

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 KAJIAN PUSTAKA

Penelitian oleh Nurlaila Safitri, Rina Pudji Astuti dan Bambang Setia Nugroho (2018) dengan judul “ *Switch-Beam Vivaldi Array Based On 4x4 Butler Matrix for mmWave* ”. Penelitian ini membahas tentang desain antenna *Vivaldi array* 4x4 dengan menggunakan *butler matrix* pada frekuensi 28 GHz mmWave untuk 5G. Parameter yang diukur dalam penelitian ini adalah *return loss*, *bandwidth*, *gain*, pola radiasi, dan perbedaan *phasa*. Bahan yang digunakan adalah Rogers RT5880 dengan permitivitas 2,2 dan ketebalan 0,254 mm. Hasil simulasi pada 28 GHz menunjukkan *return loss* -10 dB, *gain* antenna 10.2 dB dengan pola radiasi *unidirectional*, antenna bandwidth 6 GHz yang mencakup dari 25 GHz hingga 31 GHz, dan perbedaan phasa rata-rata dari hasil *butler matrix* antara *output port* adalah $-44,106^\circ$, 137.38° , -137.66° , 43.95° dengan *phase error* yaitu $0,894^\circ$, $2,38^\circ$, $2,66^\circ$, $1,06^\circ$. Kesimpulan dari penelitian ini adalah antenna vivaldi array dengan menggunakan butler matrix telah mampu menggeser pola radiasi pada *input port* secara berturut-turut dengan *range* pancaran yang dapat dicapai sebesar 185° namun penelitian ini memerlukan fabrikasi untuk validasi metode yang digunakan [8].

Penelitian oleh Rafael D. Cerna dan Manuel A. Yarleque (2018) dengan judul “ *A 3D Compact Wideband 16x16 Butler Matrix for 4G/3G Applications* ”. Penelitian ini mengenai desain dan implementasi *butler matrix* 16x16 *wideband* untuk jaringan 4G pada frekuensi 1,7 GHz dan 3G pada frekuensi 1,9 GHz. Bahan yang digunakan adalah FR4 *substrate* dengan permitivitas 4,70 dan ketebalan 1,66 mm. Adapun parameter yang diukur dalam penelitian ini adalah *insertion loss*, *return loss*, dan perbedaan *phasa*. Hasil simulasi pada frekuensi 1,69 GHz sampai 2,16 GHz menunjukkan *insertion loss* -14,5 dB, *return loss* -15 dB, dan perbedaan *phasa* antara *output port* adalah $-11,25^\circ \pm 11^\circ$ sedangkan hasil fabrikasi pengukuran pada frekuensi 1,65 GHz sampai 2,17 GHz menunjukkan *insertion loss* -16,5 dB, *return loss* lebih dari -15 dB, dan perbedaan *phasa* antara *output port* adalah $-11,25^\circ \pm 15^\circ$. Kesimpulan dari penelitian ini adalah hasil simulasi dan realiasi adalah

serupa. *Insertion loss* perbedaan *phasa* menunjukkan perilaku yang seragam dan konstan selama rentang operasi yang dioptimalkan namun perlu perbaikan lebih lanjut agar perbedaan *phasa* nya dicapai yakni dengan mengubah *substrate* dengan yang memiliki permitivitas dan ketebalan yang lebih kecil [9].

Penelitian oleh Intan Izafina Idrus dkk (2019) dengan judul “ *A Low-loss and Compact Single-layer Butler Matrix for a 5G Base Station Antenna* ”. Penelitian ini membahas tentang *low-loss* dengan *single-layer 8x8 butler matrix* untuk *5G base station* pada frekuensi 28 GHz. Parameter yang diukur pada penelitian ini adalah *return loss*, *isolation*, *amplitude*, dan *output phase*. Bahan yang digunakan adalah NPC-F220A yang memiliki permitivitas 2,2, $\tan \delta$ 0,0007 dan ketebalan 0,254 mm. Hasil simulasi dan fabrikasi pada frekuensi 28 GHz pada masing-masing *input* dan *output port* setelah dilakukan optimisasi ukuran *circuit butler matrix* diperoleh *return loss* ≤ -10 dB, *isolation* ≤ -15 dB, dan pada masing-masing *output port* diperoleh *amplitude* ≤ -10 dB, dan *output phase* ± 2 dB dan $\pm 10^\circ$. Kesimpulan dari penelitian ini adalah ukuran *butler matrix 8x8* setelah dilakukan optimasi didapatkan $88 \times 110 \times 0,254$ mm. Desain *butler matrix 8x8* terdiri dari 16 *crossover*, 12 *quadrature hybrids*, dan 8 *phase shifters*. Fabrikasi dari *butler matrix* ini menggunakan NPC-F220A dimana jenis bahan ini memiliki nilai *dielectric* rendah [10].

Penelitian oleh Fajar Wahyu Ardianto, Nachwan Mufti A, dan Budi Syihabuddin (2018) berjudul “Analisis Simulasi Antena MIMO 4x4 Susunan Persegi dan Sirkular pada Frekuensi 15 GHz”. Pada penelitian membahas penggunaan antena yang memiliki dua bentuk yakni *patch* persegi dan sirkular yang di aplikasikan pada frekuensi 15 GHz dan disusun secara array 1x2 serta penambahan metode *slotted patch* berbentuk huruf T untuk meningkatkan *bandwidth* dan disusun membentuk MIMO empat elemen untuk mengurangi *scattering* gelombang. Spesifikasi antena yang ingin dicapai yaitu *return loss* ≤ -12 dB, *gain* ≥ 9 dB, polarisasi linear, polaradiasi *unidirectional*, dan *mutual coupling* ≤ -20 dB. Hasil simulasi pada antena *patch* persegi dengan menggunakan *slotted* maupun *non slotted*, memiliki nilai *return loss* masing-masing -23,91 dan -31,28 dB. Untuk nilai *mutual* yaitu -24,75 dan -23,19, nilai *bandwidth* yang didapat yaitu 2,3 GHz dan 1,95 GHz, nilai *gain* yang dihasilkan masing-masing 10,39 dB dan

10,30 dB. Sedangkan hasil simulasi pada antenna *patch* sirkular dengan menggunakan *slotted* maupun *non slotted*, nilai *return loss* masing-masing -19,19 dB dan 19,53 dB, nilai *bandwidth* yang dihasilkan yaitu 2,8 GHz dan 2,7 GHz, nilai *gain* yaitu 10,07 dB dan 9,95 dB. Kesimpulan dari penelitian ini adalah *patch* sirkular memiliki *bandwidth* yang lebih bagus yakni 2,9 GHz sedangkan *patch* persegi memiliki *gain* yang lebih baik pula jika dibandingkan dengan *patch* sirkular dan untuk polarisasi kedua bentuk antenna tersebut berpolarisasi unidirectional [7].

Penelitian Nurina Leila Yusup (2021) berjudul “ Perancangan Antena Mikrostrip Rectangular Array untuk Teknologi 5G Pada Frekuensi 28 GHz ”. Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah *return loss*, VSWR, *bandwidth*, *gain*, koefisien korelasi, *mutual coupling*, dan beda *phasa*. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah Rogers RT / Duroid 5880 dengan permivitas 2,2 dan ketebalan 0,254 mm. Hasil simulasi diperoleh dengan 2 skenario yakni tanpa penambahan *butler matrix* dan dengan *butler matrix*. Untuk hasil simulasi tanpa *butler matrix* untuk masing-masing antenna diperoleh *return loss* ≤ -10 dB, *mutual coupling* ≤ -20 dB, koefisien korelasi $\leq 0,3$, VSWR ≤ 2 , *gain* ≤ 9 dBi, dan *bandwidth* $\geq 0,690$ GHz. Untuk hasil simulasi dengan menggunakan *butler matrix* untuk masing-masing antenna diperoleh *return loss* ≤ -10 dB pada antenna 1 & 4 dan ≥ -10 dB pada antenna 2 & 3, *mutual coupling* ≥ -20 dB, koefisien korelasi $\leq 0,3$, VSWR ≤ 2 pada antenna 1 & 4 dan ≥ 2 pada antenna 2 & 3, *gain* ≤ 9 dBi, *bandwidth* $\geq 1,7$ GHz pada antenna 2 & 3 dan $\geq 0,8$ GHz pada antenna 1 & 4, dan beda *phasa* $\pm 3,5^\circ$ pada port 1 & port 4 dan $\pm 11,88^\circ$ pada port 2 & port 3 . Kesimpulan dari penelitian ini adalah penambahan *butler matrix* pada antenna MIMO belum maksimal pada beda *phasa* nya namun penambahan *butler matrix* juga mampu meningkatkan parameter yang lainnya.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Teknologi 5G

Teknologi 5G di desain untuk dapat mendukung tiga layanan utama yakni *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Ultra-Reliable Low Latency Communications* (URLLC), dan *massive Machine Type Communications* (mMTC). Teknologi 5G membawa dua penerapan yakni *Stand-Alone* (SA) dan *Non-Stand Alone* (NSA). Pada *Stand-Alone* (SA), jaringan 5G menggunakan *full core network*

5G dimana konfigurasi ini memerlukan pergantian jaringan yang sudah ada sedangkan *Non-Stand Alone* (NSA), jaringan 5G menggunakan *core network* 4G yang sudah ada sebagai *service* sehingga jaringan 5G tersedia tanpa harus mengganti jaringan yang sudah ada. *Non-Stand Alone* (NSA) juga disebut *E-UTRAN New Radio – Dual Connectivity* (EN-DC). Teknologi dari *E-UTRAN New Radio – Dual Connectivity* (EN-DC) sebagai solusi untuk penyebaran jaringan 5G secara penuh dimana jaringan 5G terhubung dengan *core network* 4G. Konsep ini memanfaatkan dua teknologi akses radio yang berbeda (RATs) yaitu 4G dan 5G yang beroperasi pada dua frekuensi yang berbeda [12]. Dari segi bisnis, jaringan 5G baik *Stand-Alone* (SA) maupun *Non-Stand Alone* (NSA) harus mampu menawarkan kapasitas yang lebih luas dan fleksibel [13]. Metode sederhana yang digunakan adalah penggunaan frekuensi pada sub-6 GHz (di bawah 6 GHz) dan penggunaan MIMO [14].

MIMO dapat meningkatkan kapasitas sel tanpa memodifikasi bentuk gelombang, skema *multiple access*, dan yang lainnya dengan mentransmisikan data secara paralel. *Multi user* MIMO (MU-MIMO) bergerak kompleksitas dari UE (*User Equipment*) ke *base station* dengan menggunakan matrik *pra-coding* sehingga setiap aliran data yang masing-masing diterima oleh penerima. Untuk mengirimkan tingkat daya yang berbeda untuk pengguna yang berbeda dalam skema MU-MIMO diperlukan adanya *beamforming*. Selain memfasilitasi MU-MIMO untuk meningkatkan kapasitas sel, *beamforming* dapat mengurangi konsumsi energi secara signifikan dengan target individual UE. Pada *base station* tanpa *beamforming*, energi yang diterima oleh UE akan diserap oleh lingkungan dan dapat menciptakan gangguan pada UE yang saling berdekatan [13].

2.2.2 Beamforming

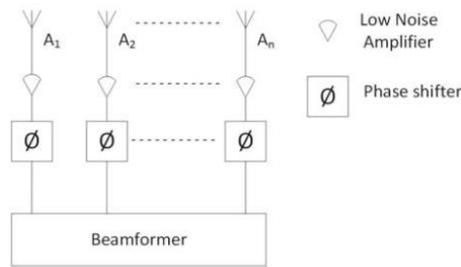
Beamforming merupakan proses menggabungkan sinyal dari elemen *array* untuk membentuk sinar radiasi (*beam radiation*) yang terarah. Selain itu, *beamforming* juga digunakan untuk menyelaraskan fasa sinyal yang masuk dari berbagai bagian *array* untuk membentuk *beam* dalam arah tertentu. Hal tersebut dapat dicapai dengan menerapkan *time delay* pada tiap elemen [5]. Dengan *beamforming*, arah transmisi sinyal atau penerimaan antena *array* dapat dikontrol

untuk menghasilkan pola radiasi dengan menambahkan fasa sinyal untuk arah yang diinginkan dan fasa pola *nulling* untuk arah yang tidak diinginkan, dimana optimasi sinyal yang diterima dilakukan dengan penyesuaian fasa dan amplitude [15].

Ada tiga jenis arsitektur *beamforming* yang digunakan pada antenna *array*, yaitu *analog beamforming* (ABF), *digital beamforming* (DBF), dan *Hybrid beamforming* (HBD) [16].

1. *Analog Beamforming* (ABF)

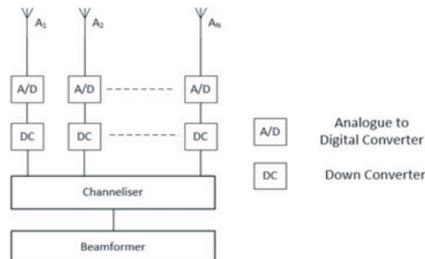
Untuk membentuk *beams* dengan menggunakan *attenuator* dan pemindah fasa (*phase shifter*) sebagai bagian dari rangkaian RF analog dimana satu aliran data dibagi menjadi beberapa jalur terpisah. Keuntungan dari metode ini yaitu hanya membutuhkan satu rangkaian RF, sedangkan kerugiannya *phase shifter* membutuhkan daya yang besar [16].



Gambar 2. 1 Analog Beamforming [6]

2. *Digital Beamforming* (DBF)

Dalam proses *beamforming digital*, penggunaan beberapa antenna pada sisi pengirim untuk membentuk pola radiasi total akan memaksimalkan *gain* dari antenna kearah terminal seluler [15]. Pada metode ini rangkaian rantai RF terpisah pada setiap elemen antenna. Dalam Praktiknya untuk frekuensi dibawah 6 GHz, metode ini lebih disukai karena relatif murah serta dapat menggabungkan MIMO dan *beamforming* dalam satu *array*. Sedangkan untuk frekuensi diatas 28 GHz, metode ini membutuhkan biaya tinggi [16].



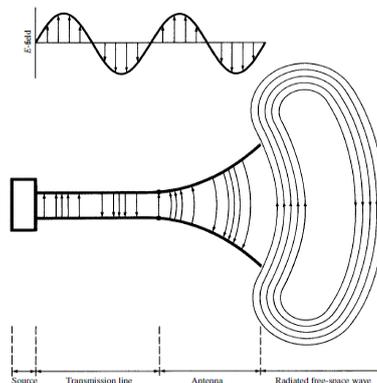
Gambar 2. 2 Digital Beamforming [6]

3. Hybrid Beamforming (HBF)

Hybrid beamforming menggabungkan antara *analog beamforming* dengan *digital beamforming* sebagai fleksibilitas MIMO sekaligus ditambah *beamforming* untuk mengurangi biaya dan kerugian yang disebabkan *beamforming unit* (BFU). Setiap aliran data memiliki BFU *analog* sendiri terpisah antenna M. Jika ada N data *stream*, maka ada antenna NxM. Hilangnya BFU *analog* karena *phase shifter* dapat diatasi dengan selektif *beamformer* seperti *Butler Matrix* [13].

2.2.3 Antena

Definisi antena oleh Webster's dictionary yaitu perangkat yang terbuat dari logam (sebagai batang atau kabel) untuk memancarkan atau menerima gelombang radio. Sedangkan menurut IEEE (IEEE Std 145-1983), mendefinisikan bahwa antena sebagai alat untuk memancarkan atau menerima gelombang radio. Dengan kata lain antena merupakan transisi struktur antara ruang bebas (*free-space*) dengan perangkat pemandu (*guiding device*), seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. Perangkat pemandu (*guiding device*) atau saluran transmisi dapat berbentuk garis *coaxial* (*coaxial line*) atau *waveguide*, dan digunakan untuk menghantarkan energi elektromagnetik dari transmisi sumber ke antena atau dari antena ke penerima [16].

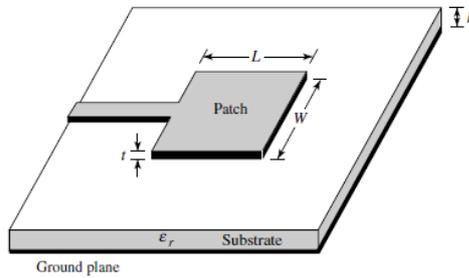


Gambar 2. 3 Antena Sebagai Perangkat Transmisi [16]

2.2.4 Antena Mikrostrip

Antena mikrostrip populer pada tahun 1970-an, terutama untuk aplikasi ruang angkasa. Namun sekarang antena mikrostrip digunakan untuk aplikasi pemerintah dan komersil. Antena ini terdiri dari *patch* yang sangat tipis dan

ditempatkan setengah dari panjang gelombang di atas *ground plane*. Antar *patch* dan *ground plane* dipisahkan oleh lembar dielektrik (disebut sebagai *substrat*) [16].



Gambar 2. 4 Struktur Antena Mikrostrip [19]

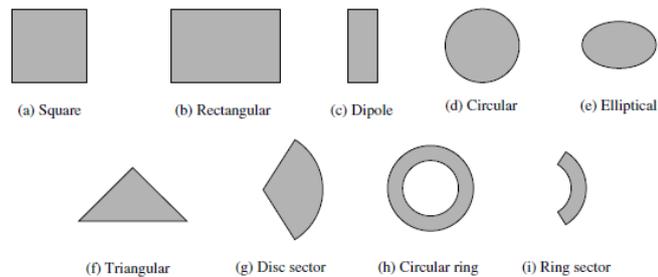
Berikut ini merupakan struktur dari antena mikrostrip :

a. Substrat

Substrat dielektrik antena mikrostrip memiliki ketebalan h dan permitivitas relative ϵ_r . Terdapat berbagai pilihan *substrat* yang dapat digunakan untuk desain antena mikrostrip. Untuk mendapatkan performansi kinerja antena yang lebih baik dibutuhkan *substrat* yang tebal dengan nilai konstanta dielektrik dibawah nilai kisaran karena dapat memberikan efisiensi yang baik dan *bandwith* yang lebar, dengan ukuran elemen yang besar. Sedangkan *substrat* yang tipis dengan nilai konstanta dielektrik tinggi dibutuhkan untuk jaringan *microwave*, karena ukuran elemen yang kecil dan dapat meminimalisir radiasi yang tidak diinginkan. Akan tetapi *substrat* yang tipis dapat memperkecil *bandwith* dan tidak efisien [16].

b. Patch

Berbagai macam bentuk *patch* sebagai pemancar ditunjukkan pada gambar 2.4 yaitu persegi, persegi panjang, *dipole*, melingkar, *elips*, dan segitiga. *Patch* dengan bentuk persegi, persegi panjang, *dipole*, dan melingkar paling banyak digunakan karena mudah dalam fabrikasi [12].



Gambar 2. 5 Bentuk Elemen Antena Mikrostrip [16]

c. *Ground plane*

Bagian bawah substrat dilapisi dengan metal secara keseluruhan, yang disebut sebagai *ground structure* atau *ground plane* [17]. *Ground plane* berfungsi sebagai sebagai *reflector* untuk memantulkan sinyal yang tidak diinginkan.

Beberapa keuntungan dari antena mikrostrip adalah memiliki penampang yang tipis, ukurannya kecil dan ringan, mudah dalam pabrikan, dapat diintegrasikan dengan *microwave* sirkuit terpadu (MICs), dan dapat digunakan untuk *dual* maupun *tripel* frekuensi. Selain keuntungan antena mikrostrip juga memiliki beberapa kelemahan diantaranya *gain* dan efisiensi yang rendah, *bandwidth* sempit, perlu ketelitian dalam melakukan perancangan, menimbulkan rugi-rugi daya yang besar akibat polarisasi silang (*cross polarization*), dan dalam menyusun *feed* sangat kompleks agar dapat diintegrasikan secara langsung [11].

2.2.5 Antena Mikrostrip *Rectangular Patch*

Terdapat beberapa bentuk antena mikrostrip yang umum digunakan yaitu persegi, persegi panjang, lingkaran dan elips. Salah satu bentuk *patch* yang paling banyak digunakan adalah segiempat (*rectangular patch*). Bentuk ini memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan bentuk *patch* yang lainnya, salah satunya adalah mudah dalam pembuatannya dan bentuknya lebih sederhana, selain itu prosesnya lebih mudah dan dapat disimulasikan dengan bantuan *software* [18]. Antena *microstrip* dengan *patch* persegi panjang terdiri dari lebar (W) dan panjang (L) pada sisi dielektrik substrat dengan ketebalan (h) dan konstanta dielektrik (ϵ_r) [11]. Panjang antena mikrostrip harus disesuaikan, karena jika terlalu pendek maka *bandwidth* yang dihasilkan sempit, dan jika terlalu panjang maka *bandwidth* akan menjadi lebar tetapi efisiensi radiasi menjadi kecil. Dengan mengatur lebar dari antena mikrostrip (W) impedansi *input* juga akan berubah [18].

Berikut merupakan rumus perhitungan yang digunakan untuk mencari lebar *patch* (W) antena mikrostrip *patch* segiempat dengan menggunakan persamaan 2.1 [19].

$$W = \frac{c}{2f} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (2.1)$$

Dimana ϵ_r adalah konstanta dielektrik, c adalah kecepatan cahaya pada ruang hampa (3×10^8 m/s), dan f adalah frekuensi resonansi atau frekuensi kerja pada antenna yang digunakan (Hz). Untuk menentukan panjang *patch* (L) diperlukan parameter ΔL yang merupakan pertambahan panjang dari L akibat adanya *fringing effect* yaitu efek pada elemen peradiasi antenna mikrostrip terlihat lebih besar dari dimensi fisiknya. Panjang *patch* (L) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2 sampai 2.5 [19].

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

$$\Delta L = 0,412h \left(\frac{\epsilon_{reff} + 0,3}{\epsilon_{reff} - 0,258} \right) \left(\frac{\frac{W}{h} + 0,264}{\frac{W}{h} - 0,8} \right) \quad (2.3)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.4)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2.5)$$

Dimana h merupakan tebal dari substrat, ϵ_{reff} merupakan konstanta dielektrik *relative*, dan L_{eff} merupakan lebar *patch* efektif [20]. Untuk mendapatkan dimensi panjang *ground plane* (L_g) dan lebar *ground plane* (W_g) digunakan persamaan 2.6 dan 2.7 [11].

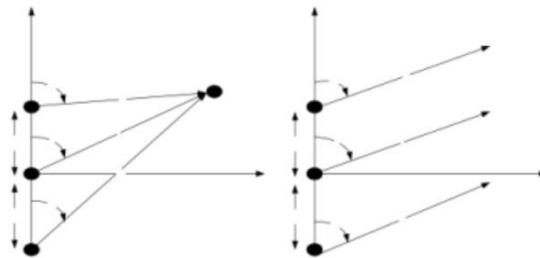
$$L_g = L + 6h \quad (2.6)$$

$$W_g = W + 6h \quad (2.7)$$

2.2.6 Antena Array

Banyak aplikasi yang memerlukan karakteristik radiasi yang mungkin tidak dapat dicapai oleh elemen tunggal. Namun dimungkinkan elemen-elemen yang diatur sedemikian rupa sehingga menghasilkan karakteristik radiasi yang diinginkan. Susunan elemen antenna secara *array* dapat menambah radiasi maksimum pada arah tertentu [11]. Antena *array* terdiri dari susunan beberapa antenna yang identik. Sinyal dari antenna tersebut digabung atau di proses guna meningkatkan performansi dari suatu antenna. Tujuan dari pembuatan antenna secara *array* yaitu untuk meningkatkan *gain* antenna, meningkatkan *directivity* antenna, mengarahkan daya pancar menuju sektor yang diinginkan, menentukan arah kedatangan sinyal, dan memaksimalkan nilai SNR (*Signal to Interference Plus Noise Ratio*). Pada

umumnya antenna dengan elemen tunggal memiliki pola radiasi yang lebar, selain itu antenna elemen tunggal juga menghasilkan keterarahan (*directivity*) dan *gain* yang rendah. Pada antenna 5G diperlukan antenna yang memiliki keterarahan (*directivity*) yang baik dan perolehan *gain* yang tinggi. Kebutuhan karakteristik tersebut dapat dapat dipenuhi dengan Menyusun antenna secara *array*. Jumlah elemen, *amplitude relative*, dan fasa *relative* dari antenna yang disusun secara *array* bergantung pada pola sudut yang harus dicapai. Jika suatu antenna dengan susunan *array* dirancang untuk lebih fokus pada pada arah tertentu, maka untuk mengarahkan antenna tersebut kearah yang lain yaitu dengan mengubah fasa *relative* dari elemen *array* tersebut, proses ini disebut *steering* atau *scanning* [18]. Pada perancangan antenna dengan menggunakan susunan secara *array* menggunakan bentuk *T-junction*. *T-junction* merupakan sebuah teknik *power divider* yang umum digunakan pada antenna dengan susunan *array*, dimana *power divider* tersebut adalah salah satu teknik yang dapat mendukung *impedance matching* pada saluran transmisi khususnya pada antenna mikrostrip dengan susunan *array* [21].



Gambar 2. 6 Geometri 2 Elemen Array [11]

Salah satu persamaan rumus yang dapat digunakan pada perancangan antenna mikrostrip yang disusun secara *array* yaitu *array factor*. *Array factor* merupakan medan total dari antenna *array* sama dengan medan dari elemen tunggal yang dikalikan dengan faktor. Untuk menghitung *array factor* digunakan rumus seperti pada persamaan 2.8 [11].

$$AF = 2 \cos [1/2(kd \cos\theta + \beta)] \quad (2. 8)$$

Keterangan :

AF: Nilai *array factor*

d : Jarak antar elemen antenna = $\lambda/2$

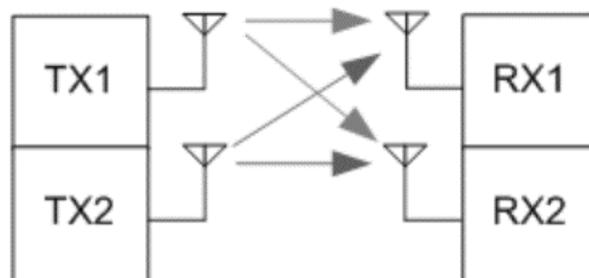
β : Perbedaan nilai eksistensi fasa antar elemen

k : Wavenumber = $2\pi/\lambda$

θ : Polar angle

2.2.7 MIMO (*Multiple Input Multiple Output*)

MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) merupakan salah satu kunci teknologi nirkabel. Teknologi MIMO diusulkan dalam IEEE 802.16e, 802.16n, dan 802.20 untuk sistem akses *broadband* nirkabel. Teknologi MIMO dapat memanfaatkan sumber daya ruangan secara penuh dan beberapa antena untuk meningkatkan kapasitas beberapa kali tanpa perlu meningkatkan spektrum sumber daya atau daya pancar antena [17]. Pada sistem MIMO, pemancar atau penerima membutuhkan dua atau lebih elemen antena. Akan tetapi menggunakan banyak antena dapat memunculkan kelemahan dalam meningkatkan ukuran sistem dan memperburuk isolasi, sehingga menyebabkan pola radiasi yang menyimpang dan mengurangi kapasitas saluran. Antena MIMO yang dirancang harus menghasilkan parameter yang baik untuk masa depan, salah satu parameter yang penting adalah *gain* [17].



Gambar 2. 7 Antena MIMO [22]

Penggunaan antena MIMO memiliki peranan penting dalam teknologi 5G, karena antena yang dihasilkan memiliki dimensi yang kecil. Redaman lintasan antara pengirim dan penerima tidak berubah sebagai fungsi dari frekuensi, asal dimensi dari pengirim dan penerima juga tidak berubah. Pengembangan antena MIMO untuk teknologi 5G, dilakukan pada perubahan arah *beam* antena yang dapat berubah sesuai kondisi lingkungannya, seperti pergerakan *user*, peningkatan jangkauan, serta peningkatan laju data kirim [20].

Dalam mendesain antena MIMO terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan :

a. *Mutual Coupling*

Efek dari *mutual coupling* terjadi karena munculnya tegangan pada salah satu elemen antenna yang diakibatkan letak elemen yang terlalu dekat sehingga dapat mempengaruhi kinerja antenna. Jarak antar elemen antenna dapat diminimalkan dengan cara mengurangi ukuran antenna, dengan syarat tetap memenuhi kondisi *mutual coupling* yaitu kurang dari -20 dB [7]

b. Koefisien korelasi

Salah satu karakterisasi dari antenna MIMO yaitu koefisien korelasi yang merupakan parameter penting untuk mengukur interferensi sinyal antar saluran. Koefisien korelasi antenna MIMO dinyatakan dalam pendekatan parameter S dengan nilai kurang dari 0,3. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut [22] :

$$\rho = \frac{|S_{11} \cdot S_{12} + S_{21} \cdot S_{22}|}{[1 - (|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)][1 - (|S_{22}|^2 + |S_{12}|^2)]} \quad (2. 9)$$

Dimana,

ρ : koefisien korelasi antenna MIMO

S_{11} : nilai *return loss* pada antenna 1

S_{22} : nilai *return loss* pada antenna 2

S_{12} : nilai *mutual coupling* antenna 1 terhadap antenna 2

S_{21} : nilai *mutual coupling* antenna 2 terhadap antenna 1

2.2.8 Parameter Antena

Dalam pengujian antenna terdapat beberapa parameter yang digunakan sebagai dasar dari pengujian suatu antenna. Berikut adalah beberapa parameter yang digunakan :

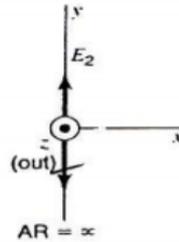
a. **Polarisasi**

Polarisasi dari sebuah antenna memberikan informasi kearah mana medan listrik akan berorientasi dalam perambatannya. Terdapat tiga macam polarisasi, yaitu polarisasi *linear*, polarisasi eliptis, dan polarisasi *circular* [23].

1) Polarisasi *Linear*

Polarisasi *linier* merupakan suatu arah medan listrik yang berada pada bidang yang sama dengan arah rambatannya. Suatu gelombang dikatakan berpolarisasi *vertical* atau tegak jika arah medan listrik tegak lurus terhadap permukaan bumi, sedangkan suatu gelombang dikatakan berpolarisasi secara

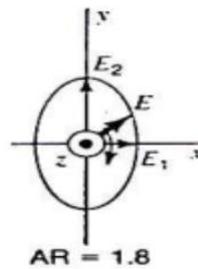
horizontal atau mendatar jika arah medan listrik sejajar dengan permukaan bumi. Polarisasi linear memiliki medan listrik pada arah y dan nilai axial ratio (AR) $\approx \infty$, dimana *axial ratio* merupakan perbandingan antara sumbu mayor dengan sumbu minor [24].



Gambar 2. 8 Polarisasi *Linear* dengan Arah Vertikal [24]

2) Polarisasi *Elips*

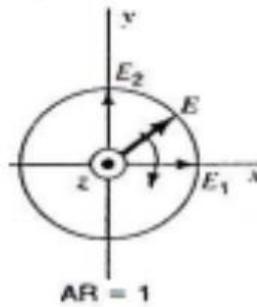
Berbeda dengan polarisasi linier, gelombang dengan polarisasi eliptis dengan berjalannya waktu dan perambatannya medan listrik gelombang tersebut melakukan perputaran dengan ujung panah-panahnya terletak pada permukaan silinder dengan penampang *elips*. Polarisasi ini dikatakan elips jika sumbu mayor sama dengan sumbu minor dan axial ratio (AR) $\neq 1$ dan $\neq \infty$ [24].



Gambar 2. 9 Polarisasi *Elips* [24]

3) Polarisasi *Circular*

Polarisasi *circular* atau melingkar terjadi pada saat dua gelombang yang sama diantaranya saling mendahului 90° maka medan listrik tersebut akan berputar dengan kecepatan sebesar frekuensi pembawanya dan akan terpolarisasi melingkar. Terdapat beberapa kasus dimana komponen *horizontal* dan vertikal sama-sama kuat dengan beda fasa 90° maka disebut radiasi *circular polarization* [24].



Gambar 2. 10 Polarisasi *Circular* atau *Melingkar* [24]

b. Impedansi Masukan

Impedansi masukan didefinisikan sebagai nilai impedansi antenna pada titik terminal *input*-nya atau perbandingan dari tegangan terhadap arus pada titik terminal *input*. Suatu saluran transmisi penghubung yang dipasangkan beban berupa antenna memiliki impedansi beban sebesar Z_{in} . Kondisi beban dengan impedansi Z_{in} pada saluran transmisi dengan impedansi gelombang sebesar Z_0 dapat mengakibatkan terjadinya refleksi. Impedansi *input* dinyatakan dalam persamaan 2.10.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \tag{2.10}$$

Keterangan :

Z_{in} : Impedansi antenna

Z_0 : Impedansi gelombang

Γ : besaran refleksi

Impedansi input pada antenna penting untuk mencapai kondisi matching pada saat antenna tersebut dihubungkan dengan sumber tegangan, sehingga semua sinyal yang dikirimkan ke antenna terpancarkan [23].

c. VSWR (*Voltage Standing Wave ratio*)

VSWR (*Voltage Standing Wave Ratio*) merupakan ratio perbandingan antara gelombang datang dan gelombang pantul, dimana kedua gelombang tersebut membentuk gelombang berdiri (*standing wave*). Pada saluran transmisi terdapat dua gelombang tegangan, yaitu tegangan yang dikirimkan (V_{o+}) dan tegangan yang direfleksikan (V_{o-}) yang disebut dengan koefisien refleksi tegangan (Γ). VSWR dapat dinyatakan dalam rumus seperti persamaan 2.11 dan 2.12 [25].

$$\Gamma = \frac{V_{o-}}{V_{o+}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \tag{2.11}$$

Keterangan :

Γ : Koefisien refleksi

V_{o+} : Tegangan yang dikirim

V_{o-} : Tegangan yang direfleksikan

Z_L : Impedansi beban

Z_o : Impedansi saluran

$$\text{VSWR} = \frac{|V|_{\max}}{|V|_{\min}} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} \quad (2.12)$$

Keterangan :

VSWR: Perbandingan gelombang tegangan berdiri

V_{\max} : Tegangan maksimum

V_{\min} : Tegangan minimum

Γ : Koefisien refleksi

d. Return Loss

RL atau *Return Loss* adalah perbandingan antara amplitudo dari gelombang refleksi terhadap amplitudo gelombang yang dikirim. Nilai *return loss* dinyatakan baik apabila dibawah -10 dB, nilai tersebut dapat diperoleh dari nilai $\text{VSWR} \leq 2$. Sehingga dapat dikatakan bahwa nilai dari gelombang yang direfleksikan tidak lebih besar dari pada nilai gelombang yang dikirim, dengan kata lain saluran transmisi tersebut sudah sesuai atau *matching* [29]. *Return loss* dapat dinyatakan secara matematis dalam persamaan 2.13 [25]:

$$\text{Return Loss} = -20 \text{Log}_{10}|\Gamma| \quad (2.13)$$

Keterangan:

Γ : Koefisien refleksi

Pada *2 port network*, *return loss* dijabarkan dalam variabel S-paramater (rasio antar daya input atau output / rasio antar *port*). S-parameter terdiri dari S_{11} , S_{21} , S_{12} dan S_{22} . Dimana S_{11} dan S_{22} merupakan koefisien refleksi (Γ) pada *input port* 1 dan *input port* 2, S_{21} merupakan *insertion loss* dan S_{12} merupakan *isolation loss* [44].

e. Bandwidth

Bandwidth dari antenna merupakan rentang frekuensi dimana antenna tersebut dapat bekerja dengan baik. Nilai *bandwidth* antenna merupakan hasil bagi antara frekuensi atas (f_h) dikurangi frekuensi bawah (f_l) dengan frekuensi tengah (f_c). Secara matematis dapat dinyatakan dalam persamaan 2.14 [25]:

$$BW = \frac{f_h - f_l}{f_c} \quad (2.14)$$

Keterangan :

BW : Bandwith antenna

f_h : Frekuensi tinggi

f_l : Frekuensi rendah

f_c : Frekuensi tengah

f. *Gain*

Gain atau penguatan suatu antenna merupakan penguatan relatif antenna terhadap antenna referensi. Biasanya antenna yang digunakan sebagai antenna referensi adalah antenna *dipole* $\lambda/2$ dengan besar penguatan terhadap antenna isotropis $\pm 2,14$ dBi [25]. Besarnya *gain* tergantung pada nilai direktivitas dan efisiensi antenna seperti pada persamaan 2.15 berikut :

$$Gain = \eta \times D \quad (2.15)$$

Keterangan :

η : Faktor efisiensi antenna

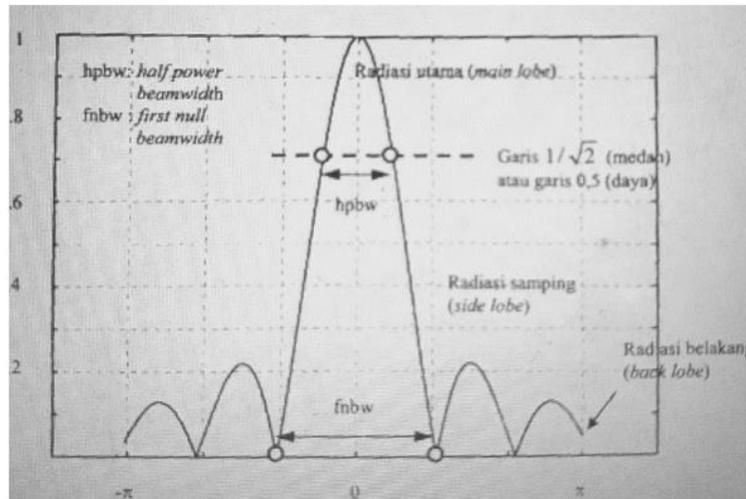
D: Direktivitas

g. **Pola Radiasi**

Pola radiasi antenna merupakan sifat-sifat radiasi antenna sebagai fungsi koordinat ruang yang ditentukan oleh medan jauh dan digambarkan sebagai koordinat arah [25]. Pola radiasi pada antenna memiliki beberapa parameter [21]:

- 1) *Major Lobe (main lobe)* adalah bagian dari pola radiasi pada arah tertentu yang memiliki nilai radiasi maksimum.
- 2) *Minor Lobe* merupakan bagian dari pola radiasi yang terdiri dari *side lobe* dan *back lobe*. *Minor lobe* adalah bagian dari pola radiasi yang tidak diinginkan.
- 3) *Side Lobe* merupakan bagian dari pola radiasi yang terletak di samping *major lobe* dan merupakan bagian dari *minor lobe* yang terbesar, biasanya memiliki arah yang tegak lurus dengan *main lobe*.
- 4) *Back Lobe* adalah bagian dari pola radiasi yang membentuk sudut 180° terhadap arah radiasi antenna (arahnya bertolak belakang dengan *major lobe*).
- 5) HPBW (*Half Power Beamwidth*) merupakan lebar berkas diantara sisi-sisi *major lobe* dan nilai dayanya setengah dari nilai maksimum *major lobe*.

- 6) FNBW (*First Null Beamwidth*) adalah lebar berkas diantara sisi-sisi *major lobe* yang nilai dayanya nol.
- 7) FBR (*Front to Back Ratio*) yaitu perbandingan antara *main lobe* terhadap *back lobe*.



Gambar 2. 11 Parameter Pola Radiasi Antena

Sifat antena ada dua yaitu *directional* dan *omnidirectional*. Antena *directional* merupakan antena yang memiliki pola pemancaran sinyal dengan satu arah tertentu. Antena ini idealnya digunakan sebagai penghubung antar gedung atau untuk daerah (konfigurasi *point to point*) yang mempunyai konfigurasi cakupan area yang kecil. Antena dengan jenis *directional* merupakan antena dengan jenis *narrow beamwidth*, yaitu memiliki sudut pemancaran yang kecil dengan daya lebih terarah, antena ini hanya mengirim dan menerima sinyal radio pada satu arah. Sedangkan jenis antena *omnidirectional*, merupakan jenis antena yang dapat memancarkan gelombang ke segala arah. Salah satu jenis antena *omnidirectional* adalah antena *monopole* [26].

h. Insertion Loss

Insertion loss merupakan kondisi hilangnya daya sinyal yang diakibatkan adanya penyisipan perangkat dalam saluran transmisi dan dinyatakan dalam satuan decibel (dB). Jika daya yang ditransmisikan oleh beban adalah P_T dan daya yang diterima oleh beban adalah P_R , maka kerugian penyisipan dalam dB diberikan dalam persamaan 2.16 [28]:

$$\text{Insertion Loss} = -20 \log_{10} \frac{P_T}{P_R} \quad (2.16)$$

Keterangan :

P_T : Daya yang ditransmisikan oleh beban

P_R : Daya yang diterima oleh beban

i. Isolation Loss

Isolation loss merupakan perbedaan level sinyal dalam dB antara port input dan *port isolated* dimana kedua port tersebut *matched load*. *Isolation loss* dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2.17 [27]:

$$\mathbf{Insolation\ Loss = -10\log\frac{P_1}{P_2}} \quad (2.17)$$

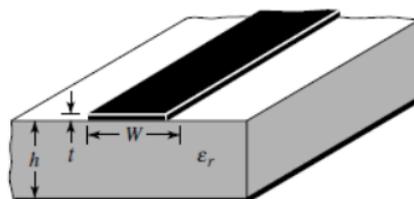
Keterangan :

P_1 = port keluaran 1 (dB)

P_2 = port keluaran 2 (dB)

2.2.9 Teknik Pencatu Mikrostrip Line

Dalam perancangan antenna teknik pencatu merupakan hal yang penting. Salah satu syarat antenna yang baik apabila impedansi *input* sesuai (*matching*) dengan impedansi karakteristik kabel pencatunya sehingga dapat memancarkan dan menerima energi gelombang radio dengan arah polarisasi sesuai pada aplikasi yang dibutuhkan. Teknik pencatu yang dapat digunakan pada antenna mikrostrip, yaitu *proximity coupling*, *microstrip line*, *coaxial probe*, dan *aperture coupling* [29]. Teknik pencatuan *microstrip line* memiliki keuntungan, yaitu mudah dalam proses pabrikan karena *feed line* dan elemen peradiasi dicetak pada *substrat* yang sama. Penyepadanan impedansi pada teknik ini juga lebih sederhana dibandingkan dengan teknik pencatu yang lain. *Patch* antenna dicatu pada bagian tepinya sehingga harus memperhatikan impedansi pada tepi *patch* harus sesuai dengan impedansi dari saluran agar tranfer daya maksimum [30].



Gambar 2.12 Microstrip Line [16]

Untuk mendapatkan karakteristik impedansi saluran pencatu yang diinginkan maka diperlukan perhitungan dimensi saluran pencatu seperti persamaan 2.18 dan 2.19 [31].

$$\mathbf{B} = \frac{60\pi^2}{Z_o\sqrt{\epsilon r}} \quad (2.18)$$

$$Wf = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon r - 1}{2\epsilon r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon r} \right] \right\} \quad (2.19)$$

Keterangan :

Wf : dimensi lebar saluran pencatu

Z_o : impedansi saluran catu

ϵr : Permittivitas *relative* bahan subsrat

h : tebal bahan subsrat

Besarnya konstanta dielektrik efektif (ϵeff) jika $(Wf/h) > 1$, dinyatakan dalam persamaan 2.20 [11].

$$\epsilon eff = \frac{\epsilon r + 1}{2} + \frac{\epsilon r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{wf} \right)^{-0,5} \quad (2.20)$$

Sedangkan besarnya konstanta dielektrik efektif (ϵeff) jika $(Wf/h) < 1$, dinyatakan dalam persamaan 2.21 [11].

$$\epsilon eff = \frac{\epsilon r + 1}{2} + \frac{\epsilon r - 1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{wf} \right)}} + 0,04 \left(1 - \frac{wf}{h} \right)^2 \right] \quad (2.21)$$

Untuk menyesuaikan dua impedansi yang tidak sama, yaitu impedansi karakteristik saluran (Z_o) dan impedansi beban (Z_L) digunakan teknik *impedance matching*. Transformator $\lambda/4$ merupakan teknik *impedance matching* dengan memberikan saluran transmisi dengan impedansi Z_T diantara dua saluran transmisi yang tidak match. Persamaan 2.22 sampai 2.24, untuk menentukan panjang saluran pencatu $\lambda/4$ [18].

$$Lf = \frac{1}{4} \lambda g \quad (2.22)$$

$$\lambda g = \frac{\lambda o}{\sqrt{\epsilon eff}} \quad (2.23)$$

$$\lambda o = \frac{c}{f} \quad (2.24)$$

Keterangan :

Lf : panjang saluran pencatu

λg : panjang gelombang pada bahan dielektrik

λ_0 : panjang gelombang udara bebas (m)

Pada perancangan antena mikrostrip yang disusun secara array menggunakan bentuk *T-junction*. Sehingga perhitungan jarak antar elemen antena (d) dibutuhkan, yaitu setengah dari panjang gelombang (λ) seperti pada persamaan 2.25 [31].

$$d = \frac{\lambda}{2} \quad (2.25)$$

Sedangkan untuk *inset feed* pada antena mikrostrip menggunakan persamaan 2.26 sampai 2.27[38][39].

$$x_0 = \frac{wf}{2} \quad (2.26)$$

$$Y_0 = 10^{-4}(0.001699\epsilon_r^7 + 0.13761\epsilon_r^6 - 6.1783\epsilon_r^5 + 93.187\epsilon_r^4 - 682.69\epsilon_r^3 + 2561.9\epsilon_r^2 - 4043\epsilon_r + 6697)\frac{L}{2} \quad (2.27)$$

Keterangan :

x_0 : Lebar *inset feed*

Y_0 : Panjang *inset feed*

Pada persamaan 2.27 merupakan persamaan yang disederhanakan untuk memudahkan dalam perhitungan. Persamaan tersebut juga hanya valid jika nilai substrat dari $2 \leq \epsilon_r \leq 10$ [39].

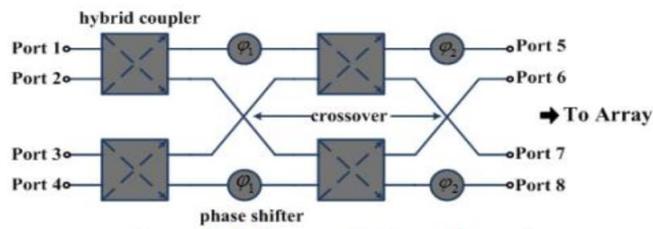
2.2.10 Metode *Butler Matrix*

Pola radiasi pada antena *array* dapat diubah dengan berbagai cara antara lain mengubah amplitude catuan, jarak antena, dan fasa catuan antena. Salah satu cara untuk mengubah fasa catuan yaitu menggunakan metode *butler matrix*. *Butler matrix* merupakan rangkaian *microwave* yang memiliki N *port* masukan dan N *port* keluaran, untuk mengubah *input* pada satu *port* menjadi beberapa *port* diperlukan pembagi daya dari satu *port* ke N *port* [31]. Sehingga N sinyal yang berbeda dapat ditransmisikan menggunakan N antena mikrostrip yang berbeda. Penggunaan metode *butler matrix* memiliki beberapa keuntungan, antara lain [32][33]:

1. Mudah diimplementasikan menggunakan *hybrid coupler* dan pergeseran fasa (*phase shifter*)
2. Menghasilkan *beam* yang mempunyai jangkauan yang sempit dan *directivity* yang tinggi

3. Memiliki *path lengths* dan jumlah komponen lebih sedikit dibandingkan jaringan *beamforming* lain
4. Sistem ini bekerja dengan tinggi dan nilai *crossover* yang konstan sesuai dengan frekuensi
5. Dapat mencapai *continuous beam scanning*

Butler matrix pertama kali diperkenalkan oleh Jesse Butler dan Ralph Lowe. Dasar sifat-sifat *butler matrix* adalah isolasi antara *input* dan *output*, *linearitas* dalam fasa berhubungan dengan posisi *output* dan kenaikan fasa tergantung pada pemilihan *input*. Metode ini dikaitkan dengan penyisipan dan kehilangan daya (*power loss*) karena komponen dan penyimpangan *copper lines*, tetapi *beam angle* dan *beamwidth* berbeda dengan frekuensi. *Butler matrix* terdiri dari tiga komponen utama, antara lain 3 dB *quadrature couplers*, *crossover*, dan 45° *phase shifter*. Ketiga komponen tersebut dapat diimplementasikan menggunakan *microstrip line*, karena mudah dalam fabrikasi dan biaya sedikit. Pada sistem dapat menghasilkan *narrow beams* pada arah yang berbeda dengan *gain* yang lebih tinggi karena dibuat pada substrat yang sama [29]. Desain *butler matrix beamforming* untuk array empat elemen ditunjukkan pada gambar 2.10 [34].



Gambar 2. 13 Blok Diagram *Butler Matrix* [35]

Suatu sistem *butler matrix* empat *beam* terpisah yang ideal dengan sudut fasa yang berbeda, seperti ditunjukkan pada tabel 2.1 [36].

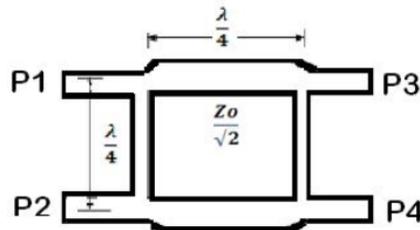
Tabel 2. 1 Hasil Pergeseran Fasa Ideal antar Port Berbeda [36]

<i>Output</i> <i>Input</i>	P5	P6	P7	P8	β
P1	62,718	16,935	-28,747	-72,850	45
P2	-28,478	107,768	-117,055	16,946	-135
P3	16,951	-117,045	107,760	-28,456	135
P4	-72,832	-28,739	16,925	62,717	-45

Penjelasan untuk tiga komponen utama *butler matrix* adalah sebagai berikut :

1. *Quadrature Coupler* atau *Hybrid Coupler*

Hybrid coupler atau 3 dB *quadratur coupler* memiliki kemampuan untuk menghasilkan fasa sinyal 90° pada *port output*. Bagian ini terdiri dari garis utama yang digabungkan dengan dengan garis sekunder yang memiliki karakteristik seperempat dari panjang gelombang ($\lambda/4$). Ketika sinyal masuk pada *port 1*, maka sinyal pada dua saluran *output 2* dan *3* memiliki *amplitude* yang sama tetapi memiliki perbedaan fasa 90° satu dengan yang lainnya. Gambar 2.13 Z_p dan Z_s menunjukkan impedansi karakteristik pada masing-masing garis seri dan hunt, begitupun dengan panjang gelombang. $Z_s=Z_o/\sqrt{2}$ dan $Z_p=Z_o$, dimana Z_o adalah impedansi karakteristik dari sistem *feeding* [11].



Gambar 2. 14 *Quadrature Coupler* atau *Hybrid Coupler* [11]

S-parameter dari *hybrid coupler* dapat dijelaskan melalui matrik S yang memiliki bentuk sebagai berikut :

$$S_{hybrid} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix}$$

Hybrid coupler dibuat dengan menggunakan dua transmisi utama atau lengan *shunt* yang dihubungkan dengan dua cabang sekunder. Dalam mendesain *hybrid coupler* dapat digunakan persamaan matematika seperti dibawah ini. Untuk $Z_o \leq 44-2\epsilon_r$, maka lebar saluran transmisi (W) dan panjang saluran transmisi (L) *hybrid coupler* adalah [36]:

$$Wf = \frac{2h}{\pi} \left\{ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[\ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\epsilon_r} \right] \right\} \quad (2.28)$$

$$B = \frac{60\pi^2}{Z_o\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.29)$$

$$L = \frac{c}{4f\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2.30)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{wf} \right)^{-0,5} \quad (2.31)$$

Keterangan :

W : lebar saluran transmisi (mm)

L : panjang saluran transmisi (mm)

B : nilai impedansi saluran

Z_o : impedansi saluran transmisi

ε_r : konstanta dielektrik efektif substrat

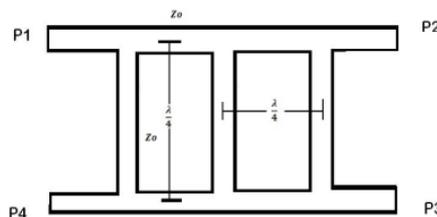
ε_{reff} : konstanta dielektrik relatif

2. Crossover Coupler

Pada *butler matrix* jalur sinyal harus secara fisik melewati satu sama lain dan mempertahankan tingkat isolasi yang tinggi pada jalur yang tersisa. *Crossover coupler* merupakan jaringan yang terdiri dari empat *port* simetris, dimana dua *port* adalah *port input* dan dua *port* yang lain adalah *port output*. *Crossover* yang dirancang secara sempurna, semua *port* yang berdekatan dengan *coupler* harus diisolasi satu sama lain secara sempurna. *Port 1* yang diumpankan dengan sinyal *output port 2* dan 4 harus bernilai nol, sama seperti *port 4* yang diumpankan dengan sinyal *port 1* dan 3 juga harus bernilai nol. Bentuk dari matrik S *crossover* dapat menggambarkan parameter S sebagai berikut :

$$S_{crossover} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & j \\ j & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Gambar 2.14 merupakan susunan *crossover coupler*, $Z_s=Z_p=Z_o$ dimana Z_s dan Z_p adalah impedansi karakteristik dari jalur seri dan hunt [37]



Gambar 2. 15 Crossover Couplers [37]

3. 45° Phase Shifter

Phase shifter digunakan untuk memberikan pergeseran fasa pada sinyal. Untuk melakukan pergeseran fasa maka digunakan panjang saluran (l) seperti persamaan 2.30 dan 2.31 [37].

$$|\varphi| = \frac{2\pi}{\lambda_g} l \quad (2.32)$$

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{reff}}}} \quad (2.33)$$

Keterangan :

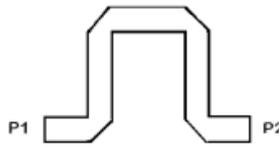
l : panjang lengan,

φ : nilai fasa,

λ_g : panjang gelombang saluran

λ_0 : panjang gelombang.

Bentuk dari *phase shifter* di tunjukkan pada gambar 2.15.



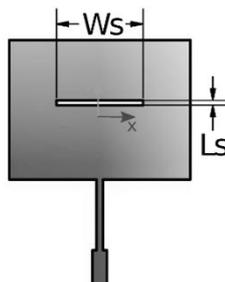
Gambar 2. 16 45° Phase Shifter [36]

2.2.11 Metode *Bandwidth Enhancement*

Salah satu kelemahan dari antenna mikrostrip adalah *bandwidth* yang sempit. Peningkatan nilai *bandwidth* dapat dilakukan penggunaan slot dan metode DGS (*Defected Ground Structure*). Adapun penjelasan dari masing-masing metode sebagai berikut :

1. Metode Penggunaan Slot

Penambahan slot pada *patch* peradiasi antenna mikrostrip dapat meningkatkan *bandwidth* karena slot mereduksi dimensi antenna. Adanya slot memaksa arus untuk merambat dari ujung satu ke ujung lainnya.

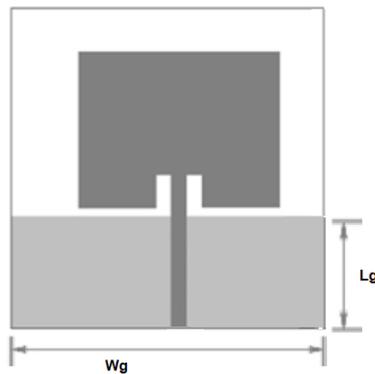


Gambar 2. 17 Bentuk Antena Mikrostrip Slot [41]

Bentuk slot yang umum digunakan adalah *rectangular* slot. Dimana untuk mendapatkan panjang slot (L_s) = $\lambda_0/2$ sedangkan untuk lebar slot (W_s) = $0,01\lambda_0$ [41].

2. Metode DGS (*Defected Ground Structure*)

DGS (*Defected Ground Structure*) merupakan bentuk pola tersketsa pada bidang *ground*. Metode DGS untuk merubah sifat dari gelombang dengan cara membuat satu atau lebih pola pada bidang *ground*. Bentuk dari DGS dimodifikasi mulai dari slot yang mudah menjadi bentuk yang lebih kompleks. Banyak pola atau bentuk yang dapat di *etch* pada bidang *ground*. Pola yang di *etching* akan mengganggu distribusi arus dan merubah impedansi antenna. Gangguan ini dapat mengubah karakteristik transmisi mikrostrip. Metode konvensional untuk menganalisis dan membuat model DGS didasarkan pada metode iteratif *trial & error* [42].



Gambar 2. 18 DGS (*Defected Ground Structure*) Antena Mikrostrip [42]