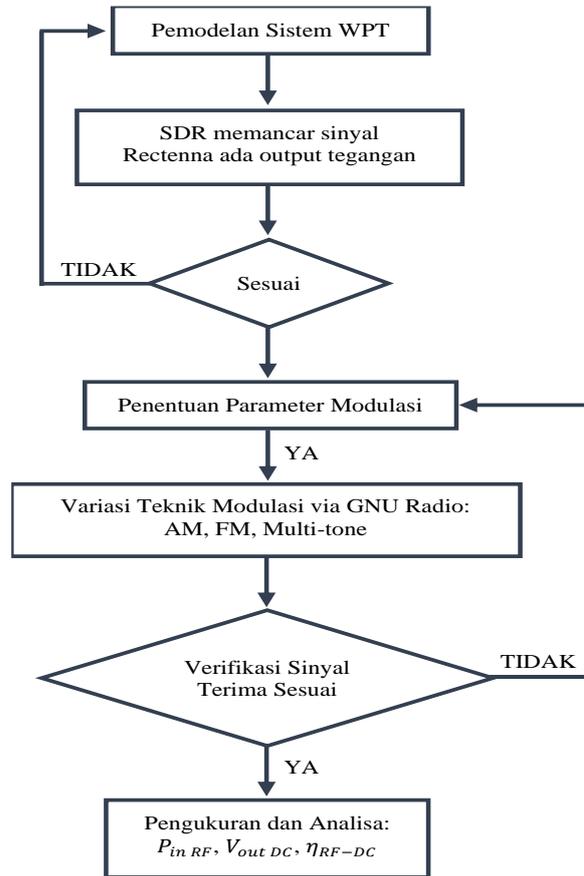
teknik modulasi yang dilakukan beserta kaitannya dengan nilai PAPR sinyal yang dihitung melalui simulasi. Hasil dari Tugas Akhir ini digunakan untuk menemukan teknik modulasi yang paling optimal untuk sistem transfer daya nirkabel.

II. SISTEM RF WPT UNTUK NODE WSN

A. Wireless Sensor Network (WSN)

Seiring dengan majunya teknologi micro electro-mechanical systems (MEMS), komunikasi nirkabel turut berkembang dengan hadirnya node sensor berukuran kecil yang mampu untuk keperluan sensing, pemrosesan data, dan komunikasi. Hal ini memungkinkan realisasi dari Wireless Sensor Networks, atau Jaringan Sensor Nirkabel (JSN) yang melibatkan node-node sensor dalam jumlah besar. Node sensor tunggal dalam JSN umumnya terdiri dari 3 komponen utama, bisa dalam bentuk board individu ataupun tertanam dalam satu sistem tunggal, yaitu: modul nirkabel, board sensor, dan board pemrograman [4].

Contoh implementasi dari WSN dengan node-node sensor yang tersebar adalah konsep WSN untuk sistem monitoring tingkat kesehatan struktur (SHMS / Structural Health Monitoring System) berskala besar [5]. Node-node sensor disembarkan pada beberapa jembatan bentang panjang (long-span) yang di monitor. Sistem ini berbasis 3 komponen: node sensor, server lokal, dan server utama. Komponen node sensor terdiri dari sensor, Data Acquisition Unit (DAU), dan modul radio. Komponen server (lokal dan utama) terdiri dari server dan modul radio. Jaringan komunikasi antara node sensor dengan server lokal berdasarkan WSN, sedangkan komunikasi antar server lokal dan utama berbasis WAN



Gambar 4. Metodologi penelitian.

(Wide Area Network). Desain dari SHMS ini diilustrasikan pada Gambar 1.

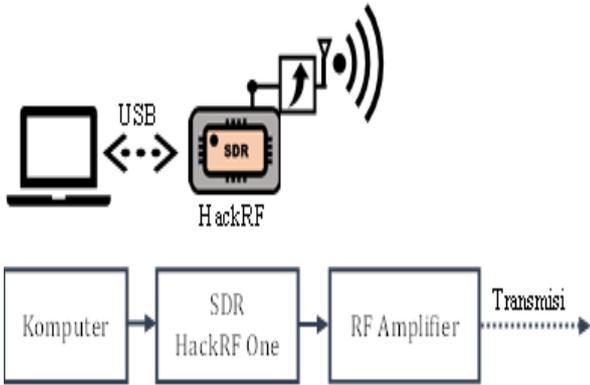
B. Wireless Power Transfer (WPT)

Teknologi Wireless Power Transfer (WPT) merupakan transmisi dari energi elektrik (daya) tanpa memanfaatkan kabel sebagai link. Pada sistem WPT, pemancar yang terhubung ke sumber listrik akan membangkitkan medan elektromagnetik yang bervariasi terhadap waktu (time-varying), dan mentransmisikan daya melewati ruang menuju penerima. Teknik WPT dibagi menjadi 2 kategori utama, yaitu medan dekat (near-field) dan medan jauh (far-field). Pada teknik far-field (atau radiative), daya dipancarkan melalui beam dari radiasi elektromagnetik, seperti pada gelombang mikro dan RF [6]. Teknik ini dapat transfer energi pada jarak jauh namun harus diarahkan pada penerima.

Contoh aplikasi dari WPT jenis far-field adalah pada pengisian node-node sulit dijangkau pada jaringan sensor nirkabel, melalui sebuah drone yang memancarkan gelombang RF menuju penerima (node WSN). Pada tugas akhir ini pemancar disimulasikan menggunakan SDR dan penerima menggunakan *rectenna* (*rectifier antenna*) untuk menyearahkan daya RF yang diterima menjadi daya DC, dengan ilustrasi sistem penelitian pada Gambar 2.

C. Software-Defined Radio (SDR)

Software-Defined Radio, disingkat SDR, merupakan sistem komunikasi frekuensi radio dimana komponen yang sebelumnya diimplementasikan melalui hardware (mixer, filter, amplifier, modem, detektor, dll.), menjadi diimplementasikan dengan software pada sebuah komputer. Dasar dari sebuah sistem SDR meliputi komputer dengan ADC, diikuti oleh sebuah RF front end. Tahap signal



Gambar 5. Blok diagram transmitter.

Tabel 2. Spesifikasi SDR HackRF One

Mode komunikasi	Transceiver, Half-Duplex
Frekuensi kerja	1 MHz ~ 6 GHz
Laju sample	2 ~ 20 Msps (quadrature)
Resolusi	8 bits
Antarmuka	High Speed USB Micro-B
Catu daya	USB bus power
Daya port antenna	Maks. 50 mA pada 3.3 V
Konektor	SMA female

Tabel 3. Hasil pengukuran Daya Terima RF

Modulasi	Jarak (cm)	Daya Terima RF ($P_{in RF}$)	
		(dBm)	(mW)
AM	40	-30.7	8.511×10^{-4}
	60	-35.2	3.020×10^{-4}
	80	-39.0	1.259×10^{-4}
	100	-39.6	1.096×10^{-4}
	120	-41.5	0.708×10^{-4}
FM	40	-30.7	8.511×10^{-4}
	60	-35.0	3.162×10^{-4}
	80	-38.7	1.349×10^{-4}
	100	-40.0	1.000×10^{-4}
	120	-41.7	0.676×10^{-4}
2-tone	40	-30.3	9.332×10^{-4}
	60	-35.0	3.162×10^{-4}
	80	-38.7	1.349×10^{-4}
	100	-40.0	1.000×10^{-4}
	120	-42.0	0.631×10^{-4}
4-tone	40	-30.9	8.128×10^{-4}
	60	-34.7	3.388×10^{-4}
	80	-38.7	1.349×10^{-4}
	100	-39.5	1.122×10^{-4}
	120	-41.6	0.692×10^{-4}
Tanpa Modulasi	40	-30.0	10.00×10^{-4}
	60	-34.4	3.631×10^{-4}
	80	-38.5	1.413×10^{-4}
	100	-39.7	1.072×10^{-4}
	120	-41.9	0.646×10^{-4}

processing tidak lagi dilakukan oleh hardware dengan fungsi spesifik (rangkainan elektronika), melainkan diserahkan kepada prosesor dengan tujuan umum. Dengan rancangan sedemikian rupa, sistem komunikasi radio dapat dilakukan dengan protokol radio yang berbeda-beda secara luas tergantung hanya kepada software yang digunakan.

Tugas akhir ini menggunakan perangkat SDR dari HackRF One. Dengan menggunakan software GNU Radio, signal processing dilakukan pada komputer untuk mengubah parameter dari sinyal yang akan digunakan [7]. Diagram blok SDR HackRF One dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 1. Hasil pengukuran Output Tegangan DC

Modulasi	Jarak (cm)	Output Tegangan DC
		($V_{out DC}$) (mV)
AM	40	51.3
	60	9.2
	80	3.2
	100	2.7
	120	1.7
FM	40	34.3
	60	8.7
	80	2.8
	100	2.2
	120	1.4
2-tone	40	54.6
	60	11.2
	80	3.9
	100	3.1
	120	1.7
4-tone	40	55.4
	60	12.4
	80	3.8
	100	3.3
	120	1.8
Tanpa Modulasi	40	47.7
	60	9.0
	80	3.1
	100	2.6
	120	1.4



Gambar 6. Hasil perbandingan Daya Terima RF.

D. Teknik Modulasi

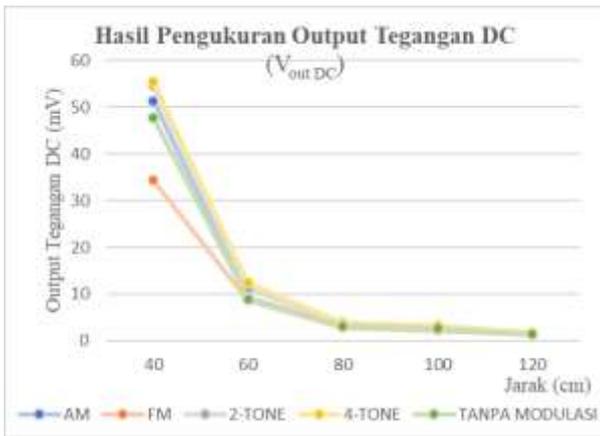
Referensi N. Ayir, T. Riihonen, et al. (2021) telah diteliti pengaruh dari beberapa teknik modulasi yang berbeda (Multisine/Multi-tone, M-QAM, M-PSK) pada *end-to-end efficiency* dari sistem SWIPT (*Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) pada frekuensi 868 MHz [3].

Tugas Akhir ini menerapkan teknik modulasi berikut, untuk kemudian dianalisa pengaruhnya terhadap daya terima RF, output tegangan DC, dan efisiensi konversi daya dari RF ke DC.

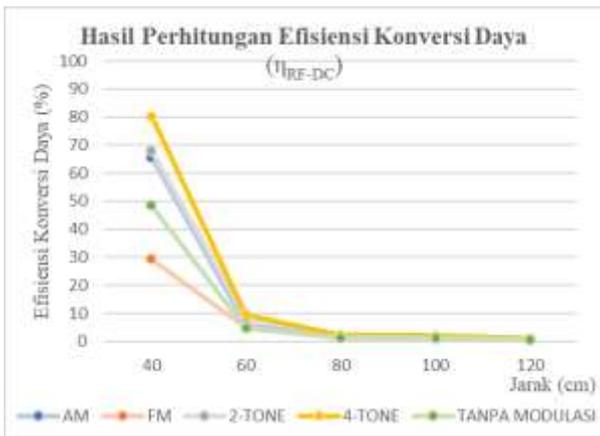
1) Amplitude Modulation (AM)

Modulasi secara amplitudo diartikan sebagai memodifikasi amplitudo dari sinyal pembawa (*carrier*) sesuai dengan amplitudo dari sinyal pemodulasi $m(t)$ (yang bisa merupakan analog maupun digital). *Amplitude Modulation* dinyatakan melalui (1) [8].

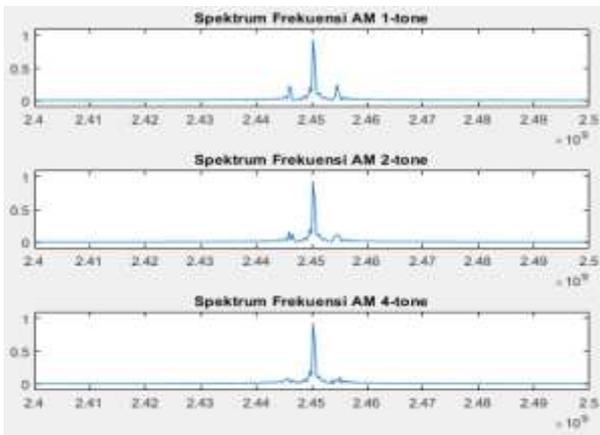
$$s(t) = A_c[1 + m(t)] \cos(\omega_c t) \tag{1}$$



Gambar 7. Hasil perbandingan Output Tegangan DC.



Gambar 8. Hasil perbandingan Efisiensi Konversi Daya.



Gambar 9. Plot MATLAB sinyal AM domain frekuensi setiap tone.

Dimana A_c merupakan amplitudo dari sinyal *carrier* dan $\omega_c = 2\pi f_c$ yang f_c merupakan frekuensi dari sinyal *carrier*.

2) *Frequency Modulation (FM)*

Modulasi secara frekuensi diartikan sebagai memodifikasi frekuensi dari sinyal pembawa (*carrier*) sesuai dengan amplitudo dari sinyal pemodulasi $m(t)$ (yang bisa merupakan analog maupun digital). *Frequency Modulation* dinyatakan melalui (2)

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c t + \theta(t)] \tag{2}$$

Dimana A_c merupakan amplitudo dari sinyal *carrier* dan $\omega_c = 2\pi f_c$ yang f_c merupakan frekuensi dari sinyal *carrier*. Fase $\theta(t)$ adalah fungsi linear dari sinyal pemodulasi $m(t)$.

Tabel 4.
Hasil perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC

Modulasi	Jarak (cm)	$P_{in\ RF}$ (W)	$P_{out\ DC}$ (W) = V^2/Ω	η_{RF-DC}
AM	40	8.511 $\times 10^{-7}$	5.599 $\times 10^{-7}$	65.79 %
	60	3.020 $\times 10^{-7}$	0.180 $\times 10^{-7}$	5.96 %
	80	1.259 $\times 10^{-7}$	0.022 $\times 10^{-7}$	1.73 %
	100	1.096 $\times 10^{-7}$	0.016 $\times 10^{-7}$	1.42 %
	120	0.708 $\times 10^{-7}$	0.006 $\times 10^{-7}$	0.87 %
FM	40	8.511 $\times 10^{-7}$	2.503 $\times 10^{-7}$	29.41 %
	60	3.162 $\times 10^{-7}$	0.161 $\times 10^{-7}$	5.09 %
	80	1.349 $\times 10^{-7}$	0.017 $\times 10^{-7}$	1.24 %
	100	1.000 $\times 10^{-7}$	0.010 $\times 10^{-7}$	1.03 %
	120	0.676 $\times 10^{-7}$	0.004 $\times 10^{-7}$	0.62 %
2-tone	40	9.332 $\times 10^{-7}$	6.343 $\times 10^{-7}$	67.96 %
	60	3.162 $\times 10^{-7}$	0.267 $\times 10^{-7}$	8.44 %
	80	1.349 $\times 10^{-7}$	0.032 $\times 10^{-7}$	2.39 %
	100	1.000 $\times 10^{-7}$	0.020 $\times 10^{-7}$	2.04 %
4-tone	120	0.631 $\times 10^{-7}$	0.006 $\times 10^{-7}$	0.98 %
	40	8.128 $\times 10^{-7}$	6.530 $\times 10^{-7}$	80.34 %
	60	3.388 $\times 10^{-7}$	0.327 $\times 10^{-7}$	9.66 %
	80	1.349 $\times 10^{-7}$	0.031 $\times 10^{-7}$	2.28 %
Tanpa Modulasi	100	1.122 $\times 10^{-7}$	0.023 $\times 10^{-7}$	2.06 %
	120	0.692 $\times 10^{-7}$	0.007 $\times 10^{-7}$	0.99 %
	40	10.00 $\times 10^{-7}$	4.841 $\times 10^{-7}$	48.41 %
	60	3.631 $\times 10^{-7}$	0.172 $\times 10^{-7}$	4.75 %

Untuk FM, fase proporsional dengan integral dari $m(t)$, sehingga

$$\theta(t) = D_f \int_{-\infty}^t m(t) dt \tag{3}$$

D_f merupakan konstanta deviasi frekuensi dengan satuan *rad/Vs*.

3) *Multisine / Multitone Modulation*

Gelombang *multisine* merupakan jumlahan dari beberapa sinusoidal yang dibangkitkan bersama-sama. Secara umum, *multisine* dinyatakan oleh (4) [9].

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t + \theta_k) \tag{4}$$

Dimana A_k adalah amplitudo, θ_k adalah fase ke- k dari sinusoidal, N merupakan jumlah (*tone*) dari sinusoidal, dan $\omega_k = \omega_0 + (k - 1)\Delta\omega$, dengan ω_0 merupakan frekuensi dari

$$\eta_{RF-DC} = \frac{P_{out DC}}{P_{in RF}} = \frac{(V_{out DC})^2/R_L}{P_{in RF}} \quad (9)$$

$\langle s(t)^2 \rangle$, linear	$PAPR$, linear
0.5625 0.5117 0.5031	1.6562 1.8206 1.8519
$\max[s(t)^2]$, linear	$PAPR$, desibel
0.9316 0.9316 0.9316	2.1512 2.6020 2.6761

Gambar 10. Nilai $\langle s(t)^2 \rangle$, $\max[s(t)^2]$, $PAPR$ teknik AM setiap *tone*.

tone pertama dan $\Delta\omega$ separasi frekuensi diantaranya yang bernilai konstan.

E. Daya dari Sinyal

Daya rata-rata (*average power*) merupakan konsep penting yang perlu dipahami. Perhitungan daya rata-rata dari sinyal $s(t)$ secara teoritis dinyatakan dalam (5) [8].

$$P = \langle s^2(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s^2(t) dt \quad (5)$$

Apabila sinyal $s(t)$ merupakan sinyal periodik dengan periode T , maka (5) dapat diubah menjadi:

$$P = \langle s^2(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \quad (6)$$

Apabila sinyal yang dihitung merupakan sinyal sinusoidal dengan amplitudo V , maka daya rata-rata sinyal dapat dihitung melalui nilai root-mean-square (RMS), dengan cara:

$$V_{rms} = \frac{V}{\sqrt{2}}, P = (V_{rms})^2 = \frac{V^2}{2} \quad (7)$$

F. Peak to Average Power Ratio dari Sinyal

$PAPR$ didefinisikan sebagai perbandingan (*ratio*) dari daya maksimal (*peak power*) terhadap daya rata-rata (*average power*) dari sebuah sinyal dan dinyatakan dalam satuan desibel (dB). Pada sistem WPT sinyal dengan $PAPR$ tinggi dapat mengaktifkan diode pada tingkat daya input yang lebih rendah (pada rangkaian penyearah *rectenna*), sehingga meningkatkan efisiensi konversi daya [2]. Nilai $PAPR$ (dB) dari sebuah bentuk gelombang dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$PAPR = 10 \log_{10} \left(\frac{\max[s(t)^2]}{\langle s(t)^2 \rangle} \right) \quad (8)$$

Dimana $s(t)$ adalah bentuk gelombang dari sinyal yang diinginkan dalam domain waktu, sedangkan $\langle \rangle$ mengacu pada operator rata – rata waktu. Persamaan (5) dan (6) menyatakan apabila daya merupakan kuadrat dari sinyal pada domain waktu, sehingga dapat disimpulkan bahwa $\max[s(t)^2]$ dan $\langle s(t)^2 \rangle$ secara berurutan menyatakan daya maksimal dan daya rata – rata dari sinyal.

G. Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC

Pada penelitian ini akan dibandingkan 2 data yaitu daya RF diterima dan tegangan DC keluaran yang terukur, untuk kemudian dievaluasi efisiensi dari konversi daya yang dilakukan. Efisiensi konversi daya RF-to-DC (η_{RF-DC}) dihitung melalui rumus berikut [2].

III. METODE PENELITIAN

Dalam membangun sistem WPT, diperlukan untuk merancang dari penerima hingga pemancar, termasuk memodelkan teknik modulasi yang digunakan melalui software. Oleh karena itu, dari memodelkan sistem WPT yang digunakan untuk penelitian hingga pengambilan data dilakukan secara bertahap, sesuai diagram alir gambar 4.

A. Pemodelan Sistem RF WPT

Aplikasi dari WPT yang ingin dicapai adalah jenis far-field, yaitu berupa drone yang memancarkan gelombang berfrekuensi radio untuk mengisi daya dari node-node sensor nirkabel pada lokasi yang sulit untuk dijangkau. Keseluruhan sistem ini dimodelkan dengan SDR sebagai pemancar dan *rectenna* sebagai penerima. Gelombang yang dipancarkan SDR akan divariasikan melalui software GNU Radio untuk mentransmisikan sinyal dengan mempertimbangkan variabel yang diteliti, yaitu teknik modulasi yang diterapkan.

1) Pemodelan SDR sebagai Transmitter

SDR akan digunakan sebagai RF Front-End untuk memancar sinyal. HackRF One dipilih sebagai SDR yang digunakan untuk keperluan penelitian. Seperangkat pemancar (*transmitter*) meliputi komputer atau laptop yang terkoneksi dengan SDR HackRF melalui kabel Micro USB. RF Amplifier disisipkan antara SDR dan antena pemancar. Penggunaan amplifier ditujukan untuk menguatkan daya sinyal yang dipancarkan, sehingga dapat memancar lebih jauh dan jarak maksimal pemancar-penerima (batas maksimal ditentukan apabila keluaran tegangan DC bernilai nol atau sangat kecil). Blok diagram transmitter dapat dilihat pada Gambar 5. Spesifikasi SDR HackRF One dapat dilihat pada Tabel 1.

2) Pemodelan Rectenna sebagai Receiver

Mendapatkan tegangan DC dari sebuah gelombang frekuensi radio (AC) memerlukan perangkat *rectenna* (*rectifier antenna*), untuk memanen energi dari gelombang elektromagnetik (RF) di sekitarnya. Proses memanen daya RF ini kemudian disebut dengan RF Energy Harvesting atau RF Energy Scavenging. Pada langkah ini akan membuat *rectenna* yang difungsikan sebagai penerima dari sistem WPT. Desain bagian penyearah *rectenna* dibuat menurut skematik pada [10]. Dilakukan beberapa perubahan pada desain referensi, dikarenakan terdapat beberapa komponen yang tidak tersedia.

B. Variasi Teknik Modulasi

Dijelaskan pada langkah sebelumnya, tahapan signal processing dilakukan GNU Radio. Pemrosesan sinyal yang dilakukan pada GNU Radio meliputi: pembangkitan sinyal pemodulasi; modulasi sinyal; dan terakhir mengirimkan sinyal pada RF Front-End (SDR), semua dilakukan dengan menghubungkan dan mengatur blok diagram yang diperlukan pada GNU Radio Companion.

Pembangkitan sinyal pemodulasi terdapat pada blok “Signal Source”. Pada blok ini didefinisikan bentuk gelombang (sinusoidal, segitiga, gigi gergaji, dll.), amplitudo,

frekuensi, fasa, dan laju sample. Untuk keperluan simulasi dan pengecekan sinyal, blok “QT GUI Time Sink” dan “QT GUI Frequency Sink” digunakan untuk plot grafik sinyal pada domain waktu dan domain frekuensi. Modulasi pada GNU Radio dilakukan dengan menambahkan blok-blok yang bersesuaian, seperti: “Add Const” (AM), “FM Preemphasis”, “Frequency Mod” (FM). Terakhir, semua blok diagram akan terhubung dengan “osmocomb Sink”, yaitu blok untuk berkomunikasi dengan SDR (HackRF One) yang akan memancarkan sinyal pada frekuensi radio. Sebelum menuju osmocomb, sinyal yang diproses akan di up-sample dengan blok “Rational Resampler” untuk memenuhi spesifikasi laju sample dari hardware SDR yang digunakan.

C. Metode Pengukuran dan Analisa

Pada langkah ini dilakukan pengukuran terhadap parameter Daya Terima RF, Output Tegangan DC, dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC, untuk setiap teknik modulasi yang dilakukan. Kemudian setelah didapatkan data, akan dilakukan analisa

1) Verifikasi Sinyal yang Diterima

Sebelum data pengukuran diambil, dilakukan verifikasi sinyal yang diterima untuk memastikan sinyal tersebut adalah sinyal yang ditransmisikan. Metode verifikasi yang digunakan adalah memanfaatkan SDR kedua pada sisi penerima, yang difungsikan sebagai Spectrum Analyzer (SA). SDR dapat difungsikan sebagai SA dengan *software HackRF Sweep Spectrum Analyzer for Windows*.

Dikarenakan adanya keterbatasan kemampuan ukur dari SDR HackRF One dan *software Spectrum Analyzer*, metode verifikasi sinyal yang diterima disederhanakan. Sebelum SDR pemancar dinyalakan, tampilan layar *software SA* bernilai datar (~ -90 dBm sepanjang *frequency span* yang diatur). Sinyal terima diverifikasi benar apabila saat SDR pemancar dinyalakan, tampilan SA mendeteksi sinyal pada spektrum frekuensi yang ditampilkan dan terdapat puncak magnitudo pada frekuensi 2.45 GHz.

2) Pengukuran Daya Terima RF

SDR kedua difungsikan sebagai SA dan diletakkan sesuai jarak pengukuran yang ditentukan. Data pengukuran (Daya Terima RF / $P_{in\ RF}$) didapatkan dengan mengamati tampilan dari *software HackRF Sweep Spectrum Analyzer*. Nilai yang diambil adalah magnitudo puncak pada frekuensi yang telah ditetapkan, yaitu 2.45 GHz.

3) Pengukuran Output Tegangan DC

Rectenna diletakkan sesuai jarak pengukuran yang ditentukan. Data pengukuran (Output Tegangan DC / $V_{out\ DC}$) didapatkan dengan menggunakan multimeter untuk mengukur tegangan pada ujung-ujung resistor 4.7 K Ω (RL). Nilai yang diambil saat tegangan mencapai keadaan cukup stabil.

4) Perhitungan Efisiensi Konversi Daya

Efisiensi konversi daya RF ke daya DC dihitung dengan membandingkan data yang didapatkan pada kedua langkah sebelumnya. Hambatan pada beban (R_L) bernilai 4.7 K Ω , sehingga (9) dapat dijabarkan menjadi (10):

$$\eta_{RF-DC} = \frac{(V_{out\ DC})^2 / R_L}{P_{in\ RF}} = \frac{(V_{out\ DC})^2}{4700(P_{in\ RF})} \times 100\% \quad (10)$$

D. Analisa Hasil Pengukuran

Langkah ini merupakan penutup dari serangkaian metodologi, yaitu membandingkan keseluruhan data pengukuran dari setiap teknik modulasi yang dilakukan (termasuk tanpa modulasi). Hasil perbandingan data digunakan untuk menarik kesimpulan teknik modulasi mana yang memiliki performa terbaik untuk sistem transfer daya nirkabel. Sebagai tambahan, modulasi multitone disimulasikan dan dicari nilai PAPR-nya melalui *software MATLAB*, untuk menyelidiki hubungan antara PAPR dengan efisiensi konversi daya RF-to-DC yang terhitung.

IV. HASIL DAN ANALISA

A. Pengukuran Daya Terima RF (Spectrum Analyzer)

Pengukuran variabel $P_{in\ RF}$ dilakukan dengan mengambil nilai puncak dari magnitudo pada frekuensi 2.45 GHz, sesuai dengan tampilan dari *software HackRF Sweep Spectrum Analyzer*, atau SDR yang difungsikan sebagai Spectrum Analyzer. Tabel 2 menunjukkan hasil pengukuran untuk teknik AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi pada jarak penelitian yang bervariasi dari 40~120 cm.

B. Pengukuran Output Tegangan DC

Pengukuran variabel $V_{out\ DC}$ dilakukan dengan menghubungkan *probe* multimeter pada terminal block 2-pin, yang terangkai parallel dengan ujung-ujung resistor 4.7 K Ω . Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran Output Tegangan DC untuk teknik AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi pada jarak penelitian yang bervariasi dari 40~120 cm.

C. Perhitungan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC

Sebelum dilakukan perhitungan sesuai (10), diperlukan konversi satuan dari (dBm dan mV) menuju (Watt dan Volt). Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan efisiensi konversi daya dari teknik AM, FM, 2-tone, 4-tone, dan tanpa modulasi pada jarak penelitian yang bervariasi dari 40~120 cm.

D. Analisa dan Pembahasan

Pada bagian Analisa dan Pembahasan ini akan dipaparkan analisa dari seluruh pengukuran yang telah dilakukan sesuai metode yang telah dijelaskan sebelumnya. Di akhir bagian ini akan ditarik kesimpulan dari analisa data, mengenai teknik modulasi yang optimal untuk digunakan dalam sistem transfer daya nirkabel.

1) Analisa Daya Terima RF

Dari Tabel 2 divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 6, dengan variabelnya adalah Daya Terima RF ($P_{in\ RF}$) banding Jarak (d) untuk kelima teknik modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi).

Dari grafik komparasi tersebut, daya RF yang diterima turun secara eksponensial negatif. Penurunan daya sesuai dengan penambahan loss dari ruang bebas (Free Space Loss / FSL) yang naik secara eksponensial. Kelima teknik modulasi yang dilakukan memiliki Daya Terima RF yang tidak jauh berbeda untuk semua jarak pengukuran.

2) Analisa Output Tegangan DC

Dari Tabel 3 divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 7, dengan variabelnya adalah Output Tegangan DC ($V_{out\ DC}$) banding Jarak (d) untuk kelima teknik

modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi).

Dari grafik komparasi tersebut, tegangan DC keluaran pada *rectenna* turun secara signifikan mulai jarak pengukuran 60 cm keatas. Pada jarak pengukuran 40 cm, teknik modulasi 4-tone memiliki nilai Output Tegangan DC tertinggi dengan nilai 55.4 mV, diikuti oleh teknik 2-tone (54.6 mV), AM (51.3 mV), tanpa modulasi (47.7), FM (34.3 mV). Sedangkan pada jarak 60 cm keatas tegangan DC dari semua teknik modulasi memiliki selisih nilai yang tidak signifikan antara satu dengan lainnya. Apabila dirata-rata, teknik modulasi 4-tone memiliki Output Tegangan DC yang relatif lebih besar dibanding teknik lainnya.

3) Analisa Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC

Dari Tabel 4 divisualisasikan ulang menjadi grafik seperti pada Gambar 8, dengan variabelnya adalah Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC (η_{RF-DC}) banding Jarak (d) untuk kelima teknik modulasi yang dilakukan (AM, FM, 2-tone, 4-tone, tanpa modulasi).

Dari grafik komparasi tersebut, nilai η_{RF-DC} turun secara signifikan mulai jarak pengukuran 60 cm keatas, hal ini disebabkan oleh Output Tegangan DC yang juga turun signifikan pada jarak pengukuran tersebut. Pada jarak pengukuran 40 cm, teknik modulasi 4-tone memiliki nilai Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC tertinggi dengan 80.34%, diikuti oleh teknik 2-tone (67.96%), AM (65.79%), tanpa modulasi (48.41%), FM (29.41%). Sedangkan pada jarak 60 cm keatas η_{RF-DC} dari semua teknik modulasi memiliki selisih nilai yang tidak signifikan antara satu dengan lainnya, dari 5~10% ($d = 60$ cm) hingga 0.5~2% ($d > 60$ cm). Teknik 4-tone memiliki performa efisiensi konversi daya yang paling unggul di antara 5 teknik modulasi yang dilakukan.

4) Analisa PAPR pada Modulasi Multitone

Untuk memperkuat dugaan pada latar belakang bahwa nilai PAPR dari sinyal transmisi berpengaruh pada tingkat efisiensi dari sistem RF WPT, dilakukan simulasi melalui *software* MATLAB untuk menghitung PAPR dari sinyal dengan modulasi AM 1-tone, 2-tone, dan 4-tone. Gambar 10 menunjukkan *plot* grafik dari sinyal modulasi AM setiap *tone* pada domain frekuensi. *Plot* MATLAB sinyal Am domain frekuensi setiap *tone* dapat dilihat pada Gambar 9.

PAPR didapatkan melalui (8) dari setiap sinyal modulasi. Nilai $\max[s(t)^2]$ didapatkan dengan mencari nilai puncak dari setiap sinyal yang telah ditransformasi fourier pada MATLAB (fungsi *fft*), sedangkan nilai $\langle s(t)^2 \rangle$ didapatkan menggunakan fungsi *bandpower*. Output perhitungan MATLAB untuk $\langle s(t)^2 \rangle$, $\max[s(t)^2]$, dan PAPR dalam skala linear dan desibel ditunjukkan pada Gambar 10. Berurutan dari kolom pertama ke ketiga untuk teknik AM 1-tone, 2-tone, dan 4-tone.

Sehingga didapatkan PAPR teknik AM bernilai 2.192 dB untuk 1-tone, 2.6020 dB untuk 2-tone, dan 2.6761 dB untuk 4-tone. Membandingkan dengan data efisiensi konversi (jarak 40 cm), disimpulkan nilai PAPR berpengaruh terhadap nilai efisiensi konversi daya, dengan relasi semakin tinggi nilai PAPR maka semakin tinggi pula tingkat efisiensi konversi daya RF-to-DC.

V. KESIMPULAN

Paper ini bertujuan untuk mengetahui teknik modulasi yang paling optimal dan efisien untuk digunakan pada sistem RF WPT. Dari hasil pengukuran dan analisa, teknik modulasi Multitone dengan jumlah *tone* 4 dipilih sebagai teknik yang paling optimal untuk Sistem Transfer Daya Nirkabel, dengan pertimbangan teknik tersebut memiliki nilai Output Tegangan DC dan Efisiensi Konversi Daya RF-to-DC tertinggi dibanding keempat teknik lain (55.4 mV dan 80.34% pada jarak $d = 40$ cm). Pada modulasi multitone, efisiensi konversi daya RF-to-DC meningkat seiring bertambahnya PAPR.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. V. Tran and G. Kaddoum, "RF wireless power transfer: Regreening future networks," *IEEE Potentials*, vol. 37, no. 2, pp. 35–41, 2018, doi: 10.1109/MPOT.2017.2749118.
- [2] A. Collado and A. Georgiadis, "Optimal waveforms for efficient wireless power transmission," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 24, no. 5, pp. 354–356, 2014, doi: 10.1109/LMWC.2014.2309074.
- [3] N. Ayir, T. Riihonen, M. Allen, and M. F. Trujillo Fierro, "Waveforms and end-to-end efficiency in RF wireless power transfer using digital radio transmitter," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 69, no. 3, pp. 1917–1931, 2021, doi: 10.1109/TMTT.2020.3047654.
- [4] I. F. Akyildiz and M. C. Vuran, *Wireless Sensor Networks*, 1st ed. Chichester, West Sussex, U.K.: John Wiley & Sons, 2010.
- [5] E. Setijadi *et al.*, "Design of Large Scale Structural Health Monitoring System for Long-Span Bridges Based on Wireless Sensor Network," in *2013 International Joint Conference on Awareness Science and Technology and Ubi-Media Computing: Can We Realize Awareness via Ubi-Media?*, iCAST 2013 and UMEDIA 2013, 2013, pp. 169–173, doi: 10.1109/ICAWST.2013.6765428.
- [6] M. Poveda-Garcia, J. Oliva-Sanchez, R. Sanchez-Iborra, D. Canete-Rebenaque, and J. L. Gomez-Tornero, "Dynamic wireless power transfer for cost-effective wireless sensor networks using frequency-scanned beaming," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 8081–8094, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2886448.
- [7] I. R. Ishkaev, A. E. Shevelev, A. S. Ovsyannikova, S. V. Zavjalov, S. V. Volvenko, and S. B. Makarov, "Possibility of Peak-to-Average Power ratio Reduction by Application of Optimal Signal for Transmitter Based on SDR HackRF One," in *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech 2018*, 2018, no. 1, pp. 141–145, doi: 10.1109/EExPolytech.2018.8564411.
- [8] L. W. Couch, *Digital and Analog Communication Systems*, 8th ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2013.
- [9] N. Carvalho, K. Remley, D. Schreurs, and K. Gard, "Multisine signals for wireless system test and design," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 122–138, 2008, doi: 10.1109/MMM.2008.919938.
- [10] M. Koohestani, J. Tissier, and M. Latrach, "A miniaturized printed rectenna for wireless RF energy harvesting around 2.45 GHz," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 127, no. September, 2020, doi: 10.1016/j.aeue.2020.153478.