

Sistem Antena Array Paralel untuk Menghasilkan *Lobe* Radiasi Utama dalam Arah Bervariasi

Fetricia Yuni Amaelia¹ dan Hugeng²

Abstract: Array antenna is an antenna which is assembled from structures of single antenna, which usually is a dipole feeded antenna. This antenna is invented as the basic form of smart antenna system. One of the advantages of array antenna is able to produce a various directions of the main lobe radiation by adjusting the phase difference from the feeding in each element. This array antenna device is designed from 4 elements of single dipole antenna which has 2 GHz frequency operation and also had 3.39 dBd of antenna gain. The feeding of phase difference is set manually by adjusting the variance of the length of transmission line among the elements in the array. Tests of the antenna using signal generator and spectrum analyzer has a result of radiation power which is described in radiation pattern form. From the radiation pattern formed, there is a various direction in the main lobe radiation with 4 difference phase of feeding which shows the result of the accomplishment both from the specification and achieving the purpose of the design.

Keywords: single dipole antenna, array antenna, phase difference of feeding, main radiation lobe.

Abstrak: Antena array adalah suatu antena yang dibentuk oleh susunan sejumlah elemen antena tunggal yang biasanya berupa antena dipol dimana setiap elemen tersebut diberi arus. Antena ini merupakan cikal bakal pengembangan sistem antena cerdas. Salah satu kelebihan antena array adalah dapat menghasilkan variasi arah lobe radiasi utama dengan mengatur beda fasa pengumpanan arus tiap elemennya. Antena array berikut ini dirancang dengan menggunakan 4 elemen antena dipol tunggal pada frekuensi operasi 2 GHz dan memiliki penguatan antena 3.39 dBd. Beda fasa pengumpanan arus diatur secara manual melalui beda panjang saluran transmisi antara tiap elemen array. Melalui pengujian dengan menggunakan generator sinyal dan spektrum analyzer, diperoleh daya radiasi yang kemudian digambarkan dalam bentuk pola radiasi. Berdasarkan pola radiasi tersebut terlihat adanya variasi arah lobe radiasi utama dengan 4 beda fasa pengumpanan arus yang berbeda dan hasil ini telah memenuhi spesifikasi dan mencapai tujuan dari perancangan.

Kata kunci: antena dipol tunggal, antena array, beda fasa pengumpanan arus, lobe radiasi utama.

PENDAHULUAN

Antena adalah suatu piranti yang digunakan untuk memancarkan dan menerima gelombang elektromagnetik dengan frekuensi gelombang radio (*Radio Frequency*/RF) atau frekuensi gelombang mikro bergantung pada jenis penggunaan dan alokasi frekuensinya. Antena telah dikenal dengan variasi yang luas baik dari segi struktur maupun bentuknya. Di antaranya adalah antena yang paling sederhana yaitu, antena dipol linier, *horn*, parabola dan sistem antena Yagi-Uda yang berbentuk *array* dan banyak dipakai di Indonesia. Kinerja dari suatu antena ditentukan oleh sejumlah parameter seperti, impedansi atau hambatan resistansi, efisiensi *gain*, *effective aperture*, pola radiasi dan khususnya *directivity*-nya. [1]

Di antara contoh-contoh antena di atas, antena linier dipol mempunyai suatu keuntungan, yaitu sebagai jenis piranti yang paling sederhana dan mudah dibuat. Namun antena ini terbatas dalam kinerjanya, misalnya hanya cocok digunakan untuk keperluan pemancaran gelombang radio yang bersifat *omnidirectional* (hampir isotropis ke segala arah atau daerah sekitarnya yang berjarak dekat) dengan direktivitas yang sangat rendah. Sedangkan untuk aplikasi tertentu seperti radar yang digunakan sebagai penginderaan sumber radiasi, keterarahan pola radiasi dengan resolusi spasial (sudut ruang) tinggi dan keterarahan tajam sangat diperlukan. Maka untuk keperluan ini, antena dipol linier tidak dapat memenuhi tuntutan praktis yang dituntut terutama efisiensi, keterarahan dan penguatan. Misalkan solusi yang diambil dengan memperpanjang kawat antena yang dapat menghasilkan *major lobe* yang tajam, tetapi bersamaan dengan itu juga akan dihasilkan *lobe samping* (*side lobe*) yang besar dalam arah yang tidak diinginkan, sehingga *directivity gain* menjadi lebih kecil. Bila menggunakan antena jenis lain misalkan antena parabola, memang dapat dihasilkan berkas radiasi yang lebih terarah namun hanya dalam arah tertentu. Untuk mengubah arah berkas radiasi diperlukan sistem mekanik untuk memutar poros antena, ini berarti sistem bersangkutan akan menjadi lebih besar dan berat disamping harus menghadapi keterbatasan kecepatan untuk pemutaran antena secara mekanik.

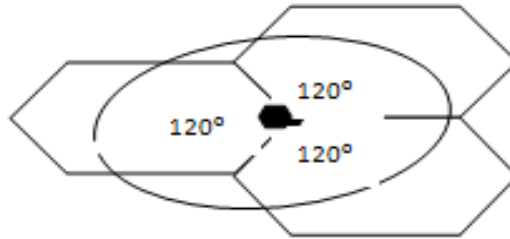
Untuk mengatasi masalah di atas bahkan untuk menghasilkan sistem antena dengan inteligensia tinggi (*Smart Antenna*) sudah lama dikenal rancangan sistem berbentuk *array* yang dilengkapi dengan perangkat pengaturan beda fasa pengumpanan antena secara elektronik serta program komputer bagi pengolahan sinyalnya. Sistem ini tidak hanya dapat menghasilkan direktivitas yang tinggi, tetapi juga mengatur arah berkas radiasi yang berubah-ubah dan dapat beroperasi secara adaptif sesuai dengan tuntutan keadaan atau lingkungan daerah operasi. Sistem *array* ini dapat dibangun dari susunan sejumlah elemen antena dipol yang dilengkapi dengan program pengolahan sinyal. Sistem tersebut belum banyak dikembangkan di Indonesia, meskipun mempunyai aplikasi mendesak dan meluas.

Sebelumnya Penulis melakukan survei untuk mengetahui jenis antena yang digunakan pada *Base Transceiver Station* (BTS) milik beberapa operator telekomunikasi di Indonesia. Survei pertama dilakukan di BTS milik Indosat yang bertempat di daerah Kapuk Muara-Jakarta Utara pada tanggal 19 Mei 2011. BTS milik Indosat ini menggunakan 2 jenis antena yaitu, antena omnidireksional (antena parabola) dan antena panel (antena

¹ Jurusan Teknik Elektro Universitas Tarumanagara

² Jurusan Teknik Elektro Universitas Trisakti

sektoral). Antena parabola tersebut ditutupi pelindung yang disebut radom dan berfungsi untuk melindungi elemen dalam antena tersebut dari perubahan cuaca sekitar. Antena ini digunakan dalam perangkat transmisi *microwave* (MW) yang mengakomodasi hubungan antara BTS dan *Base Station Controller* (BSC). Melalui pola radiasi elektromagnetik yang sempit atau terarah, gelombang yang dipancarkan menjangkau sasarannya pada jarak yang jauh. Sedangkan antena sektoral yang berbentuk persegi panjang dengan pola radiasi yang lebih lebar sehingga berfungsi untuk menangkap sinyal dari *handphone* disekitar BTS. Antena sektoral ditempatkan dalam 3 arah yang membentuk sudut 120° seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 dan Gambar 2 berikutnya menunjukkan susunan antena yang terpasang di BTS Indosat.



■ **Gambar 1.** Penempatan Antena Sektoral pada BTS



■ **Gambar 2.** Susunan antena pada BTS Indosat

Survei kedua dilakukan di BTS milik operator AXIS di daerah Mega Kuningan-Jakarta Selatan pada tanggal 24 Mei 2011. BTS AXIS juga menggunakan antena omni dan antena direksional seperti sistem antena yang digunakan oleh BTS Indosat. Biasanya perbedaan antena yang digunakan pada BTS antar-operator terletak pada merek alat dan spesifikasi dalam keluaran daya serta pola radiasinya. Misalnya, diantaranya merek antena yang banyak dijumpai dalam survei ini adalah Katherin, RFS dan Andrew.

Melalui kedua survei yang telah dilakukan, dapat disebutkan bahwa belum ada operator penyedia jasa telekomunikasi yang menggunakan jenis antena *array* pada BTS mereka. Namun, di salah satu blog milik Agostino Piccirillo disebutkan adanya rencana pengembangan antena *array* 8 elemen pada BTS. Sistem antena ini bekerja melalui superposisi radiasi dari masing-masing elemen sehingga dapat menghasilkan pola berkas radiasi yang diinginkan, yaitu mengarah ke *Mobile Station* (MS) tujuan. Sebaliknya, dengan bantuan perangkat lunak komputer yang canggih, antena *array* juga dapat menentukan arah kedatangan berkas radiasi dari luar. Pancaran gelombang radio dari *mobile phone* pada umumnya berasal dari letak yang tersebar dan berubah-ubah, bergantung pada lokasi pemilik *mobile phone*. Penggunaan komunikasi selular yang semakin luas dan meningkat akan memberi dampak pada peningkatan lalu lintas dan kualitas pelayanan (*Quality of Service /QoS*). Dengan memperkenalkan penggunaan antena *array* ini diharapkan dapat menjawab tantangan dari tuntutan akan peningkatan jasa pelayanan tersebut. Selain itu, Penulis juga melakukan survei terhadap laporan Tugas Akhir atau skripsi mahasiswa Teknik Elektro yang ada di perpustakaan Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara. Dari survei tersebut ditemukan bahwa sebelumnya telah ada rancangan untuk antena *phased array* paralel. Antena ini dirancang oleh Yulianto Setjiady pada tahun 2001 yang lalu.

Alat ini terdiri dari 2 bagian, yaitu bagian perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Bagian perangkat keras terdiri dari susunan antena dipol linier yang berjumlah 4 elemen dengan konfigurasi paralel di mana elemen-elemen bersifat identik. Sedangkan untuk bagian perangkat lunak merupakan sebuah program yang akan menghasilkan simulasi distribusi daya radiasi untuk masing-masing tata urutan (beda fasa) pengumpulan arus pada sistem antena. Sistem yang relatif sederhana ini dimaksudkan untuk memahami dan menguasai prinsip operasi dan prinsip perancangan dari sistem *array*. Alat ini dirancang menggunakan frekuensi 2 GHz dengan pertimbangan hasil rancangan ini bukan untuk diterapkan untuk aplikasi, namun untuk eksperimen yang dapat dikembangkan lebih lanjut. Kajian ini dapat menjadi langkah awal atau embrio bagi upaya lebih lanjut dalam pengembangan sistem antena intelijen.

KAJIAN PUSTAKA

Antena *phased array* merupakan susunan sejumlah antena tunggal berupa paralel atau *collinear* yang kemudian disebut sebagai elemen *array*. Antena tunggal yang paling sederhana dan sering digunakan adalah antena dipol linier. Antena *phased array* adalah antena direksional yang memiliki tingkat direktivitas yang tinggi dengan arah *lobe* radiasi utama ditentukan oleh beda fasa pengumpanan arus masing-masing elemen *array*. Pola radiasi yang semakin tajam menunjukkan semakin tinggi penguatan dengan semakin sempit lebar berkas radiasi (*beamwidth*) antena. Jumlah elemen yang digunakan juga berpengaruh pada tingkat penguatan daya radiasi sistem. Jelasnya, semakin banyak jumlah elemen membuat semakin tinggi penguatan pada antena.

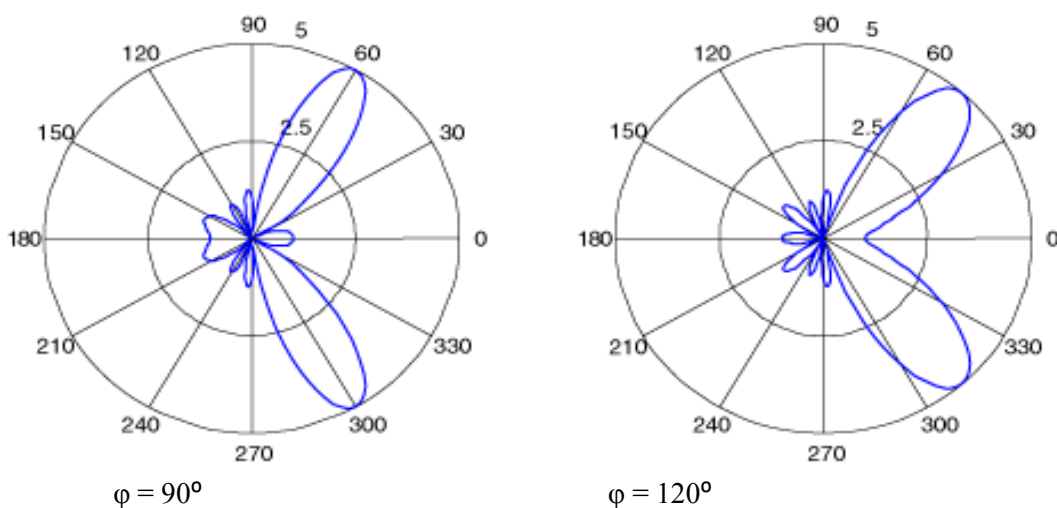
Salah satu faktor yang mempengaruhi penguatan antena adalah impedansi masukan. Pada *phased array* impedansi masukan merupakan ciri yang sangat penting karena tidak hanya terdiri dari impedansi diri (*self impedance*) tapi juga impedansi mutual (*mutual impedance*) tiap-tiap elemen. Nilai impedansi tersebut dapat berubah sesuai dengan pengaturan jarak antar elemen dan panjang tiap elemen antena. Kedua hal tersebut ditentukan berdasarkan frekuensi operasional yang digunakan oleh antena. Konsep rangkaian dapat digunakan untuk menganalisis impedansi masukan elemen antena *array* di mana hubungan antara tegangan dan arus pada masing-masing elemen dapat dituliskan sebagai berikut: [1]

$$\begin{aligned} V_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1N}I_N \\ V_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \dots + Z_{2N}I_N \\ V_N &= Z_{N1}I_1 + Z_{N2}I_2 + \dots + Z_{NN}I_N \end{aligned} \quad (1)$$

dimana I_N adalah arus pada elemen ke- n . Impedansi masukan dari elemen ke- n pada *array* ditulis seperti persamaan di bawah ini dengan Z_{nn} adalah impedansi diri elemen ke- n dan Z_{mn} adalah impedansi mutual antara elemen m dan n . [1]

$$Z_{n_{in}} = \frac{V_n}{I_n} = Z_{nn} + Z_{nm} \frac{I_m}{I_n} + \dots + Z_{nn} \frac{I_n}{I_n} \quad (2)$$

Dalam antena *phased array*, beda fasa antara pengumpanan elemen-elemen antena dapat diatur secara mekanik atau elektronik. Pemilihan beda fasa dapat menentukan arah dan bentuk pola radiasi yang bersesuaian. Ini berarti arah dan bentuk pola radiasi dari antena *phased array* dapat dikontrol melalui beda fasa antara pengumpanan arus kepada tiap-tiap elemen antena dalam sistem *array* yang bersangkutan seperti yang ditampilkan pada Gambar 3. Secara mekanik atau manual, beda fasa pencatutan arus pada tiap elemen dapat diperoleh dengan cara membuat perbedaan panjang saluran transmisi pada masing-masing elemen. Panjang saluran transmisi yang berbeda ini membuat arus tiba pada tiap elemen dalam waktu yang berbeda sehingga mengakibatkan timbulnya beda fasa. Arus dicatu secara serempak oleh *signal generator* yang digunakan sebagai sumber listrik ke modul pembagi arus yang selanjutnya dihubungkan ke tiap elemen *array*.



■ **Gambar 3.** Pola Radiasi Antena Array Dengan Beda Fasa Yang Berlainan. [2]

Untuk mengalirkan arus ke antena maka dibutuhkan suatu media yang menghubungkan sumber dan antena yang disebut dengan saluran transmisi. Selain sebagai media penghantar, saluran transmisi juga digunakan sebagai penentu beda fasa pengumpanan arus seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Rancangan ini juga dilengkapi dengan program simulasi distribusi daya radiasi dari sistem antena *array* yang dapat pula digunakan untuk menguji pola radiasi antena.

Karakteristik Antena

Antena adalah suatu perangkat perantara yang berfungsi untuk mengubah energi arus listrik bolak-balik yang diterima dari kabel transmisi menjadi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan ke udara. Karakteristik dari suatu antena dapat dilihat dari beberapa parameter seperti medan radiasi, pola radiasi, lebar berkas radiasi (*beamwidth*), *bandwidth*, direktivitas, penguatan, polarisasi dan efisiensi yang dapat menentukan kinerja suatu antena [1]. Prinsip kerja antena yang meliputi medan radiasi, pola radiasi, lebar berkas radiasi, direktivitas, penguatan, impedansi masukan, dan *bandwidth* akan diuraikan berikut ini.

Medan radiasi

Sesuai dengan fungsi antena yang digunakan untuk memancarkan gelombang elektromagnetik, maka prinsip kerjanya harus dilakukan atas dasar teori medan radiasi yang diturunkan dari persamaan Maxwell. [3]

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (6)$$

(semua lambang atau notasi yang dicetak tebal menandakan besaran vektor) Operator ∇ dalam sistem koordinat kartesian didefinisikan menurut persamaan di bawah ini dengan vektor dasar $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ yang memenuhi syarat ortonormalitas, yaitu $\hat{x}_i \cdot \hat{x}_j = \delta_{ij}$ dengan i dan j adalah bilangan asli dan $\delta_{ij} = 0$ bila $i \neq j$ sedangkan $\delta_{ij} = 1$ bila $i = j$. [3]

$$\nabla = \hat{x}_1 \frac{\partial}{\partial \hat{x}_1} + \hat{x}_2 \frac{\partial}{\partial \hat{x}_2} + \hat{x}_3 \frac{\partial}{\partial \hat{x}_3} \quad (7)$$

Apabila terdapat sumber arus yang memiliki kerapatan $\mathbf{J}$ (misalkan rapat arus pada antena), maka penyelesaian persamaan gelombang dapat ditentukan melalui fungsi vektor potensial $\mathbf{A}$ berdasarkan definisi $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ dan menghasilkan solusi berbentuk: [3]

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') \frac{e^{jkR}}{R} d^3\mathbf{r}' \quad (8)$$

dengan $R = r - r'$ dan r adalah vektor posisi titik pengamatan, sedangkan r' adalah vektor posisi sumber. Medan radiasi umum ditentukan atau diukur dalam daerah jauh (*far field region*) seperti tampak dalam Gambar 5. Dalam daerah jauh dengan $d \ll \lambda \ll r$ berlaku ungkapan aproksimasi untuk fungsi potensial vektor dengan bentuk ini: [3]

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu e^{jkR}}{4\pi R} \int \mathbf{J}(\mathbf{r}') e^{(ikr, r')} d^3\mathbf{r}' \quad (9)$$

Selain itu, pada daerah jauh berlaku hubungan $\nabla \times \mathbf{B} = ik \times \mathbf{B}$ dan $\mathbf{E} = v \mathbf{B} \times \mathbf{k}$ seperti pada medan gelombang EM dalam daerah bebas. Selanjutnya, daya rata-rata yang dipancarkan per satuan luas ditentukan berdasarkan rumus Pointing, yaitu: [3]

$$N = \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \mathbf{k} = \frac{v}{2\mu} \|\mathbf{B}\|^2 \quad (10)$$

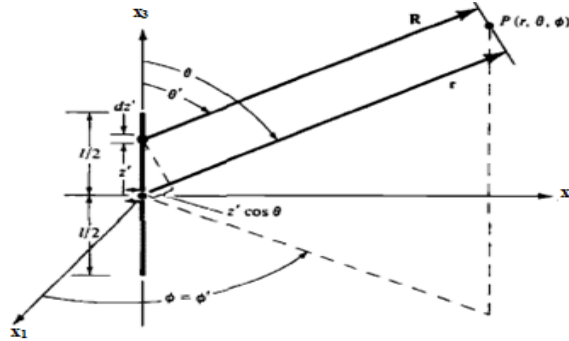
Daya rata-rata per satuan sudut ruang yang bersangkutan adalah: [3]

$$W = r^2(N) = \frac{v}{2\mu} r^2 \| \mathbf{B} \|^2 \quad (11)$$

Sedangkan intensitas radiasi yaitu daya yang diradiasikan oleh antena per sudut diperoleh dengan mengalikan kerapatan radiasi rata-rata dengan kuadrat jaraknya.

$$U = r^2 W_{av} \quad (12)$$

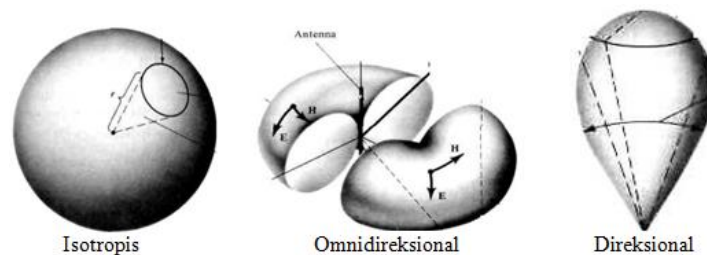
Gambar 4 di bawah menyatakan skematik untuk pengamatan *far field*.



■ Gambar 4. Skematik Untuk Pengamatan *Far field*. [1]

Pola radiasi

Pola radiasi adalah pola yang terbentuk dari distribusi daya yang diradiasikan oleh antena ke udara atau suatu ruang. [1] Ada 3 jenis pola radiasi, yaitu isotropis direksional dan omnidireksional seperti yang ditampilkan pada Gambar 5. Pola isotropis adalah pola radiasi yang memiliki pancaran yang sama besar di segala arah. Pola direksional memiliki pancaran utama dalam arah tertentu. Sedangkan pola omnidireksional memiliki pancaran ke segala arah pada bidang tertentu saja dan daya yang diradiasikan adalah nol pada arah lain. [1] Semakin *directional*

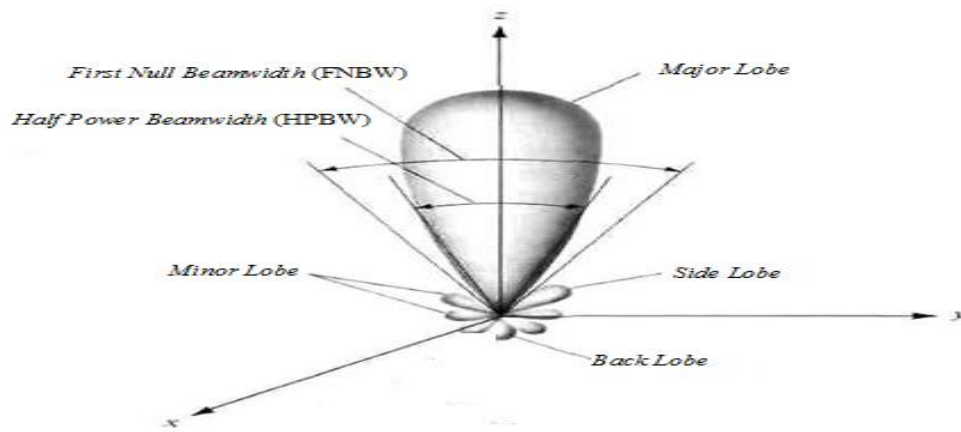


■ Gambar 5. Jenis Pola Radiasi. [1]

pola radiasi suatu antena, maka semakin sempit lebar pancarannya (*beamwidth*). Bentuk pola radiasi pada antena dipol dipengaruhi oleh panjang fisik antena, semakin besar panjang antena maka bentuk *lobe* yang dihasilkan semakin mengecil (lebih terarah) dan juga dihasilkan *lobe-lobe* kecil lain selain *lobe* utamanya. [4] Gambar 6 menunjukkan *lobe-lobe* lain yang muncul pada pola radiasi. *Major lobe* adalah *lobe* radiasi dalam arah maksimum, *minor lobe* adalah *lobe* radiasi selain *major lobe* dalam arah yang tidak diinginkan, *side lobe* umumnya adalah ukuran *minor lobe* yang terbesar, sedangkan *back lobe* adalah *lobe* radiasi dalam arah yang berlawanan dengan *major lobe*. [4]

Lebar berkas radiasi (*beamwidth*)

Lebar berkas radiasi adalah lebar sudut yang terbentuk pada saat intensitas radiasi adalah $\frac{1}{2}$ dari harga maksimumnya atau turun 3 dB. [3] Hal ini sering disebut sebagai *Half Power Beamwidth* (HPBW) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Sedangkan *First Null Beamwidth* (FNBW) merupakan lebar sudut antara bagian null (kosong) pertama pada sisi lain berkas utama. [3] Seperti yang telah disebutkan di atas bahwa *beamwidth* ditentukan dengan menurunkan intensitas radiasi maksimum sebesar 3 dB di mana intensitas radiasi maksimum direferensikan sama dengan 1 dan dinyatakan dalam 0 dB, sehingga $\frac{1}{2}$ dari intensitas maksimum adalah -3 dB. Perpotongan antara bagian -3 dB tersebut ditarik garis menuju pusat grafik pola radiasi, maka besarnya sudut yang terbentuk adalah *beamwidth*. [1]



■ Gambar 6. Pola Radiasi Utama Sebuah Antena. [1]

Direktivitas

Direktivitas (D) merupakan suatu karakteristik penting dari pola radiasi. Direktivitas adalah suatu arah tertentu dimana intensitas radiasi lebih besar daripada intensitas radiasi dalam arah lain. Direktivitas berhubungan dengan bentuk pola radiasi, dimana semakin tajam bentuk pola yang dihasilkan menunjukkan semakin tinggi direktivitasnya. [1]

$$D_o = \frac{U_{max}}{U_0} = 4\pi \frac{U_{max}}{P_{rad}} \quad (13)$$

Penguatan

Penguatan berkaitan erat dengan direktivitas. Semakin tinggi direktivitas, maka makin tinggi pula penguatannya. Pernyataan ini dipertegas dengan persamaan: [1]

$$G = \eta D \quad (14)$$

Penguatan dapat diperoleh dari perbandingan daya yang diterima oleh antenna penerima dengan daya yang diterima oleh antenna referensi (antenna isotropik). Misalkan antenna pada titik A memancarkan daya W_t dan antenna referensi pada titik B menerima daya W_r , selanjutnya antenna referensi pada titik B diganti dengan antenna yang diuji dan menerima daya W_a . Maka, penguatan antenna adalah $10 \log W_a/W_r$ (dalam dB). [5]

Impedansi masukan

Impedansi masukan menentukan besarnya daya yang dipancarkan atau diterima oleh suatu antenna. Impedansi masukan antenna terdiri dari 2 bagian, yaitu bagian riil dan bagian imajiner yang ditulis dengan persamaan: [6]

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (15)$$

dimana:

X_A = reaktansi antenna (ohm) ; R_A = resistansi antenna (ohm)

Bagian riil menyatakan resistansi radiasi, yaitu daya yang diteruskan dari gelombang pembawa ke gelombang *free-space* dan bagian reaktansi antenna (X_A) menyatakan daya yang tersimpan pada medan dekat dari antenna.

Bandwidth

Bandwidth antenna adalah jangkauan frekuensi dimana karakteristik antenna seperti impedansi masukan, pola radiasi, beamwidth, penguatan dan yang lainnya masih dapat bekerja dengan efektif. [3]

Antena Dipol

Antena dipol adalah salah satu antenna yang paling sederhana dan banyak digunakan. Antena ini memiliki dimensi fisik yang disesuaikan dengan panjang gelombang yang digunakan dalam sistem antenna yang bersangkutan. Hubungan antara frekuensi, panjang gelombang dan dimensi fisik antenna dapat ditunjukkan pada persamaan berikut: [1]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (16)$$

di mana λ adalah panjang gelombang dalam satuan meter, c adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa (3×10^8 meter/detik) dan f adalah frekuensi kerja yang digunakan dalam satuan Hertz. Seperti yang telah disebutkan pada subbab sebelumnya mengenai kerapatan arus J , maka kerapatan arus J pada antena dipol adalah: [3]

$$J = x_3 I_0 \sin[k(l - |x_3|)] \delta(x_1) \delta(x_2) \quad (17)$$

Selanjutnya, daya radiasi antena dipol dapat ditentukan dari persamaan pointing hingga diperoleh persamaan berikut: [3]

$$W = \frac{15 I_0^2}{8 \pi^2} F^2(\theta) \quad (18)$$

Fungsi $F(\theta)$ didefinisikan sebagai berikut: [3]

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)}{\sin \theta} \quad (19)$$

Persamaan medan listrik E untuk antena dipol $\lambda/2$ dalam ruang hampa ditentukan melalui persamaan: [3]

$$E(\theta) = \frac{60 I_0}{r} F(\theta) = \frac{60 I_0}{r} \left[\frac{\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl)}{\sin \theta} \right] = \frac{60 I_0}{r} \left[\frac{\cos \left[\frac{\pi}{2} \cos \theta \right]}{\sin \theta} \right] \quad (20)$$

Total daya radiasi dan intensitas radiasi ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut: [1]

$$P_{\text{rad}} = \eta \frac{|I_0|^2}{4\pi} \int_0^\pi \frac{\cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta \right)}{\sin \theta} d\theta \quad (21)$$

$$U = r^2 W_{\text{av}} = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \left[\frac{\cos \left(\frac{\pi}{2} \cos \theta \right)}{\sin \theta} \right]^2 = \eta \frac{|I_0|^2}{8\pi^2} \sin^3 \theta \quad (22)$$

Direktivitas untuk antena dipol $\lambda/2$ diperoleh setelah mendapatkan daya radiasi dan intensitas radiasi, sehingga direktivitas dapat dituliskan: [1]

$$D_0 = 4\pi \frac{U_{\text{max}}}{P_{\text{rad}}} = 4\pi \frac{U|_{\theta=\pi/2}}{P_{\text{rad}}} = \frac{4}{C_{\text{in}}(2\pi)} = \frac{4}{2.435} \approx 1.643 \quad (23)$$

Antena dipol tunggal yang digunakan terbuat dari bahan kuningan dengan panjang $\lambda/2$ yang memiliki *velocity factor* sebesar 95% (0,95). Bahan kuningan dipilih karena lebih tahan disolder dan tahan terhadap korosi serta kelembapan. Selain itu, bahan kuningan juga memberikan hasil pemancaran dan penerimaan hampir sebaik bahan tembaga.

Impedansi masukan antena dipol

Impedansi pada antena dipol terdiri dari bagian rill dan imajiner yang dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut: [1]

$$R = \frac{\eta}{4\pi} \left[\left(1 - \cot^2 \left(\frac{kL}{2} \right) \right) C_{\text{in}}(2kL) + 4 \cot^2 \left(\frac{kL}{2} \right) C_{\text{in}}(kL) + 2 \cot \left(\frac{kL}{2} \right) (\text{Si}(2kL) - 2\text{Si}(kL)) \right] \quad (24)$$

$$X = \frac{\eta}{4\pi} \left\{ (2Si(kL) + \cos(kL)) [2Si(kL) - Si(2kL)] - \sin(kL) \left[2Ci(kL) - Ci\left(\frac{2ka^2}{2}\right) \right] \right\} \quad (25)$$

Si dan Ci adalah integral sinus dan kosinus.

Panjang gelombang antenna dihitung menggunakan persamaan (16) di mana c adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa dan f adalah frekuensi operasi, sehingga diperoleh:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2 \times 10^9 \text{ Hz}} = 0,15 \text{ meter (m)} = 15 \text{ centimeter (cm)}$$

Panjang elemen antenna (L) adalah:

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{15 \text{ cm}}{2} = 7,5 \text{ cm}$$

Impedansi dipol $\lambda/2$ dihitung dengan persamaan (24) dan (25), sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} R &= \frac{377}{4(3,14)} [(1 - \cot^2(90^\circ))C_{in}(2(3,14)) + 4\cot^2(90^\circ)C_{in}(3,14) + 2\cot(90^\circ)(Si(2(3,14)) - 2Si(3,14))] \\ &= 73,125 \Omega \approx 73 \Omega. \\ X &= \frac{\eta}{4\pi} \{ (2Si(3,14) + \cos(90^\circ)) [2Si(3,14) - Si(2(3,14))] - \sin(90^\circ) [2Ci(3,14) - Ci((3,14)(15))] \} \\ &= 42,545 \Omega \approx 42,5 \Omega \end{aligned}$$

Jadi, impedansi dari antenna dipol $\lambda/2$ ini adalah $Z = 73 + j42,5 \Omega$. Bagian riil dari impedansi ini adalah resistansi radiasi ($R_r = 73 \Omega$) dari antenna dipol. Nilai resistansi ini hampir mendekati nilai impedansi karakteristik dari saluran transmisi yang umumnya tersedia di pasaran (75Ω), sehingga *matching* mudah diperoleh. Medan listrik dari antenna dipol dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (20). Sedangkan direktivitas dari antenna dipol yang didapatkan melalui perhitungan pada persamaan (23) adalah 1,643.

Antena Array

Antena *array* adalah susunan antenna yang terdiri dari sejumlah elemen dipol tunggal yang selanjutnya disebut elemen *array*. Antena *array* merupakan salah satu solusi untuk meningkatkan direktivitas dan penguatan antenna tunggal yang relatif rendah (seperti yang telah disebutkan di awal bahwa memperbesar ukuran antenna dipol tunggal tidak memberi jawaban yang tepat). Gambar 7 menunjukkan konfigurasi *array* yang disusun secara paralel. Pencatutan arus (amplitudo dan selisih fasa) pada tiap elemen menentukan pola radiasi yang dihasilkan. Selain melalui pencatutan amplitudo dan fasa, jarak antar elemen (d) juga mempengaruhi pola radiasi dari sistem antenna tersebut. Medan total pada antenna *array* diperoleh dengan mengalikan medan radiasi antenna tunggal dengan faktor *array*, sehingga persamaan dapat ditulis: [1]

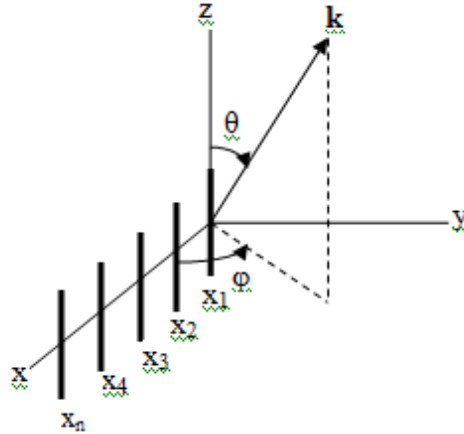
$$E(\text{total}) = [E(\text{elemen tunggal})] \times [AF(\text{faktor array})] \quad (26)$$

Array yang terdiri dari elemen-elemen dan amplitudo arus identik tanpa beda fasa pengumpanan antar elemennya disebut dengan *uniform array*. Untuk sistem ini bentuk kerapatan arus yang diumpan atau dicatu adalah sebagai berikut: [3]

$$J = \sum_{p=1} J_p = z\delta(y) \cos(kz) \sum_{p=1} I_p \delta(x - x_p) \quad (27)$$

Melalui persamaan di atas dapat diperoleh vektor pointing sebagai berikut: [3]

$$N = zI_0 \frac{2 \cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{k \sin^2 \theta} \cdot \sum_p I_p (-ikx_p \sin \theta \cos \varphi) \quad (28)$$



■ Gambar 7. Konfigurasi Array Paralel. [3]

Selanjutnya melalui persamaan vektor pointing di atas didapatkan persamaan kerapatan radiasi, yaitu: [3]

$$W = \frac{\eta}{8\pi^2 r^2} |F(\theta)A(\theta, \varphi)|^2 \quad (29)$$

dengan $F(\theta)$ adalah fungsi pada persamaan (19) dan $A(\theta, \varphi)$ adalah faktor *array*, dimana faktor ini mempengaruhi bentuk pola radiasi dari elemen tunggal. Untuk sistem *array* dengan N-elemen yang identik dengan pengumpanan sefasa, maka persamaan faktor *array* dapat dituliskan sebagai berikut: [3]

$$A(\psi) = I_0 \sum_{p=0}^{n-1} \exp(-ikpd \cos \psi) = I_0 \sum_{p=0}^{n-1} z^p \quad (30)$$

$$|A(\psi)| = \frac{\sin[(Nkd \cos \psi)/2]}{\sin[(kd \cos \psi)/2]} \quad (31)$$

dengan N adalah banyaknya elemen, $\cos \psi = \sin \theta \cos \varphi$ dan $x_p = pd$ serta $z = \exp(-ikd \cos \psi)$. Arah pola radiasi maksimum diperoleh saat $\theta = \pm \frac{\pi}{2}$ dan $\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$. Apabila sistem antena *array* tidak uniform atau dengan kata lain memiliki selisih fasa pengumpanan arus pada tiap elemennya, maka persamaan faktor *array*-nya menjadi: [3]

$$|A(\psi)| = \frac{\sin[(Nkd \cos \psi + \beta)/2]}{\sin[(kd \cos \psi + \beta)/2]} \quad (32)$$

Elemen-elemen *array* disusun di sepanjang sumbu-z, maka nilai dari $\cos \psi$ akan sama dengan $\cos \theta$, sehingga persamaan (32) dapat diubah menjadi: [1]

$$|A(\psi)| = \frac{\sin[(Nkd \cos \theta + \beta)/2]}{\sin[(kd \cos \theta + \beta)/2]} = \frac{\sin[N\gamma/2]}{\sin \gamma/2} \quad (33)$$

dimana $\gamma = kd \cos \theta + \beta$ dan nilai $A(\psi)$ akan mencapai maksimum saat $\gamma = 0$. Ketika elemen-elemen antena diletakkan pada sebuah *array*, maka tiap elemen akan bereaksi satu sama lain. Interaksi antara elemen-elemen ini disebut *mutual coupling*, dimana mempengaruhi distribusi arus dan juga impedansi masukan sebagaimana pola radiasi.

Antena *array* dibuat dengan d dan L yang sama. Nilai direktivitas antena *array* 4 elemen adalah sebagai berikut:

$$D_0 = 4N \left(\frac{d}{\lambda} \right) = 4 \times 4 \left(\frac{\lambda/2}{\lambda} \right) = 8$$

Direktivitas antena *array* berdasarkan perhitungan di atas lebih besar daripada direktivitas antena dipol tunggal. Impedansi diri dari masing-masing elemen dalam hal ini sama dengan impedansi masukan antena dipol tunggal.

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = Z_{44} = 73 + j42,5 \Omega$$

Sedangkan impedansi mutual dapat ditunjukkan sebagai berikut:

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{23} = Z_{32} = Z_{34} = Z_{43} = -11,74 - j29,88 \Omega$$

$$Z_{13} = Z_{31} = Z_{24} = Z_{42} = 4,34 + j17,58 \Omega$$

$$Z_{14} = Z_{41} = -1,80 - j12,26 \Omega$$

Melalui hubungan antara tegangan dan arus pada persamaan (1) diperoleh arus masukan pada tiap elemen dengan $V=V_1=V_2=V_3=V_4$. Hasil perhitungan arus masukan dapat dilihat pada Lampiran 3, sehingga diperoleh:

$$I_1 = I_4 = 0,0151 \angle -15,71^\circ \text{ V Ampere}$$

$$I_2 = I_3 = 0,0185 \angle -0,387^\circ \text{ V Ampere}$$

Setelah diperoleh impedansi diri, impedansi mutual dan arus masukan, maka dapat ditentukan impedansi masukan pada tiap elemen *array* dengan menggunakan persamaan (2).

$$Z_{1in} = Z_{4in} = 62,23 + j15,16 \Omega$$

$$Z_{2in} = Z_{3in} = 55,32 + j2,59 \Omega$$

Impedansi masukan antena *array*

Impedansi masukan pada antena *array* tidak hanya berupa impedansi diri masing-masing elemen *array*, tapi juga impedansi mutual yang terjadi karena adanya pengaruh mutual kopling antara elemen *array* yang satu dengan yang lain. Nilai impedansi diri pada antena *array* merupakan nilai impedansi masukan pada antena dipol (persamaan 2-23 dan 2-24). Sedangkan untuk impedansi mutual diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut: [1]

$$R_{nm} = \frac{\eta}{4\pi} [2\text{Ci}(u_0) - \text{Ci}(u_1) - \text{Ci}(u_2)] \quad (34)$$

$$X_{nm} = -\frac{\eta}{4\pi} [2\text{Si}(u_0) - \text{Si}(u_1) - \text{Si}(u_2)] \quad (35)$$

dengan:

$$u_0 = kd \quad (36)$$

$$u_1 = k(\sqrt{d_{nm}^2 + L^2} + L) \quad (37)$$

$$u_2 = k(\sqrt{d_{nm}^2 + L^2} - L) \quad (38)$$

Setelah memperoleh impedansi mutual, maka impedansi masukan *array* pada persamaan (2) dapat diperoleh.

Phased (scanning) array

Scanning array dapat dibentuk dengan mengontrol beda fasa pengumpanan arus antara elemen-elemen *array*. Hal ini merupakan prinsip dasar dari operasi *phased array*, dimana beda fasa ini dapat diatur menggunakan *phase shifter* yang juga dapat mengatur jumlah arus yang masuk. [1]

Beda fasa pengumpanan arus antar elemen tidak hanya dapat dikontrol secara elektronik tapi juga secara mekanik. Secara elektronik, *phase shifter* dibuat dengan rangkaian elektronik digital yang digunakan untuk mengatur *delay time* pengumpanan arus tiap elemen *array*. Sedangkan secara mekanik, *phase shifter* dibuat melalui beda panjang kabel yang digunakan sebagai saluran transmisi ke tiap elemen *array* yang ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$\beta = k \times \Delta L \quad (39)$$

ΔL adalah beda panjang saluran transmisi elemen satu dengan elemen sebelah. Untuk mendapatkan pola radiasi yang berbeda-beda dari N-elemen *array*, maka dapat digunakan sebuah konektor yang terdiri dari N-saluran transmisi dengan panjang yang berbeda. Konektor ini digunakan untuk menghubungkan generator (sumber) ke tiap-tiap N-elemen *array*.

Direktivitas *array*

Intensitas radiasi antena *array* meningkat dengan semakin banyak jumlah elemen *array* yang digunakan, sehingga direktivitasnya pun akan meningkat. Bentuk persamaan intensitas radiasi antena *array* adalah sebagai berikut: [1]

$$U(\theta) = |(AF)_n|^2 = \left[\frac{\sin\left(\frac{N}{2} kd \cos \theta\right)}{\frac{N}{2} kd \cos \theta} \right]^2 = \left[\frac{\sin(Z)}{Z} \right]^2 \quad (40)$$

Melalui perhitungan persamaan di atas diperoleh: [1]

$$U_0 = \frac{\pi}{Nkd} \quad (41)$$

Setelah memperoleh intensitas radiasi, maka dapat diperoleh direktivitas yang dituliskan dengan: [1]

$$D_0 = 2N \left(\frac{d}{\lambda} \right) = 2N \left(1 + \frac{L}{d} \right) \left(\frac{d}{\lambda} \right) = 4N \left(\frac{d}{\lambda} \right) \quad (42)$$

dimana L ($L = (N - 1) d$) adalah panjang keseluruhan *array*.

Saluran Transmisi

Impedansi karakteristik saluran transmisi umumnya berupa bilangan riil (50 atau 75 Ω), sedangkan impedansi karakteristik pada antena adalah bilangan kompleks. Oleh sebab itu, antena di tala hingga impedansi menjadi resistif dengan cara menghilangkan atau mengecilkan bagian reaktifnya. Jika hal ini tidak dilakukan dan antena langsung dihubungkan dengan saluran transmisi, maka akan menimbulkan gelombang berdiri (*standing wave*).

Gelombang berdiri ini terbentuk melalui peristiwa dimana pada setengah perioda awal gelombang saluran transmisi hanya menyerap energi seperlunya, dan pada setengah perioda selanjutnya energi tersebut dipantulkan kembali ke generator. Perbandingan antara gelombang yang dipantulkan dan yang diserap ini disebut dengan *Standing Wave Ratio* (SWR). Bila yang dibandingkan adalah amplitudo atau tegangan maksimum dan minimumnya, maka hal ini disebut *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR). Untuk menghindari timbulnya gelombang berdiri, maka pada antena dan saluran transmisi harus dilakukan proses penyesuaian (*matching*). Jika terjadi *match* antara antena dan saluran transmisinya, maka semua energi akan diserap dan dipancarkan dengan baik dari generator.

Beda fasa yang dipilih untuk antena *array* ini adalah 0, $\pi/10$, $\pi/4$ dan $\pi/2$. Panjang saluran transmisi yang digunakan hingga dapat menghasilkan beda fasa tersebut dihitung dengan menggunakan persamaan (39). Berikut adalah perhitungan panjang saluran transmisi untuk 4 beda fasa yang berbeda, yaitu:

a. Untuk $\beta = 0$

$$\Delta L = \frac{\beta}{k} = \frac{0}{2\pi/\lambda} = 0 \text{ (berarti sebanding } \lambda = 15 \text{ cm)}$$

Maka, $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 15 \text{ cm}$.

b. Untuk $\beta = \pi/10$

$$\Delta L = \frac{\beta}{k} = \frac{\pi/10}{2\pi/\lambda} = \frac{\lambda}{20} = \frac{15}{20} = 0,75 \text{ cm}$$

Maka, $l_1 = 15 \text{ cm}$, $l_2 = 15,75 \text{ cm}$, $l_3 = 16,5 \text{ cm}$, $l_4 = 17,25 \text{ cm}$.

c. Untuk $\beta = \pi/4$

$$\Delta L = \frac{\beta}{k} = \frac{\frac{\pi}{4}}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{\lambda}{8} = \frac{15}{8} = 1,875 \text{ cm}$$

Maka, $l_1 = 15 \text{ cm}$, $l_2 = 16,875 \text{ cm}$, $l_3 = 18,75 \text{ cm}$, $l_4 = 20,625 \text{ cm}$.

d. Untuk $\beta = \pi/2$

$$\Delta L = \frac{\beta}{k} = \frac{\frac{\pi}{2}}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{\lambda}{4} = \frac{15}{4} = 3,75 \text{ cm}$$

Maka, $l_1 = 15 \text{ cm}$, $l_2 = 18,75 \text{ cm}$, $l_3 = 22,5 \text{ cm}$, $l_4 = 26,25 \text{ cm}$.

Berdasarkan beda fasa yang telah ditentukan di atas, maka dapat dihitung nilai maksimum faktor *array* (AF).

a. AF untuk $\beta = 0$

$$\gamma = kd \cos \theta + \beta = 0$$

$$0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{\lambda}{2}\right) \cos \theta + 0 \Rightarrow \theta = 90^\circ \text{ dan } 270^\circ$$

b. AF untuk $\beta = \pi/10$

$$0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{\lambda}{2}\right) \cos \theta + \frac{\pi}{10} \Rightarrow \theta = 95.74^\circ \text{ dan } 264.26^\circ$$

c. AF untuk $\beta = \pi/4$

$$0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{\lambda}{2}\right) \cos \theta + \frac{\pi}{4} \Rightarrow \theta = 104.48^\circ \text{ dan } 255.5^\circ$$

d. AF untuk $\beta = \pi/2$

$$0 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(\frac{\lambda}{2}\right) \cos \theta + \frac{\pi}{2} \Rightarrow \theta = 120^\circ \text{ dan } 240^\circ$$

Kabel dan Konektor

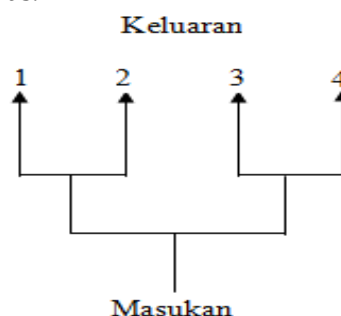
Komponen kabel koaksial yang digunakan adalah tipe RG 93 dengan impedansi intrinsik 50Ω . Tipe konektor yang kompatibel atau cocok dengan tipe kabel RG 93 untuk dihubungkan ke generator adalah konektor *British Naval Connector* (BNC). Sedangkan konektor yang dihubungkan ke tiap elemen *array* adalah konektor tipe *SubMiniature version A* (SMA). Gambar 8 di bawah adalah gambar konektor yang digunakan pada alat.



■ Gambar 8. Konektor Yang Digunakan (BNC & SMA). [1]

Modul Pembagi Arus.

Modul pembagi arus untuk masing-masing elemen adalah *splitter* atau *power divider*. *Splitter* dirancang menggunakan kabel koaksial dengan panjang $n\lambda$ dimana n adalah bilangan ganjil dari $\frac{1}{4}\lambda$ dan dalam perancangan ini digunakan nilai 3λ . Pencatu arus dengan *splitter* membuat tegangan sama besar dan arus masuk secara serempak ke tiap elemen. Berikut ini merupakan bagan dari rancangan bagian pencatu arus. Gambar 9 di bawah menunjukkan skematik modul pembagi arus.



■ Gambar 9. Skematik Modul Pembagi Arus.

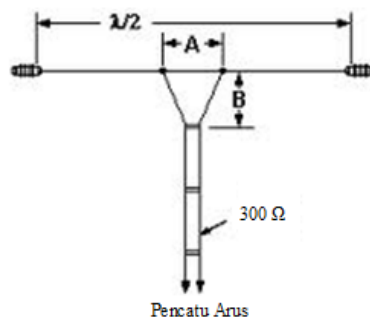
Keluaran arus (1, 2, 3, 4) dihubungkan ke elemen 1 hingga elemen 4 dengan menggunakan konektor. Sedangkan masukan dihubungkan ke sumber atau generator. Perhitungan dari rancangan panjang kabel pada *splitter* adalah sebagai berikut:

$$l = \frac{3 \times 15 \times 0,66}{4} = 7,425 \text{ cm}$$

dimana 0,66 merupakan *velocity factor* dari jenis kabel yang digunakan.

Penyesuaian Delta

Teknik penyesuaian (*match*) yang digunakan adalah delta match. Delta match umumnya dilakukan dengan menggunakan *feeder line* (*twin lead*) dengan panjang $\frac{1}{4}\lambda$ dan impedansi karakteristik 300Ω . Gambar 10 menampilkan teknik penyesuaian delta dengan 2 kabel pada ujung *feeder line* diperluas dari tengah antenna ke suatu titik pada antenna dimana impedansi antenna sama dengan impedansi pada terminal keluaran delta.

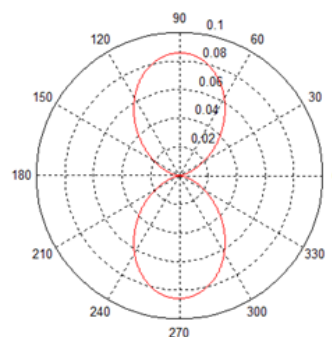


■ Gambar 10. Penyesuaian Delta.

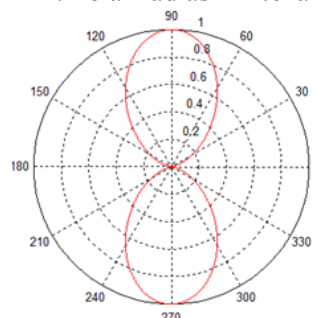
A merupakan panjang antara ke dua titik tengah pada antenna, sedangkan B merupakan panjang kawat yang menghubungkan *twin lead* dengan titik-titik pada antenna. Panjang A dan B ditentukan dengan uji coba menggunakan alat ukur MFJ Analyzer dimana pengukuran dimulai dari titik tengah antenna menuju ujung antenna, sepanjang antenna tersebut akan ditemukan titik *match* antenna. Selanjutnya, diukur panjang A dan B. Pada pengukuran dengan Analyzer diperoleh panjang A adalah 2,1 cm dan B adalah 1,2 cm.

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

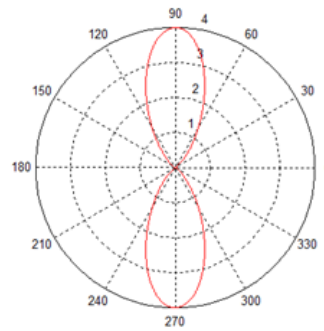
Pengujian dan analisis antenna dipol tunggal dilakukan untuk melihat bentuk pola radiasi yang dihasilkan apabila panjang antenanya berbeda-beda. Berikut ini adalah tampilan pola radiasi dengan beberapa macam panjang antenna. Gambar 11 adalah gambar pola radiasi antenna dipole $\frac{1}{4}\lambda$. Gambar 12 menunjukkan pola radiasi antenna dipole $\frac{1}{2}\lambda$. Gambar 13 menunjukkan pola radiasi antenna dipole λ . Gambar 14 menunjukkan pola radiasi antenna dipole $\frac{3}{2}\lambda$.



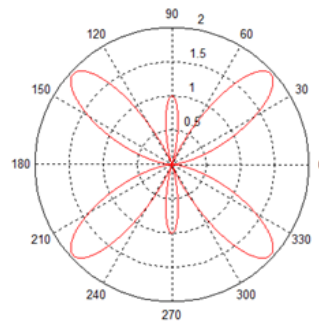
■ Gambar 11. Pola Radiasi Antena Dipol $\frac{1}{4}\lambda$.



■ Gambar 12. Pola Radiasi Antena Dipol $\frac{1}{2}\lambda$.



■ **Gambar 13.** Pola Radiasi Antena Dipol λ .



■ **Gambar 14.** Pola Radiasi Antena Dipol $3/2\lambda$.

Melalui empat tampilan pola radiasi di atas, dapat dilihat bahwa panjang antenna berpengaruh terhadap sudut dan bentuk pola radiasi. Semakin tinggi nilai panjang antenna, maka sudut radiasi mengecil dan pola radiasinya pun menyempit. Sudut radiasi (HPBW) yang kecil menunjukkan bahwa direktivitas meningkat dan pola radiasinya semakin terarah. Nilai panjang antenna yang tinggi tidak hanya dapat meningkatkan direktivitas, tapi juga mengakibatkan timbulnya *lobe-lobe* radiasi lain di mana jumlah *lobe* pada masing-masing sisi antenna tergantung dari kelipatan $\frac{1}{2}\lambda$ yang digunakan. Semakin banyak jumlah *lobe* yang terbentuk menyebabkan *lobe-lobe* yang paling dekat dengan sumbu 0° menjadi lebih besar daripada yang lain (*major lobe*). Semakin tinggi nilai panjang antenna menyebabkan *major lobe* tidak terarah ke tujuan dengan tepat dan juga *minor lobe* yang terbentuk menyatakan pancaran radiasi ke sembarang arah, sehingga pola radiasi menjadi tidak terarah dan tidak efisien lagi.

Pengujian sistem antenna *array* dilakukan di Laboratorium Telekomunikasi Teknik Elektro Universitas Tarumanagara. Pengujian antenna menggunakan alat ukur *signal generator* yang dihubungkan ke antenna *array* dan *spectrum analyzer* yang dihubungkan ke antenna mikrostrip 4 elemen sebagai penerima. Langkah-langkah pengujian antenna *array* adalah sebagai berikut:

- Atur antenna *array* dan antenna mikrostrip saling berhadapan dengan jarak ± 1 meter.
- Atur *signal generator* pada frekuensi 2 GHz dan amplitudo 1 dBm, kemudian hubungkan dengan antenna *array* dengan $\beta=0$.
- Hubungkan *spectrum analyzer* dengan antenna mikrostrip 4 elemen. Atur frekuensi pada *spectrum analyzer* menjadi 2 GHz.
- Tekan RF ON pada *signal generator* kemudian putar antenna *array* dari 0° - 360° dengan kelipatan 10° searah jarum jam.
- Tekan tombol *marker* lalu *peak search* untuk mendapatkan level titik tertinggi dari sinyal yang tampak pada *spectrum analyzer*.
- Catat nilai (ditunjuk oleh tanda panah) yang ditampilkan pada *spectrum analyzer* seperti yang tampak pada Gambar 15 untuk setiap perputaran sudut.
- Ulangi c dan d untuk antenna *array* dengan beda fasa yang lain.



■ Gambar 15. Tampilan Hasil Pada Spectrum Analyzer.

Data hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Lampiran 7. Hasil pengujian kemudian dinormalisasi dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$level = 10 \log X$$

$$X = \log^{-1} \left[\frac{level}{10} \right] = \log^{-1} \left[\frac{-67.27}{10} \right] = 1.87499 \times 10^{-7}$$

Setelah diperoleh nilai X untuk setiap sudut, kemudian semua nilai X tersebut dibagi dengan nilai X maksimum dan dinyatakan sebagai X_n . Selanjutnya dilakukan perhitungan penguatan (*gain*) daya radiasi untuk tiap sudut dengan menggunakan persamaan berikut:

$$G = 10 \log X_n$$

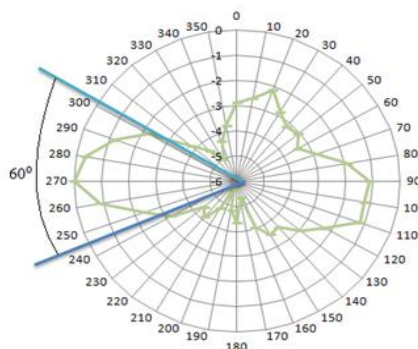
$$G = 10 \log(0.052844525) = -12.77 \text{ dB}$$

Hasil perhitungan penguatan daya radiasi untuk tiap beda fasa pengumpanan arus ditampilkan pada Tabel 1 hingga Tabel 4. Selanjutnya hasil perhitungan penguatan tersebut digambarkan dalam bentuk pola radiasi.

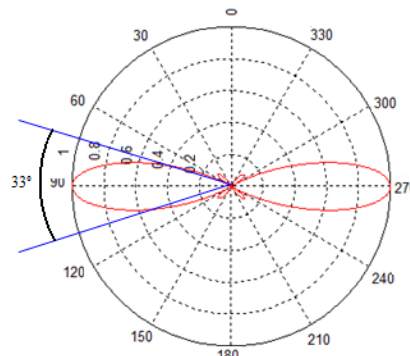
■ Tabel 1. Hasil Perhitungan Penguatan Daya Radiasi Pada $\beta=0$.

Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)	Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)	Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)	Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)
0	-2.89	90	-1.1433	180	-4.3467	270	0
10	-2.65	100	-1.2333	190	-4.84	280	-0.3533
20	-2.15	110	-1.1833	200	-5.66	290	-1.2233
30	-2.8367	120	-2.2633	210	-4.74	300	-2.2367
40	-3.18	130	-2.94	220	-4.1233	310	-3.86
50	-3.0633	140	-3.6167	230	-4.42	320	-4.4267
60	-3.42	150	-3.5433	240	-3.2	330	-5.0167
70	-2.8733	160	-4.0433	250	-2.3633	340	-4.3233
80	-1.9	170	-5.3267	260	-0.08833	350	-3.75

Pola radiasi hasil pengujian dengan $\beta=0$ pada Gambar 16 memiliki intensitas radiasi maksimum (*main lobe/lobe* radiasi) pada sudut 270° sama seperti yang tampak pada pola radiasi hasil simulasi pada Gambar 17.. Bentuk pola radiasi antara ke duanya juga tampak agak mirip, hanya saja pada sudut 0° hingga 60° dari



■ Gambar 16. Pola Radiasi Hasil Pengujian Antena Array dengan $\beta=0$.

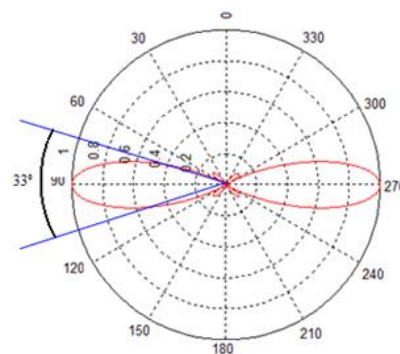


■ **Gambar 17.** Pola Radiasi Hasil Simulasi Antena Array dengan $\beta=0$.

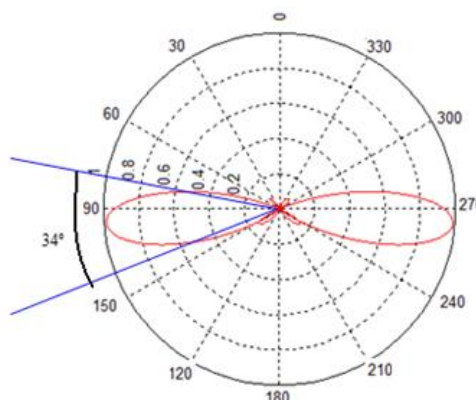
pola radiasi pengujian intensitas radiasinya masih sedikit besar atau kuat, sehingga pada bagian tersebut bentuk pola radiasinya agak meluas. Sedangkan pada hasil simulasi, pola radiasi yang dihasilkan pada sudut tersebut adalah sebuah *side lobe*. Selain itu, tampak bahwa *beamwidth* pada hasil pengujian lebih besar dari pada hasil simulasinya. Tabel 2 di bawah ini menunjukkan hasil perhitungan penguatan daya radiasi pada $\beta=\pi/10$.

■ **Tabel 2.** Hasil Perhitungan Penguatan Daya Radiasi Pada $\beta=\pi/10$.

Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)	Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)	Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)	Sudut ($^{\circ}$)	Gain (dB)
0	-7.5133	90	-1.63	180	-1.9967	270	-1.8567
10	-7.13	100	-0.27	190	-2.0467	280	-2.96
20	-6.1433	110	-1.36	200	-2.6733	290	-2.22
30	-7.9433	120	-0.74	210	-4.0967	300	-1.36
40	-7.4533	130	-0.81	220	-5.3467	310	-1.6667
50	-9.4533	140	-0.8133	230	-4.4133	320	-2.5233
60	-8.38	150	-1.01667	240	-4.3233	330	-4.07
70	-7.19	160	-1.30333	250	-1.0267	340	-8.85
80	-5.93	170	-1.44333	260	0	350	-8.58667



■ **Gambar 18.** Pola Radiasi Hasil Pengujian Antena Array Dengan $\beta= \pi/10$.

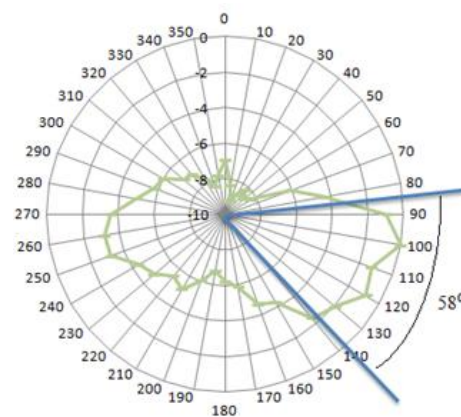


■ **Gambar 19.** Pola Radiasi Hasil Simulasi Antena Array Dengan $\beta= \pi/10$.

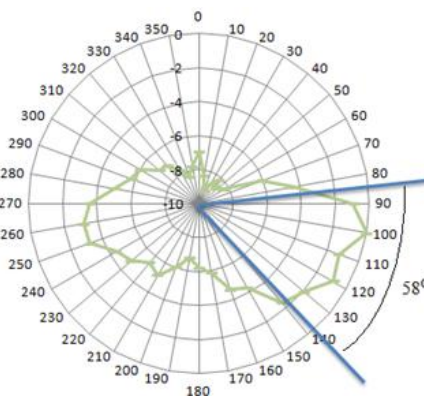
Pola radiasi yang dihasilkan dari pengujian dengan menggunakan $\beta=\pi/10$ pada Gambar 18 memiliki intensitas radiasi maksimum pada sudut 260° . Bentuk pola radiasi yang dihasilkan dari pengujian dengan hasil simulasi pada Gambar 19 tidak terlalu mirip. Tabel 5 menunjukkan sudut maksimum yang terbentuk dari hasil simulasi atau perhitungan yang dibandingkan dengan hasil pengujian. Pola radiasi yang terbentuk pada sudut 100° hingga 200° tampak agak meluas yang menandakan bahwa intensitas radiasinya cukup besar. Sedangkan pada hasil simulasi, intensitas radiasi terlihat cukup besar hanya disekitar sudut 100° dan selebihnya yang terbentuk adalah *side lobe*. Pada sudut 290° hingga 330° pada hasil pengujian juga tampak bahwa intensitas radiasinya cukup besar, di mana pada hasil simulasi di sekitar sudut tersebut yang tampak atau dihasilkan juga berupa *side lobe*. Selain dilihat dari bentuk dan letak intensitas radiasi maksimum pada pola radiasi, *beamwidth* yang dihasilkan dari hasil pengujian juga tampak sama besar dengan *beamwidth* hasil simulasi. Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan penguatan daya radiasi dengan $\beta=\pi/4$.

■ **Tabel 3.** Hasil Perhitungan Penguatan Daya Radiasi Dengan $\beta=\pi/4$.

Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)	Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)	Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)	Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)
0	-6.96	90	-0.94	180	-6.25	270	-3.6133
10	-8.3067	100	0	190	-6.7767	280	-4.9567
20	-9.1633	110	-1.2567	200	-6.0433	290	-5.79
30	-8.71	120	-0.8833	210	-5.1333	300	-6.01
40	-8.1767	130	-1.9233	220	-5.4833	310	-6.9633
50	-8.6433	140	-2.4067	230	-4.77	320	-7.09
60	-8.3267	150	-4.2867	240	-4.3567	330	-7.74
70	-6.0767	160	-4.63	250	-3.1833	340	-8.3567
80	-4.3967	170	-5.8667	260	-3.1167	350	-7.77



■ **Gambar 20.** Pola Radiasi Hasil Pengujian Antena Array Dengan $\beta=\pi/4$.



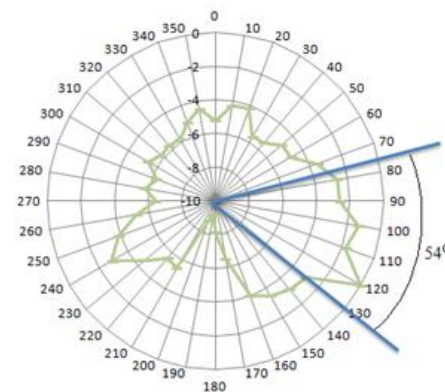
■ **Gambar 21.** Pola Radiasi Hasil Simulasi Antena Array Dengan $\beta=\pi/4$.

Pola radiasi yang terbentuk dari hasil pengujian antena array dengan $\beta=\pi/4$ pada Gambar 20 menunjukkan bahwa intensitas radiasi maksimumnya terdapat pada sudut 100° . Letak intensitas radiasi dari hasil pengujian hampir sama dengan letak intensitas radiasi dari hasil simulasi pada Gambar 21 (sudut dari intensitas

radiasi maksimumnya ditunjukkan pada Tabel 5). Pada hasil pengujian tampak bahwa pada sudut 110° hingga 160° intensitas radiasi yang dihasilkan cukup besar, di mana pada hasil simulasi pada daerah di sekitar sudut tersebut intensitas radiasi telah sangat kecil dan terbentuk sebuah *side lobe*. Bentuk pola radiasi antara hasil pengujian dan simulasi sudah hampir mirip, tetapi dari segi *beamwidth* yang terbentuk pada hasil pengujian lebih besar dari pada hasil simulasi.

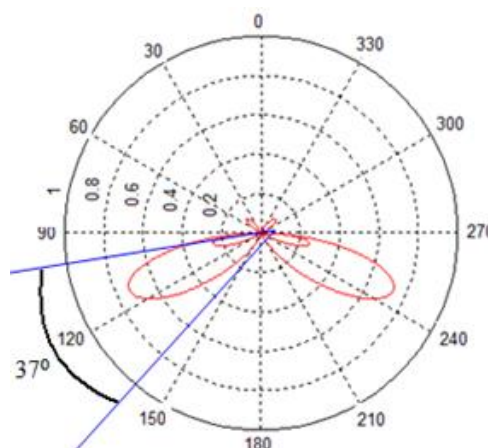
■ **Tabel 4.** Hasil Perhitungan Penguatan Daya Radiasi Dengan $\beta=\pi/2$.

Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)	Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)	Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)	Sudut ($^\circ$)	Gain (dB)
0	-5.2333	90	-2.6	180	-8.1033	270	-6.4333
10	-3.9233	100	-1.6767	190	-9.1567	280	-6.3833
20	-3.8167	110	-2.1167	200	-8.7967	290	-6.2733
30	-5.6167	120	0	210	-5.41	300	-5.35
40	-6.17	130	-2.9567	220	-5.56	310	-5.8033
50	-4.4933	140	-3.14	230	-4.49	320	-5.7067
60	-4.81	150	-3.4767	240	-2.8833	330	-5.7733
70	-3.5333	160	-4.0233	250	-3.8767	340	-5.0833
80	-2.66	170	-6.5067	260	-6	350	-4.4733



■ **Gambar 22.** Pola Radiasi Hasil Pengujian Antena Array Dengan $\beta=\pi/2$.

Pola radiasi pengujian antena dengan $\beta=\pi/2$ pada Gambar 22 di atas menunjukkan bahwa *lobe* radiasi untuk intensitas maksimum terletak pada sudut 120° dan hampir sama dengan sudut radiasi maksimum dari hasil simulasi pada Gambar 23. Namun, pada hasil pengujian terlihat bahwa mulai dari 290° - 350° dan 0° - 110° intensitas radiasi yang dihasilkan cukup besar. Secara ideal atau teoritis dari perhitungan, seharusnya pada sudut tersebut intensitas radiasi yang di hasilkan adalah kecil atau dapat dikatakan hanya terbentuk *side lobe* pada kisaran sudut tersebut. Hal ini menimbulkan suatu perbedaan yang cukup terlihat jelas dengan pola radiasi dari hasil pengujian meskipun letak intensitas radiasi maksimumnya sama. Sedangkan dari hasil pengukuran *beamwidth* yang dibentuk, diperoleh *beamwidth* hasil pengujian lebih besar dari *beamwidth* yang dibentuk dari hasil simulasi.



■ **Gambar 23.** Pola Radiasi Hasil Simulasi Antena Array Dengan $\beta=\pi/2$.

■ **Tabel 5.** Sudut Maksimum Pada Pengujian dan Perhitungan.

β	Perhitungan	Pengujian
0	$90^0/270^0$	$90^0/270^0$
$\pi/10$	$95.74^0/264.26^0$	$100^0/260^0$
$\pi/4$	$104.48^0/255.52^0$	$100^0/260^0$
$\pi/2$	$120^0/240^0$	$120^0/240^0$

Berdasarkan Tabel 5 di atas dapat dilihat bahwa adanya pergeseran fasa antara beda fasa pengumpanan arus yang satu dengan berikutnya. Besarnya pergeseran tersebut ditampilkan pada Tabel 6 di bawah ini.

■ **Tabel 6.** Pergeseran Beda Fasa

$\Delta\beta$	Perhitungan	Pengujian
$0 - \pi/10$	$+5.74^0/-5.74^0$	$+10^0/-10^0$
$\pi/10 - \pi/4$	$+8.74^0/-8.74^0$	$0^0/0^0$
$\pi/4 - \pi/2$	$+15.52^0/-15.52^0$	$+20^0/-20^0$

Adanya pergeseran beda fasa menyatakan bahwa terjadinya variasi arah *lobe* radiasi utama akibat β yang berbeda. Pergeseran tersebut timbul dari faktor *array* yang dalam hal ini merupakan suatu variabel, karena panjang antena dan jarak antar elemen *array* yang dapat menyebabkan adanya variasi tersebut bersifat tetap. Melalui pola radiasi yang dibentuk telah ditentukan lebar sudut berkas pancaran (*beamwidth*/HPBW) dan ditampilkan pada Tabel 7. Semakin sempit sudut berkas pancaran yang terbentuk menyatakan semakin tinggi penguatan dan direktivitas daya radiasinya.

Perbedaan hasil antara perhitungan dan simulasi terhadap pengujian dapat disebabkan karena pemotongan elemen antena *array* dan kabel saluran transmisi yang tidak tepat atau juga jarak penempatan antara elemen yang kurang tepat. Selain itu, perbedaan ini dapat juga disebabkan atau dipengaruhi oleh faktor lingkungan ruang pengujian seperti gangguan dari peralatan elektronik disekitar daerah pengujian, pantulan dari benda-benda disekitar lingkungan pengujian (dalam hal ini adalah pantulan dari kaca dekat tempat Penulis melakukan pengujian), jarak pengukuran antena dan kondisi antena penerima yang memiliki ukuran fisik yang cukup besar dari pada antena yang dibuat.

■ **Tabel 7.** Lebar Sudut Berkas Pancaran (*Beamwidth*).

β	HPBW
0	60^0
$\pi/10$	34^0
$\pi/4$	58^0
$\pi/2$	37^0

Pengujian penguatan antena *array* dilakukan dengan menggunakan antena mikrostrip 4 elemen sebagai antena pemancar dengan frekuensi operasi yang di atur adalah 2 GHz dan kemudian dihubungkan dengan *signal generator*. Antena dipol dengan frekuensi 2 GHz digunakan sebagai antena referensi yang dihubungkan dengan *spectrum analyzer*. Hasil daya maksimum yang diterima antena referensi pada pengujian (W_r) adalah -57.08 dBm ($1,958844674 \times 10^{-6}$), sedangkan pada antena *array* (W_a) adalah -53.69 dBm ($4,275628862 \times 10^{-6}$), sehingga penguatan antena *array* adalah 3,39 dBd ($10 \log \frac{W_a}{W_r}$). Penguatan antena *array* tersebut terbukti lebih besar dari pada penguatan antena dipol tunggal.

KESIMPULAN

Penambahan ukuran panjang antena dipol meyebabkan timbulnya *lobe* radiasi lain dalam arah pancaran yang sembarang (tidak efisien). Variasi arah *lobe* radiasi maksimum (*main lobe*) pada pola radiasi dibentuk melalui penggunaan 4 beda fasa pengumpanan arus yang berbeda. Penguatan antena *array* adalah 3,39 dBd dan terbukti lebih besar dari pada penguatan antena dipol. Direktivitas antena *array* berdasarkan perhitungan adalah 8 dan berdasarkan pengujian -53,69 dBm. Antena dipol memiliki direktivitas 1,643 berdasarkan perhitungan dan -58,68 dBm untuk pengujian. Hasil ini membuktikan bahwa direktivitas antena *array* lebih tinggi dari pada antena dipol tunggal.

Faktor lingkungan sekitar dan bentuk atau kondisi dari antena penerima sangat mempengaruhi hasil pola radiasi yang terbentuk pada saat pengujian antena. Hasil pengujian secara umum telah memenuhi spesifikasi rancangan dan mencapai tujuan dari rancangan.

DAFTAR ACUAN

- [1] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 2nd ed. New York: John Wiley, 1997.
- [2] R. Nicoletti, Appl.Note 4632. February 2010. <http://www.maxim-ic.com/app-notes/index.mvp/id/4632>
- [3] M. O. Tjia, *Diktat Kuliah Teori Elektrodinamika Klasik*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- [4] R. Rodrigo, *Fundamental Parameters of Antennas*. 2010.
- [5] M. Darsono, *Antenna Array Literature*. Depok: Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2007.
- [6] Yi Huang and K. Boyle, *Antennas: From Theory To Practice*. United Kingdom: John Wiley, 2008.