

Perancangan Jaringan VPN Dalam MPLS IP Antar Perusahaan Menggunakan Virtual Routing Forwarding Pada Router

Irmayani, Taufan Septiyanto, Fivit Marwita
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta 12640
E_mail: ir.irmayani@gmail.com

ABSTRAK

Jaringan *Virtual Private Network* (VPN) dalam *Multi Protocol Label Switching* (MPLS) adalah suatu bentuk komunikasi data yang menggunakan jaringan publik untuk menghubungkan dua atau lebih cabang komputer, pelanggan, secara tertutup yang dipisahkan oleh jarak. Dalam hal ini menggunakan perangkat keras (*router*) sebagai media koneksi penghubung komunikasi data tersebut. Pada tulisan ini akan dilakukan analisis model pembentukan suatu sistem jaringan VPN dalam MPLS. Perancangan dilakukan pada dua pelanggan yaitu Departemen Perhubungan (DepHub) dan Perusahaan Gas Negara (Gas). Komunikasi ini dipisahkan oleh *Virtual Routing Forwarding* (VRF) dengan ditandai terbentuknya *Cloud* untuk masing-masing pelanggan sehingga terjadi pemisahan trafik yang aman untuk melakukan komunikasi data. Tahapan ini menunjukkan terbentuknya sebuah VPN dalam MPLS menggunakan VRF yang akan memisahkan jalur masing-masing pelanggan dan protokol yang digunakan adalah *Open Shortest Path First* (OSPF) dan *Border Gateway Protocol* (BGP). Dalam konfigurasi jaringan VPN/MPLS ini dihasilkan model/topologi komunikasi yang terbentuk oleh Provider. Hasil yang diperoleh pada router PE1 sebagai provider menunjukkan trafik komunikasi yang ada di PE1 (Jakarta) menuju ke PE2 (Medan), atau sebaliknya dengan hasil 100 %. Nilai latency 156 ms, average 202 ms dan maximum 248 ms untuk Customer Departemen Perhubungan. Sedangkan nilai latency 196 ms, average 232 ms dan max 280 ms untuk Customer Perusahaan Gas Negara.

Kata Kunci: VPN, MPLS, VRF, OSPF, BGP

ABSTRACT

On network *Virtual Private Network* (VPN) in *Multi Protocol Label Switching* (MPLS) is a form of data communication using the public network to connect two or more branches of the computer, the customer, are covered that are separated by distance. In this case use the hardware (*router*) as a medium of communication connecting connection data. In this paper will be the establishment of a system analysis of the model in the MPLS VPN network. The design in done in two customers, the Departement of Transportation (Dephub) and National Gas Company (Gas). This communication Forwarding separated by *Virtual Routing Forwarding* (VRF) with Cloud formation is marked for each customer so that there is a separation of traffic safety to perform data communication. This stage shows the formation of an MPLS VPN using VRF that will separate the traffic of each customer (Dephub dan Gas) and the protocol used is the *Open Shortest Path First* (OSPF) and *Border Gateway Protocol* (BGP). In the configuration of the MPLS VPN network is generated model/communication topology formed by Provider. The results obtained from the PE1 router as the provider show the communication traffic from PE1 (Jakarta) to PE2 (Medan), or vice versa, with 100% results. The latency value is 156 ms, average 202 ms, and maximum 248 ms for the Ministry of Transportation's customer. Meanwhile, the latency value is 196 ms, average 232 ms, and maximum 280 ms for the Perusahaan Gas Negara customer.

Keywords: VPN, MPLS, VRF, OSPF, BGP

1. PENDAHULUAN

Perkembangan koneksi jaringan komputer sangat pesat dan memberikan pengaruh yang cukup besar, terutama di tingkat perusahaan (corporate) yang sangat membutuhkan koneksi jaringan komputer untuk mendukung kelancaran komunikasi data. Kelancaran komunikasi data sangat ditentukan oleh baiknya suatu layanan yang disuguhkan oleh *Internet Service Provider* (ISP) pada saat ini. Kecepatan akses, keamanan, stabilitas, garansi layanan, dan pelayanan penanganan gangguan koneksi merupakan hal utama yang sangat dilirik oleh kalangan perusahaan untuk menentukan ISP yang akan dipilih. Perusahaan yang mempunyai banyak cabang sangat membutuhkan

koneksi jaringan *any to any connection*, maka disinilah peranan penting dari *Virtual Private Network* (VPN) di dalam skala besar.

Dalam penelitian sebelumnya yaitu Implementasi Jaringan MPLS VPN (Studi Kasus PT Supra Primatama Nusantara BIZNET) menunjukkan proses traceroute ke router langsung menuju ke tujuan tanpa melalui beberapa router terlebih dahulu. Secara fisik untuk mencapai ke tujuan harus melewati beberapa router namun MPLS VPN langsung ke router tujuan, dengan ini dapat efektif dalam pengiriman data [3].

Untuk mendapatkan komunikasi yang cepat, aman, dan mudah diakses digunakan jaringan MPLS VPN. Jaringan MPLS akan mengirimkan paket sesuai dengan

label yang ada pada header paket ke tujuan yang diinginkan dan VPN akan membatasi siapa pengguna yang berhak mengakses jaringan [4] [5] [6].

Routing protokol OSPF dibagi dua daerah yaitu daerah customer dan provider. VLAN akan dikonfigurasi melalui switch dan router CE1 agar dapat saling bertukar data ke workgroup dan lebih aman karena tidak dikirimkan secara broadcast [1] [7] [8].

Hasil pengujian pada Simulasi Multi Protocol Label Switching Virtual Private Network (MPLS VPN) Dengan Virtual Local Area Network (VLAN) Menggunakan Router Mikrotik menunjukkan bahwa MPLS VPN dengan VLAN menghasilkan bandwidth lebih kecil dibandingkan MPLS VPN non VLAN [9].

Hasil pengujian untuk faktor keamanan pada Virtual Private Network dengan Secure Socket Layer untuk Pengamanan Komunikasi Video Conference, menunjukkan bahwa pengiriman informasi yang dilakukan dengan pengamanan VPN SSL tidak dapat dilihat informasi protokol seperti IP address, user ID, RTP dan SIP karena semua data telah dienkripsi dan dikapsulasi [2].

Dalam jaringan komputer berbasis IP, Virtual Routing and Forwarding (VRF) adalah teknologi yang digunakan pada suatu router yang memungkinkan beberapa tabel routing instan dapat eksis pada suatu router dan waktu yang sama. Tabel routing instan ini bersifat independen, maka alamat IP yang sama atau yang saling bertumpang tindih dapat digunakan tanpa bertentangan satu sama lain [5].

Pengertian lain dari VRF adalah VPN Routing and Forwarding, merupakan elemen kunci dalam teknologi MPLS Cisco VPN. VRF adalah tabel routing instan yang dapat eksis dalam satu atau beberapa tabel routing disetiap service VPN pada router Provider Edge (PE).

VRF dapat diimplementasikan pada perangkat jaringan dengan tabel routing yang berbeda. Hal ini dikenal sebagai forwarding information basis (FIB), atau suatu perangkat jaringan memiliki kemampuan untuk mengkonfigurasi router virtual yang berbeda-beda. Dimana masing-masing router virtual tersebut memiliki FIB sendiri yang tidak dapat diakses oleh router virtual lain pada perangkat/router yang sama [1].

Diharapkan dengan penelitian ini, sistem akan dapat mencakup seluruh jaringan agar efisien dan aman. Perangkat yang digunakan untuk melakukan konfigurasi adalah router Cisco, aplikasi yang dipakai dalam konfigurasi dan pengujian pada sistem jaringan VPN dalam MPLS IP menggunakan VRF di router adalah GNS3. Untuk mengetahui jalur jaringan VPN dalam MPLS IP dari 2 (dua) perusahaan yang berbeda digunakan pengalokasian Protokol VRF yang berbeda.

2. DASAR TEORI

2.1 Multi Protocol Label Switching VPN

Teknologi MPLS sudah banyak diadopsi oleh para *Service Provider* (SP) untuk diimplementasikan dengan VPN untuk menghubungkan antar cabang perusahaan. VPN pada umumnya digunakan oleh SP untuk menggunakan infrastruktur fisik dalam mengimplemen tasikan *point-to-point link* antar cabang perusahaan. Jaringan pelanggan yang diimplementasi dengan VPN akan terdiri dari kawasan yang jelas di bawah pengawasan pelanggan tersebut dengan *customer sites* yang terhubung satu sama lain melalui jaringan SP [5].

Pada umumnya, VPN terdiri dari 2 wilayah yaitu:

1. Jaringan *Provider*, digunakan oleh SP untuk menawarkan *dedicated point-to-point link* melalui jaringannya. *Router* yang terhubung langsung dengan CE disebut dengan *Provider Edge* (PE) *router*. Selain itu juga terdapat *router* pada jaringan *backbone*-nya yang disebut dengan *Provider* (P) *router*; di sisi ini dikenal implementasi model *overlay* VPN, pada model ini *provider* menghubungkan antar cabang perusahaan dengan menggunakan jaringan pribadi yang *emulated*, *provider* tidak mencampuri proses *routing* di sisi pelanggan. *Provider* hanya bertugas untuk menyediakan layanan data dengan menggunakan *virtual point-to-point link* yang dikenal dengan istilah *Data link layer virtual circuit*.
2. Jaringan *Customer*, terdiri dari *router* pada setiap *site* pelanggan yang disebut dengan *Customer Edge* (CE) *router*; disisi ini dikenal implementasi *peer-to-peer* VPN dan dikembangkan untuk mengatasi kelemahan pada model *overlay* dan mengoptimalkan transportasi data melewati jaringan *backbone* SP. Oleh karena itu, SP juga ikut aktif dalam proses *routing* di sisi pelanggan.

2.2 Arsitektur MPLS VPN

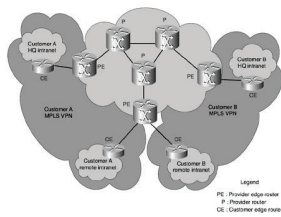
Pada arsitektur MPLS VPN, *provider edge router* membawa informasi *routing* pelanggan dan mengoptimalkan proses *routing* pada pelanggan, sedangkan data diteruskan ke cabang-cabang pemisahan melalui jaringan *backbone* SP yang berbasis MPLS. Model MPLS VPN juga mencegah pengalokasian yang tumpang tindih atau *over lapping* [6].

Domain jaringan MPLS VPN, seperti jaringan VPN tradisional terdiri dari jaringan *customer* dan *provider*. Model jaringan MPLS VPN mirip dengan model *peer-to-peer* VPN seperti pada gambar 1. Bagaimanapun juga, *traffic* pelanggan terisolasi pada *router* PE yang sama yang menyediakan konektivitas ke dalam jaringan SP bagi banyak pelanggan [10].

Komponen-komponen utama dalam arsitektur MPLS VPN adalah:

1. Jaringan *customer*, biasanya merupakan wilayah *customer* yang terdiri dari *router* CE.

2. Jaringan *provider*, merupakan wilayah *provider* yang terdiri dari *router* PE dan P. Jaringan ini mengontrol *routing traffic* antar sisi *customer*.
3. *Router CE*, merupakan *router* yang terdapat pada jaringan *customer* yang terhubung langsung dengan jaringan SP.
4. *Router PE*, merupakan *router* yang terdapat pada jaringan *provider* yang terhubung langsung ke *router CE*.
5. *Router P*, merupakan *router* yang terdapat pada jaringan *backbone provider*, yang terhubung baik dengan *router PE* maupun sesama *router P*.



Gambar 1 Model jaringan MPLS

2.3 Virtual Routing and Forwarding (VRF)

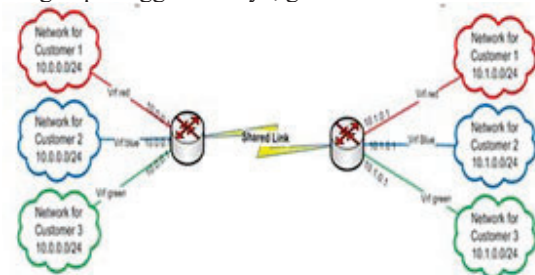
Dalam jaringan komputer berbasis IP, Virtual Routing and Forwarding (VRF) adalah teknologi yang digunakan pada suatu router dimana memungkinkan beberapa tabel routing instan dapat eksis bersamaan pada suatu router yang sama dan pada waktu yang sama pula. Karena tabel routing instan ini bersifat independen, maka alamat IP yang sama atau yang saling bertumpang tindih dapat digunakan tanpa bertentangan satu sama lain [3].

Pengertian lain dari VRF adalah VPN Routing and Forwarding, yang merupakan elemen kunci dalam teknologi MPLS Cisco VPN. Sebuah VRF adalah tabel routing instan yang dapat eksis dalam satu atau beberapa tabel routing pada setiap service VPN pada router Provider Edge (PE). Jumlah dari VRF terbatas oleh jumlah *interface* yang terdapat pada suatu *router* dan sebuah *interface* tunggal hanya bisa diasosiasikan dengan sebuah VRF [11, 15]

VRF biasanya sering dihubungkan dengan MPLS meskipun sebenarnya VRF bukan merupakan bagian dari MPLS, dimana di Cisco pengimplementasian VRF tanpa MPLS dikenal dengan nama VRF lite. Sedangkan saat digunakan dalam keperluan besar VRF lite tidak dapat digunakan, karena antara lain tiap instance VRF harus ada di tiap perangkat, perlu dilakukan encapsulasi (trunk di VLAN) untuk instance VRF tersebut.

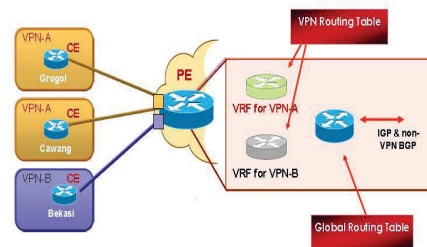
Dalam jaringan data center penggunaan VRF memungkinkan adanya beberapa segmen server dengan IP network yang sama terkoneksi di satu router, sedangkan pada ISP VRF memungkinkan adanya 2 atau lebih pelanggan dengan IP network yang sama terkoneksi dalam satu router dan koneksi antar site yang

diperlukan oleh satu pelanggan dapat dipisahkan dengan pelanggan lainnya, gambar 2.



Gambar 2 Topologi jaringan VRF

Pada Jaringan VPN dalam MPLS IP diperlukan VRF yang terpisah pada setiap PE, dengan menyediakan isolasi VPN dan mengizinkan overlap private ip address. VRF diasosiasikan dengan interface / sub interface yang terhubung ke CE. PE mengelola forwarding table untuk setiap site VPN. Route dalam VRF akan di distribusikan ke site yang lain, biasanya terhubung ke PE lain dari VPN yang sama seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3 Distribusi Route VRF

2.4 Route Distinguisher (RD) dan Route Target (RT)

Route Distinguisher (RD) berfungsi untuk memungkinkan memindahkan data antar kedua sisi *customer* melewati jaringan *backbone* SP. Format RD adalah 64-bit *unique identifier* yang digabungkan dengan 32-bit *prefix* atau rute yang diperoleh dari *router CE*, yang membentuk 96-bit *address* yang bisa dibawa melewati *router PE* pada *domain* MPLS. Oleh karena itu, sebuah RD yang unik dikonfigurasi untuk setiap VRF pada *router PE*. Pengalamatan yang dibentuk oleh 96-bit tersebut disebut dengan VPN *version 4* (VPNv4) *address*.

Pengalamatan VPNv4 ditukarkan di antara *router PE* pada jaringan SP digabung dengan pengalamatan IPv4. Jika SP tidak memiliki nomor AS BGP, format pengalamatan IPv4 bisa digunakan dan jika jaringan SP memiliki nomor AS, format dari nomor AS bisa digunakan [14].

Route Targets (RT) merupakan pengenalan tambahan yang digunakan pada *domain* MPLS VPN yang mengidentifikasi keanggotaan VPN dari rute-rute yang dipelajari pada sisi tersebut. RT

diimplementasikan dengan cara meng-encoding 16-bit urutan teratas dari BGP *extended community* (total 64-bit) dengan sebuah nilai yang berhubungan dengan keanggotaan VPN pada sisi tertentu. Ketika sebuah rute VPN yang dipelajari dari sebuah *router CE* disuntikkan ke BGP VPNv4, sebuah daftar atribut-atribut *route target extended community* diasosiasikan dengannya. *Export route target* digunakan sebagai identifikasi dari keanggotaan VPN dan diasosiasikan ke setiap VRF. *Import route target* diasosiasikan dengan setiap VRF dan mengidentifikasi rute-rute VPNv4 yang akan diimpor ke VRF untuk *customer* tertentu. Format dari RT mirip dengan format RD. Interaksi antara nilai-nilai RT dan RD pada *domain MPLS VPN* sebagai *update* diterjemahkan sebagai sebuah *update MP-BGP* [15].

2.5 Multi-Protocol BGP (MP-BGP)

Protokol yang digunakan untuk menukar rute-rute VPNv4 adalah *Multiprotocol BGP (MP-BGP)*. *Router PE* harus menjalankan protokol *routing IGP* untuk bertukar data sesama *router PE*, yang ada pada saat ini Cisco mendukung *OSPFv2* dan *IS-IS* pada jaringan *MPLS*, *MP-BGP* juga bertugas untuk memberi *label* VPN, serta memungkinkan penggunaan pengalamatan *VPNv4* pada lingkungan *router MPLS VPN* yang memungkinkan beberapa *customer* untuk memiliki IP address yang sama didalam satu *PE*.

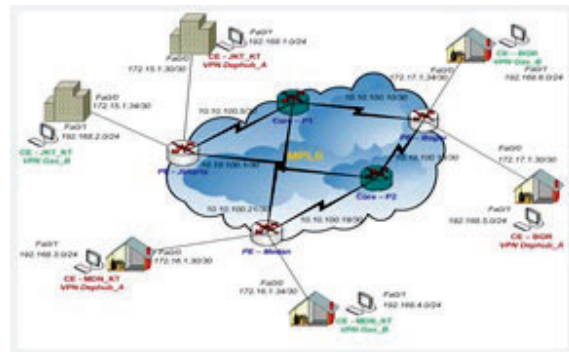
2.6 Address Family (AF)

Sebuah *Address Family (AF)* adalah sebuah protokol *Network Layer*. Sebuah *Address Family Identifier (AFI)* membawa sebuah identitas dari protokol *Network Layer* yang berhubungan dengan pengalamatan jaringan atribut-atribut *Multiprotocol* di *BGP*.

3. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Topologi Jaringan VPN dalam MPLS IP

Dalam merancang sebuah jaringan VPN dalam *MPLS IP* menggunakan aplikasi *GNS 3* dimana *router cisco 7200 series* sebagai *router P (Core)* dan *PE*, sedangkan untuk *CE* menggunakan *cisco 3600 series*. Untuk topologi konfigurasi yang akan dibuat dalam pembentukan jaringan VPN dalam *MPLS IP* dengan memanfaatkan *VRF* pada *router* terdapat 2 perusahaan sebagai pelanggan dari provider yaitu *Dephub* dan *Gas*. Dimana kedua perusahaan tersebut memiliki pusat cabang yaitu *Jakarta* dan 2 cabang *Medan* serta *Bogor*. *VRF* yang dipakai oleh kedua perusahaan tersebut berbeda, sebagai bukti pemisahan trafik pada jaringan VPN perusahaan dalam *MPLS IP*. *Provider* sebagai pengatur trafik koneksi antara pusat dengan cabang meneruskan komunikasi yang diinginkan *customer* dengan memanfaatkan *router Core* dan *PE*, ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4 Topologi Jaringan VPN-MPLS

3.2 Konfigurasi Domain MPLS Provider

Untuk melakukan konfigurasi *MPLS*, semua *router provider* dalam hal ini, *P1, P2, PE1, PE2* menggunakan interface *loopback0* sebagai identitas untuk labeling distribusi protokol.

Pada gambar 5, menunjukkan *Label Distribution Protokol (LDP)*, melakukan update terhadap *router Provider* membentuk sebuah *MPLS*. Pada masing masing *router Provider* akan menerima update, yang berisi informasi interface *loopback* pada masing-masing *router* yang sudah menerima update dari domain *MPLS*. Bila *router* belum menerima update informasi, cek kembali *routingan OSPF* dan cek konfigurasi interface *loopbacknya*. Pastikan di interface *loopback* masking yang digunakan *255.255.255.255*. Sesudah domain *MPLS* dan update *routing* sudah diterima masing-masing *router*, jalur khusus untuk setiap *VPN* yang menggunakan jasa *provider* telah terbentuk.

```

SuperPUTTY - PE_1
File View Tools Help
PE_1
PE_1#
PE_1#config t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
PE_1(config)#ip cef
PE_1(config)#ip cef
PE_1(config)#mpls l
PE_1(config)#mpls lab
PE_1(config)#mpls label proto
PE_1(config)#mpls label protocol ldp
PE_1(config)#mpls label protocol ldp
PE_1(config)#mpls
PE_1(config)#mpls ldp
PE_1(config)#mpls ldp log
PE_1(config)#mpls ldp logging nei
PE_1(config)#mpls ldp logging neighbor-changes
    
```

Gambar 5 Hasil konfigurasi domain MPLS

3.3 Konfigurasi VPN VRF

Dalam *VPN MPLS* menggunakan *layer 3* untuk mendistribusikan paket ke *VPN* dalam jaringan *MPLS*. Untuk mengetahui paket dari dan ke tujuan *VPN*, maka jaringan *MPLS* memberi *label* distribusi setiap paket yang akan di kirim atau di terima masing-masing *VPN*. Pemberian *label* itu disebut *Virtual Routing Forwarding* atau *VRF*. Setiap *label* memiliki keunikan tertentu.

Pemberian label memungkinkan paket akan sampai ke alamat tujuan tanpa mengalami kegagalan routing di provider (PE). Untuk memberikan label atau virtual routing forwarding pada masing-masing pelanggan, harus mengetahui alokasi interface di PE yang terhubung langsung (directly connected) ke router pelanggan sebelum melakukan konfigurasi di interface PE, diharuskan membuat *Route Distinguiser* (RD) dan *Target Route* masing masing VPN. Untuk menentukan hal itu, digunakan *astonomous system 100* dan untuk RD memakai nilai 1 dan 2 untuk masing-masing VPN karena hanya 2 VPN yang dibangun dalam konfigurasinya pada masing-masing PE.

```

SuperPuTTY - PE_1
PE_1#
PE_1#config t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
PE_1(config)#ip vrf Dephub_A
PE_1(config-vrf)#rd
PE_1(config-vrf)#rd 100:1
PE_1(config-vrf)#route-target export 100:1
PE_1(config-vrf)#route-target import 100:1
PE_1(config-vrf)#route-target export 100:2
PE_1(config-vrf)#route-target import 100:2
PE_1(config-vrf)#^Z
PE_1#
*Oct 17 16:27:09.831: %SYS-5-CONFIG I: Configured from console
PE_1#
PE_1#config t
Enter configuration commands, one per line. End with CNTL/Z.
PE_1(config)#ip vrf Gas_B
PE_1(config-vrf)#rd 100:2
PE_1(config-vrf)#route-target export 100:2
PE_1(config-vrf)#route-target import 100:2
PE_1(config-vrf)#^Z
PE_1#
    
```

Gambar 6 Konfigurasi VRF pada PE

Pada gambar 6, menunjukkan perintah export di PE1, artinya semua routing table (atau disebut routing prefix) di router virtual vrf VPN_DEPHUB, jika diadvertise ke PE1, maka akan diberi tanda dengan RD (route distinguisher) 100:1. Routing prefix tersebut setelah sampai di PE2 dan PE3, akan digunakan. Tapi untuk dapat menggunakannya PE2 dan PE3 harus meng-import dulu route dengan RD 100:1 tsb. Routing untuk Customer A ditandai dengan rd 100:1 (Dephub_A), sedangkan routing untuk customer B, menggunakan rd 100:2 (untuk Gas_B). Nama Dephub_A dan Gas_B berlaku/dikenal secara local di router itu saja. Yang dipertukarkan adalah rd 100:1 dan 100:2. Nomer rd ini yang akan dipertukarkan antar PE. Setelah konfigurasi, lanjutkan konfigurasi dimasing-masing interface PE yang terhubung langsung ke interface pelanggan. Penamaan vrf berdasarkan nama pelanggan atau dengan kode tertentu dan nama vrf pelanggan satu dengan yang lainnya berbeda. Setelah melakukan konfigurasi pada masing-masing PE, kemudian melakukan ping ke IP interface palanggan.

Dari router PE lakukan dengan perintah *ping vrf Dephub_A ip* ke interface pelanggan. Koneksi dari pelanggan ke provider (PE) sudah terbentuk untuk setiap masing-masing PE. Untuk menghubungkan VPN pelanggan dengan end pointnya, maka diperlukan routing BGP yang fungsinya membuat routing exterior dan interior pada router PE

3.4 Pengaktifan BGP Routing

Untuk dapat berkomunikasi dengan router yang lain maka diaktifkan routing BGP, dengan cara ini prefix yang dilewatkan dari VPN dapat di lewatkan dari vrf Dephub_A dan Gas_B ke masing-masing PE, yang ditunjukkan pada gambar 7.

Pada routing BGP (Border Gateway Protokol) yang dibuat, kanal trafik dan tabel routing yang di lewatkan pada masing-masing PE dan di terima juga pada vrf VPN pada PE yang lain. AS number 100 yang sebelumnya sudah ada, yaitu subtunnel untuk “melewatkan” routing table vrf Dephub_A dan vrf Gas_B. Untuk mengaktifkan gunakan command *neighbor <IP_Address> activate*. BGP memanfaatkan fasilitas *community* pada standar BGP, baik yang standard maupun extended, atau keduanya standard atau extended (both) saling dipertukarkan. Dan juga dapat dilihat apakah ada prefix yang sudah diterima oleh PE1 atau dikirimkan oleh PE1. Selanjutnya konfigurasi persiapan untuk routing prefix pada vrf Dephub_A dan vrf Gas_B. Untuk melakukan pengecekan apakah prefix Dephub_A dan Gas_B sudah di update pada masing-masing router PE, maka perintah yang digunakan adalah *sh bgp neigh*.

```

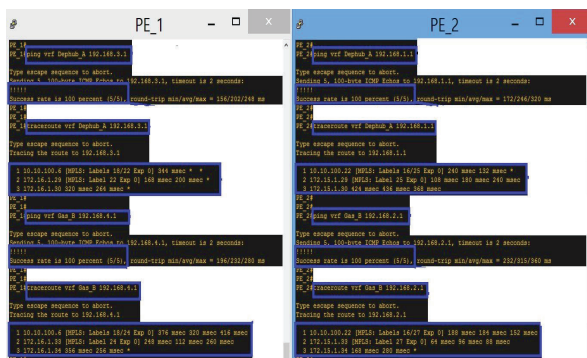
SuperPuTTY - PE_2
PE_2#
PE_2(config)#router bgp 100
PE_2(config-router)#no sync
PE_2(config-router)#no synchronization
PE_2(config-router)#bgp log-neighbor-changes
PE_2(config-router)#neighbor 10.10.10.3 remote-as 100
PE_2(config-router)#neighbor 10.10.10.3 update-source loopback 0
PE_2(config-router)#neighbor 10.10.10.5 remote-as 100
PE_2(config-router)#neighbor 10.10.10.5 update-source loopback 0
PE_2(config-router)#no auto-summary
PE_2(config-router)#
PE_2(config-router)#address-family v
PE_2(config-router)#address-family v
PE_2(config-router-af)#neighbor 10.10.10.3 activate
PE_2(config-router-af)#neighbor 10.10.10.3 send-community
PE_2(config-router-af)#neighbor 10.10.10.5 activate
PE_2(config-router-af)#neighbor 10.10.10.5 send-community
PE_2(config-router-af)#no auto-summary
PE_2(config-router-af)#no auto-summary
PE_2(config-router-af)#exit
PE_2(config-router)#
PE_2(config-router)#address-family in
PE_2(config-router)#address-family ipv4 vrf Dephub_A
PE_2(config-router-af)#redistribute con
PE_2(config-router-af)#redistribute connected
PE_2(config-router-af)#redistribute sta
PE_2(config-router-af)#no auto
PE_2(config-router-af)#no auto-summary
    
```

Gambar 7 Konfigurasi protokol BGP

4. HASIL PENGUJIAN dan ANALISA

Hasil pengujian pembentukan VPN dalam MPLS IP, ditunjukkan dengan hasil ping dan trace route ke IP salah satu cabang VPN dengan VRF yang melewati domain MPLS tersebut gambar 8.

1. Koneksi Departemen Perhubungan (Dephub_A) dan Perusahaan Gas Negara (Gas_B) di PE 1 (Jakarta) ke PE 2 (Medan) pada gambar 8a.
2. Metode VRF dan Update Routing pada Koneksi PE 1 ke PE 2 pada gambar 8b.



Gambar 8 Hasil pengujian pembentukan VPN

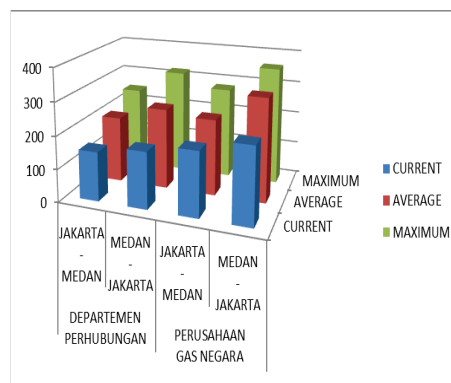
Pada Gambar 8, menunjukkan hasil koneksi antar PE1 ke PE2 dalam waktu yang bersama. Pada router PE1 untuk customer Dephub_A melakukan test ping ke router cabang yang berada di PE2 dengan IP 192.168.3.1. Router PE2 untuk customer Dephub_A melakukan test Ping ke router cabang yang berada di PE1 dengan IP 192.168.1.1. Pada router PE1 dan PE2 didapat hasil ping sukses rate 100 percent yang ditandai dengan tanda “!!!!” yang dapat diketahui koneksi antara Departemen Perhubungan lokasi Jakarta ke Medan serta sebaliknya dapat terkoneksi. Pada router PE1 dan PE2 untuk customer Dephub_A melakukan traceroute ke router cabang yang berada di PE2 dan begitupun sebaliknya. Pada router PE1 didapatkan hasil trace tersebut melewati jalur koneksi label MPLS pada IP 10.10.100.6 (router Core 1) dan 172.16.1.29 (router PE2) pada jaringan VPN yang dikelola provider. Pada router PE2 didapatkan hasil trace tersebut melewati jalur koneksi label MPLS pada IP 10.10.100.22 (router Core1) dan 172.15.1.29 (router PE2) pada jaringan VPN yang dikelola provider.

Pada router PE1 untuk customer Gas_B melakukan test ping ke router cabang yang berada di PE2 dengan IP 192.168.4.1, dan pada router PE2 untuk customer Gas_B melakukan test Ping ke router cabang yang berada di PE1 dengan IP 192.168.2.1. Pada router PE1 dan PE2 didapat hasil ping sukses rate 100 percent yang ditandai dengan tanda “!!!!” yang dapat diketahui koneksi antara Perusahaan Gas Negara lokasi Jakarta ke Medan serta sebaliknya dapat terkoneksi.

Pada router PE1 dan PE2 untuk customer Gas_B melakukan traceroute ke router cabang yang berada di PE2 dan begitupun sebaliknya. Pada router PE1 didapatkan hasil trace tersebut melewati jalur koneksi label MPLS pada IP 10.10.100.6 (router Core 1) dan 172.16.1.33 (router PE2) pada jaringan VPN yang dikelola provider.

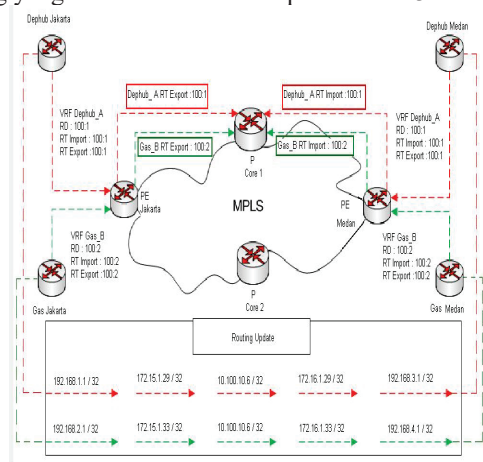
Pada router PE2 didapatkan hasil trace tersebut melewati jalur koneksi label MPLS pada IP 10.10.100.22 (router Core1) dan 172.15.1.33 (router PE2) pada jaringan VPN yang dikelola provider.

Dengan demikian didapat hasil pemisahan jalur koneksi dan pemetaan antar perusahaan antara Departemen Perhubungan dan Perusahaan Gas Negara ke masing-masing cabangnya pada router yang dikelola oleh provider. Sehingga untuk koneksi yang dikirim tidak akan bertukar dan tercampur walau dalam segment IP class yang sama.



Gambar 9 Grafik hasil pengujian latency

Pada Gambar 9, menunjukkan grafik hasil latency yang terjadi saat dilakukannya pengujian jalur koneksi untuk Departemen Perhubungan dan Perusahaan Gas Negara dari Jakarta ke Medan serta sebaliknya dalam waktu yang bersama – sama. Hasil tersebut didapat dari ping yang dilakukan di dalam aplikasi GNS3 tersebut.



Gambar 10 update routing pada VRF

Pada Gambar 10, menunjukkan cara kerja VRF dan update routing yang terjadi pada koneksi Departemen Perhubungan dan Perusahaan Gas Negara dari PE1 ke PE2. Untuk koneksi Departemen Perhubungan Jakarta ke Medan memiliki VRF name Dephub_A dengan nilai RD dan RT (100:1) pada PE1 dan PE2. Koneksi Departemen Perhubungan dari Jakarta ke Medan melintasi jaringan VPN dalam MPLS IP. Pada router CE Jakarta dengan IP 192.168.1.1/32 dikirim ke VRF Dephub_A yang ada pada PE1 (Jakarta) dengan nilai RD (100:1) menjadi VPNv4 prefix 100:1:192.168.1.1/32. Kemudian update routing di PE1 mengirimkan vpnv4 prefix tersebut ke router P (Core) dengan routing OSPF dan BGP. Untuk penentuan jalur router P yang akan dituju, routing BGP mengatur update informasi dan routing OSPF memilih jalur router P dengan nilai jalur terbaik dengan penilaian bandwidth, jarak dan kualitas jaringannya. Pada koneksi ini jalur P1 (core 1) yang memiliki nilai latency current 156 ms, average 202 ms dan maximum 248 ms. Pada router PE1 IP 192.168.1.1/32 di translasikan menjadi IP 172.15.1.29/32 dengan dimasukan nilai RT export 100:1. Nilai vpnv4 prefix 100:1:172.15.1.29/32 di kirim ke router P1. Pada P1 vpnv4 prefix 172.15.1.29/32 di ubah menjadi 10.100.10.6/32. Untuk melanjutkan ke router yang dituju, router P1 menerima update info RT import 100:1 pada IP 172.16.1.29/32 dari PE2. Router P1 meneruskan paket IP tersebut ke router PE2 dengan routing OSPF dan BGP dengan nilai vpnv4 prefix 100:1:10.100.10.6/32. Pada router PE2 vpnv4 prefix 100:1:10.100.10.6/32 di translasikan ke vpnv4 prefix 100:1:172.16.1.29/32. Saat sampai di PE2 vpnv4 prefix 100:1:172.16.1.29/32 ditranslasikan menjadi 100:1:192.168.3.1/32 setelah menerima update dari router customer Departemen Perhubungan dengan IP 192.168.3.1 dengan nilai RD 100:1, sehingga koneksi bisa berjalan sesuai dengan jalur yang telah di tentukan.

Pada koneksi Perusahaan Gas Negara Jakarta ke Medan memiliki VRF name Dephub_A dengan nilai RD dan RT (100:2) pada PE1 dan PE2. Koneksi Perusahaan Gas Negara dari Jakarta ke Medan melintasi jaringan VPN dalam MPLS IP. Pada router CE Jakarta dengan IP 192.168.2.1/32 dikirim ke VRF Gas_B yang ada pada PE1 diberikan nilai RD (100:2) menjadi vpnv4 prefix 100:2:192.168.2.1/32. Kemudian update routing di PE1 mengirimkan vpnv4 prefix tersebut ke router P dengan routing OSPF dan BGP. Untuk penentuan jalur router P yang akan dituju, routing BGP mengatur update info dan routing OSPF memilih jalur router P dengan nilai jalur terbaik dengan penilaian bandwidth, jarak dan kualitas jaringannya. Pada koneksi ini jalur P1 yang memiliki nilai latency current 196 ms, average 232 ms dan maximum 280 ms. Pada router PE1 IP 192.168.2.1/32 di translasikan menjadi IP 172.15.1.33/32 dengan dimasukan nilai RT

export 100:2. Nilai vpnv4 prefix 100:2:172.15.1.33/32 di kirim ke router P1. Pada vpnv4 prefix 172.15.1.33/32 di ubah menjadi 10.100.10.6/32. Untuk melanjutkan ke router yang dituju, router P1 menerima update info RT import 100:2 pada IP 172.16.1.33/32 dari PE2. Router P1 meneruskan paket IP tersebut ke router PE2 dengan routing OSPF dan BGP dengan nilai vpnv4 prefix 100:2:10.100.10.6/32. Pada router PE2 vpnv4 prefix 100:2:10.100.10.6/32 di translasikan ke vpnv4 prefix 100:2:172.16.1.33/32. Saat sampai di PE2 vpnv4 prefix 100:2:172.16.1.33/32 ditranslasikan menjadi 100:2:192.168.4.1/32 setelah menerima update dari router customer Departemen Perhubungan dengan IP 192.168.4.1 dengan nilai RD 100:2, sehingga koneksi bisa berjalan sesuai dengan jalur yang telah di tentukan.

Pada topologi jaringan yang dibuat, menunjukkan bahwa setiap perusahaan bisa terkoneksi ke cabang – cabang yang ada dilokasi tanpa harus tercampur dengan koneksi perusahaan yang ada di cloud VPN dalam MPLS IP. Adanya VRF sebagai pemisah koneksi trafik dan data suatu perusahaan dalam jaringan VPN tersebut. Pada hasil yang didapat provider selaku penyedia jaringan tersebut, membatasi dan mengatur lalu lintas yang akan dilakukan oleh setiap perusahaan dari pusat Jakarta ke cabang perusahaan yang ada di Medan dan Bogor. Dalam pengaturan lalu lintas tersebut, terdapat *Routing Protocols* dan *Domain MPLS* maka LDP (Label Distribution Protocol) dapat terbentuk sehingga router-router PE yang berada dibawah router-router Core tersebut saling berkomunikasi. Routing BGP dan OSPF sebagai routing yang ada di jaringan VPN dalam MPLS IP untuk mengatur update routing dan pemilihan jalur terbaik yang akan dilewatkan.

Hasil ping yang diperoleh dari router PE1 sebagai provider menunjukkan lalu lintas koneksi yang ada di PE1 menuju ke PE2 dengan hasil 100 percent dan nilai latency current 156 ms, average 202 ms dan maximum 248 ms untuk Customer Departemen Perhubungan. Sedangkan nilai latency current 196 ms, average 232 ms dan maximum 280 ms untuk Customer Perusahaan Gas Negara. Pada hasil trace terdapat keterangan bahwa jaringan perusahaan tersebut bisa terkoneksi dengan trace route terdapat label MPLS. Dengan adanya hasil tersebut koneksi jaringan antar perusahaan dengan menggunakan VRF tidak tertukar dikarenakan setiap perusahaan memiliki VRF_name yang didalamnya terdapat nilai RD dan RT. Untuk nilai RD 100:1 dan RT 100:1 untuk Departemen Perhubungan, sedangkan untuk nilai RD 100:2 dan RT 100:2 untuk Perusahaan Gas Negara. Sehingga komunikasi jaringan yang terbentuk bisa berjalan sesuai dengan topologi yang telah dibuat.

5. SIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari pembahasan adalah sebagai berikut:

1. Hasil yang diperoleh pada router PE1 sebagai provider menunjukkan lalulintas koneksi yang ada di PE1 (Jakarta) menuju ke PE2 (Medan) dengan hasil 100 percent dengan nilai latency 156 ms, average 202 ms dan maximum 248 ms untuk Customer Departemen Perhubungan. Sedangkan nilai latency 196 ms, average 232 ms dan maximum 280 ms untuk Customer Perusahaan Gas Negara.
2. Pada koneksi VPN, hasil trace tiap-tiap PE dengan VRF_Name masing-masing nilai RD 100:1 dan RT 100:1 untuk Departemen Perhubungan, sedangkan nilai RD 100:2 dan RT 100:2 untuk Perusahaan Gas Negara dapat saling mengenal antar PE Jakarta dengan PE Medan dan PE Bogor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. J. Pardede and I. Irmayani, "Implementasi Service Distribution Point Pada Jaringan MPLS Static Route Menggunakan Metode LDP Dan LSP," *Sinusoida*, vol. 26, no. 1, pp. 31–39, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.istn.ac.id/index.php/sinusoida/article/view/2269>
- [2] G. Purwoko and I. Irmayani, "Implementasi Secure Socket Layer Pada Virtual Private Network Untuk Pengamanan Komunikasi Video Conference," *Sinusoida*, vol. 22, no. 2, pp. 45–57, 2020, doi: 10.37277/s.v22i2.698.
- [3] Budi Sukmawan, 2022, Implementasi Jaringan MPLS VPN (Studi Kasus PT Supra Primatama Nusantara (BIZNET)), *AL MIKRAJ Jurnal Studi Islam dan Humaniora* Vol.3 No.1 (2022) Juli–Desember 2022 hal 126–139. E-ISSN:2745-4584 <https://ejournal.insuriponorogo.ac.id> DOI: 10.37680/almikraj.v3i1
- [4] Alexandrina, Alexandrina dan Ihsan Arief Nurhakim, Muhammad and Novel, Muhammad dan Gunar Setiadji, M.Eng, Tatang, 2013, Perancangan Jaringan Terpusat Menggunakan MPLS VPN dengan Failover Link pada CV. Rofa Food Indonesia. Jakarta: Universitas Bina Nusantara.
- [5] Kristanti Novi. 2016. Simulasi Jaringan Multiprotocol Label Switching (MPLS) Menggunakan Graphical Network Simulator (GNS3). Semarang: Universitas Diponegoro.
- [6] Nugroho, Kuku. 2018. Router Cisco Implementasi MPLS VPN. Yogyakarta: Teknosain
- [7] Siregar, Nur Fauzia. 2016. Perbandingan Implementasi Routing Protocol Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP) Dengan Open Shortest Path First (OSPF) Pada Jaringan Backbone USUNETA. Medan: Universitas Sumatera Utara
- [8] Sofana, Iwan. 2017. Cisco CCNA - CCNP Routing dan Switching. Bandung: Informatika Bandung.
- [9] Bertha Euginia, Theresia Ghozali, 2018, Simulasi Multi Protocol Label Switching Virtual Private Network (MPLS VPN) Dengan Virtual Local Area Network (VLAN) Menggunakan Router Mikrotik, *TESLA* Vol. 20 NO.2 Oktober hal 109-117
- [10] Farel. A & Bruce S. Davie, 2008, *MPLS Next Steps*, Morgan Kaufmann.
- [11] Henda, Wijaya. 2001, *Cisco Router*, Elek Media. Jakarta.
- [12] T. Lamle, 1996, *CCNA Cisco Certified Network Associate Study Guide, Second Edition*. Sybex.
- [13] B. Chriss, 2000, *Mastering Cisco Router*, Sybex.
- [14] Suryadi, M. T., 2002, *TCP/IP dan Internet*, Elex Media. Jakarta.
- [15] Hendra Wijaya, 2001, *Routing Protokol*, Elex Media. Jakarta.
- [16] Sukaridhoto, Sritrusta, 2016, *Jaringan Komputer 1*, Surabaya: Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.
- [17] Sukaridhoto, Sritrusta, 2016, *Jaringan Komputer 2*, Surabaya: Politeknik Elektronika Negeri Surabaya.

SISTEM KENDALI DAN MONITORING KONDISI RUANGAN UNTUK PENDERITA SLEEP APNEA BERBASIS IOT

M Febriansyah, Fazryan Dwicahya
Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Institut Sains Dan Teknologi Nasional Jakarta
E_mail: m.febriansyah@istn.ac.id

ABSTRAK

Sleep apnea adalah gangguan tidur serius yang ditandai dengan berhentinya pernapasan secara periodik selama tidur, yang dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan. Diperlukan suatu sistem untuk memantau dan mengontrol kondisi ruangan yang dapat mempengaruhi sleep apnea. Sistem akan memantau suhu, kelembaban, dan cahaya ruangan berbasis IoT dengan MQTT. Mikrokontroler ESP32 mengumpulkan data sensor dan mengirimkannya ke server pusat melalui protokol MQTT untuk dianalisis dan dipantau secara real-time. Protokol MQTT memastikan transmisi data yang andal dan efisien melalui jaringan berbandwidth rendah, yang membuatnya ideal untuk pemantauan terus-menerus. Sistem pengendali bertujuan untuk meningkatkan kualitas tidur dengan memastikan kondisi ruangan tetap nyaman dan optimal dengan mengaktifkan perangkat seperti kipas, humidifier, dan lampu secara otomatis sehingga tercipta lingkungan yang ideal bagi penderita sleep apnea.

Kata kunci: Sleep Apnea, MQTT, IoT.

ABSTRACT

Sleep apnea is a serious sleep disorder characterized by periodic cessation of breathing during sleep, which can lead to various health problems. A system is needed to monitor and control room conditions that can affect sleep apnea. The system will monitor the temperature, humidity, and lighting of the room based on IoT with MQTT. The ESP32 microcontroller collects sensor data and sends it to a central server via the MQTT protocol for real-time analysis and monitoring. The MQTT protocol ensures reliable and efficient data transmission over a low-bandwidth network, making it ideal for continuous monitoring. The control system aims to improve sleep quality by ensuring that room conditions remain comfortable and optimal by automatically activating devices such as fans, humidifiers, and lights to create an ideal environment for sleep apnea sufferers.

Keywords: Sleep Apnea, MQTT, IoT

1. PENDAHULUAN

Gangguan tidur serius yang ditandai dengan berhentinya napas secara berulang selama tidur (*Sleep apnea*) yang dapat mengganggu kualitas tidur dan menyebabkan berbagai masalah kesehatan seperti hipertensi, penyakit jantung, dan diabetes [1]. Oleh karena itu, menjaga kondisi ruangan yang optimal bagi penderita sleep apnea sangat penting untuk membantu mereka mendapatkan tidur yang lebih baik [2]. Internet of Things (IoT) memungkinkan integrasi berbagai sensor dan aktuator untuk menciptakan lingkungan yang saling terhubung. MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) dirancang untuk komunikasi yang ringan dan efisien, sehingga cocok untuk penerapan teknologi IoT. Dengan model Subscriber-Publisher memungkinkan perangkat untuk berkomunikasi dengan broker pusat dan bertukar data secara real-time.

Implementasi IoT dalam sistem kontrol ruangan otomatis melibatkan penggunaan sensor seperti sensor kelembaban, suhu, cahaya dan penggunaan aktuator yang mengontrol perangkat seperti AC, kipas dan humidifier. Broker MQTT bertindak sebagai perantara antara sensor, aktuator, dan aplikasi pemantauan. Aplikasi monitoring memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi ruangan secara real-time dan mengontrol perangkat yang terhubung [3]. Keuntungan sistem IoT dengan MQTT

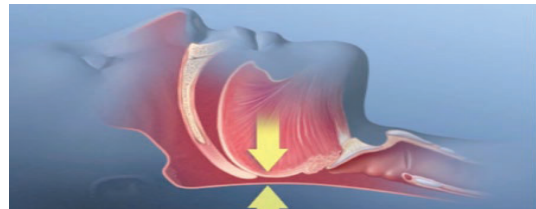
untuk sleep apnea termasuk respons cepat dan real-time, komunikasi efisien, monitoring berkelanjutan, dan peningkatan kualitas tidur. Dengan menjaga kelembaban ruangan pada tingkat optimal, dapat membantu penderita sleep apnea mendapatkan tidur yang lebih baik [4].

2. LANDASAN TEORI

Beberapa komponen pendukung fungsionalitas sistem kendali ruangan untuk penderita sleep apnea, yaitu :

2.1 Obstructive Sleep Apnea

Obstructive Sleep Apnea (OSA) adalah gangguan tidur di mana aliran udara terhambat atau terhalang meskipun ada usaha untuk bernafas. Gangguan ini menghasilkan berhenti napas sebagian (hipopnea) atau sepenuhnya (apnea) selama setidaknya 10 detik yang menyebabkan penurunan tajam dalam kadar oksigen darah.



Gambar 2.1 Terjadi Obstructive Sleep Apnea

Respons otak terhadap kekurangan oksigen adalah dengan memberikan sinyal pada tubuh untuk bangun

sejenak dari tidur sehingga dapat mengembalikan pernapasan menjadi normal. Pola ini dapat terjadi berulang-ulang kali dalam satu malam, mengakibatkan tidur yang terfragmentasi dan rasa kantuk berlebihan di siang hari. Sleep apnea dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, yaitu faktor lingkungan, faktor fisiologis dan faktor gaya hidup [6].

▪ Faktor Lingkungan

Mencakup kondisi eksternal yang dapat memengaruhi kualitas tidur dan kesehatan secara keseluruhan. Contoh seperti kebisingan, cahaya, kualitas udara.

▪ Faktor Fisiologis

Melibatkan kondisi tubuh dan kesehatan yang memengaruhi kemungkinan terjadinya sleep apnea, antara lain usia, jenis kelamin, Obesitas, anatomi saluran pernapasan.

▪ Faktor Gaya Hidup

Faktor kebiasaan yang melibatkan pola perilaku dan gaya hidup yang dapat memengaruhi sleep apnea, seperti merokok dan mengkonsumsi alkohol.

2.2 Aplikasi Web

Aplikasi web atau Web Apps adalah program atau software yang berbasis web serta bisa diakses hanya dengan menggunakan browser saja. Hal ini memungkinkan adanya interaksi dalam website dari pengguna (user) dengan server web tersebut.

Aplikasi web sering dimanfaatkan untuk situs e-commerce, online banking dan juga pengiriman formulir tertentu. Terdapat banyak sekali fitur yang tersedia di dalam Web Apps ini yang memungkinkan interaksi bisa dilakukan dengan lebih baik.



Gambar 2.2 Cara Kerja Aplikasi Web

Web Apps tidak mewajibkan pengguna untuk mengunduhnya, menjadikannya mudah diakses sekaligus mengeliminasi kebutuhan perawatan bagi pengguna akhir.

2.3 MQTT

MQTT (Message Queueing Telemetry Transport) adalah protokol komunikasi ringan yang dirancang untuk perangkat dengan sumber daya terbatas dan jaringan yang tidak stabil. Protokol ini dioptimalkan untuk pengiriman pesan yang cepat dan efisien, menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi IoT (Internet of Things). MQTT berjalan di atas protokol TCP/IP, yang memastikan pengiriman data yang handal antara perangkat yang terhubung [7].

MQTT menggunakan model komunikasi Subscribe-Publish, melibatkan 4 komponen utama, yaitu :

1. Publisher

Entitas yang mengirimkan pesan ke sistem MQTT.

Pesan ini dikirimkan dengan topik tertentu, yang berfungsi sebagai pengidentifikasi atau kategori untuk pesan tersebut.

2. Subscriber

Entitas yang berlangganan ke satu atau lebih topik untuk menerima pesan terkait.

Subscriber hanya menerima pesan yang relevan dengan topik yang mereka langgani.

3. Broker

Bertindak sebagai perantara yang menerima pesan dari Publisher, mendistribusikannya pada Subscriber yang berlangganan topik tersebut.

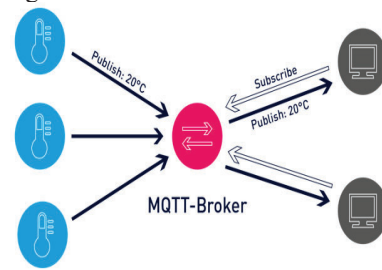
Broker juga memastikan keamanan, mengelola koneksi klien, dan mengelola lalu lintas pesan.

4. Topic

Sebuah string yang digunakan untuk mengategorikan pesan.

Topik bisa berupa "sensor/temperature/livingroom" yang menunjukkan data suhu dari ruang tamu.

Sistem topik yang terstruktur ini memungkinkan pengaturan dan distribusi pesan yang sangat efisien dalam jaringan yang besar.



Gambar 2.3 Cara Kerja MQTT

Dalam gambar 2.3 dapat terlihat bagaimana proses Subscribe-Publish terjadi. Publisher mengirimkan pesan (payload) dengan Topic tertentu ke Broker. Broker berperan sebagai perantara, menerima pesan dari Publisher dan meneruskannya kepada Subscriber yang berlangganan Topic terkait. Subscriber menerima pesan dari Broker sesuai dengan topik yang mereka langgani (Subscribe).

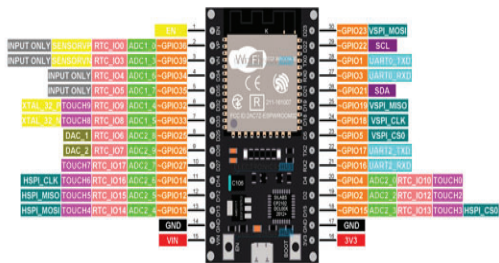
MQTT dirancang untuk komunikasi yang cepat dan efisien. Pesan-pesan dalam MQTT sangat kecil dan hanya membutuhkan bandwidth yang minim, menjadikannya ideal untuk perangkat dengan sumber daya terbatas atau koneksi jaringan yang lambat. Protokol ini didesain untuk meminimalkan penggunaan daya, sehingga cocok untuk perangkat yang menggunakan baterai. MQTT juga mampu menangani ribuan klien yang terhubung secara bersamaan, membuatnya ideal untuk implementasi IoT berskala besar.

Karena desainnya yang ringan, MQTT tidak ideal untuk mentransfer file besar atau data yang tidak terstruktur seperti video atau gambar. Jika broker mengalami kegagalan, seluruh sistem MQTT bisa terhenti, menjadikan broker sebagai titik kegagalan

tunggal yang memerlukan solusi seperti redundansi atau high-availability.

2.4 Mikrokontroler ESP32

ESP atau Espressif Systems Processors adalah mikrokontroler yang dikembangkan oleh perusahaan Espressif Systems, yang berbasis di China. Dikenal karena kemampuannya yang kuat dan harganya yang terjangkau, menjadikannya populer di kalangan pengembang IoT (Internet of Things). ESP32 merupakan mikrokontroler penerus ESP8266 yang telah terintegrasi dengan prosesor dual-core, memori flash, Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), dan berbagai antarmuka perangkat keras lainnya. ESP32 memperoleh popularitas yang tinggi dalam pengembangan berbagai aplikasi IoT karena kemampuannya yang luas dan fleksibilitas yang tinggi [8].



Gambar 2.4 Mikrokontroler ESP32

ESP32 terdiri dari 18 pin ADC (Analog Digital Converter) yang berfungsi untuk mengubah sinyal analog ke digital, 2 pin DAC (Digital Analog Converter) yang berfungsi untuk mengubah sinyal digital ke analog, 16 pin PWM (Pulse Width Modulation), 10 pin sensor sentuh, 2 pin jalur antarmuka UART, serta pin antarmuka I2C, I2S, dan SPI.

Tabel 2.1 Spesifikasi Mikrokontroler ESP32

Parameter	Spesifikasi
Tegangan	2.2V – 3.6V
Prosesor	Xtensa dual-core 32-bit
Jumlah IO pin	36 Digital 18 Analog Input
Konektivitas	Wifi 802.11 b/g/n Bluetooth BLE
Frekuensi Operasi	~240 MHz
Interfaces	UART, SPI, I2C, I2S, PWM, ADC

dilengkapi dengan prosesor Xtensa dual-core 32-bit, yang memberikan kemampuan pemrosesan yang kuat dan efisien untuk menjalankan berbagai tugas secara bersamaan. Dalam hal konektivitas, ESP32 mendukung jaringan WiFi 802.11 b/g/n dan Bluetooth Low Energy (BLE), memungkinkan dengan mudah terhubung ke internet atau perangkat lainnya, dengan frekuensi operasi hingga 240 MHz sehingga mampu menjalankan aplikasi yang memerlukan pemrosesan cepat dan responsif. Mikrokontroler ESP32 juga mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, I2C, I2S, PWM, dan ADC.

2.5 Sensor DHT22

Sensor digital yang mampu mengukur suhu dan kelembaban dengan tingkat akurasi cukup tinggi yang merupakan penerus dari DHT11 [9]. Sensor ini sering dipergunakan untuk pemantauan kondisi lingkungan. DHT22 menggabungkan sensor kapasitif kelembaban dan termistor untuk suhu, yang hasil pengukurannya dikonversi menjadi sinyal digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler seperti Arduino, Raspberry Pi, dan ESP. Karena Sensor ini sudah dikalibrasi dari pabrik, banyak yang menggunakannya karena mempermudah pengguna dalam implementasi sensor tanpa khawatir dengan akurasi yang berubah-ubah. Berikut ini merupakan spesifikasi dari Sensor DHT22.

Tabel 2.2 Spesifikasi Sensor DHT22

Parameter	Spesifikasi
Tegangan	3.3V ~ 6V
Arus Operasi	0.3µA (Standby) 5.5µA (Operasional)
Rentang Sensor Suhu	-40°C ~ 80°C ± 0.5°C
Rentang Sensor Kelembaban	0~100% RH ± 2%

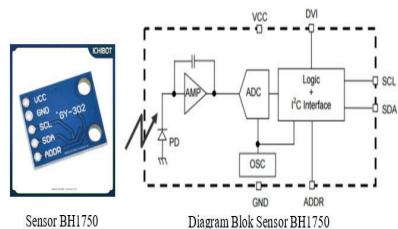


Tabel 2.2 menunjukkan bahwa sensor ini beroperasi pada rentang tegangan 3.3V hingga 6V, memungkinkan fleksibilitas dalam berbagai lingkungan daya. Memiliki arus operasi yang sangat rendah, yaitu 0.3µA dalam mode standby dan 5.5µA dalam mode operasional, sehingga sangat efisien dalam penggunaan energi.

Dalam hal pengukuran suhu, sensor DHT22 memiliki rentang yang luas dari -40°C hingga 80°C dengan akurasi ±0.5°C. Untuk kelembaban, sensor ini mampu mengukur dari 0 hingga 100% RH dengan akurasi ±2%. Spesifikasi ini menjadikan DHT22 pilihan yang ideal untuk aplikasi yang memerlukan pemantauan kondisi lingkungan dengan akurasi yang tinggi dan konsumsi daya yang rendah.

2.6 Sensor BH1750

Sensor cahaya yang menghasilkan keluaran sinyal digital, sehingga tidak memerlukan perhitungan yang rumit. BH1750 lebih akurat dan lebih mudah digunakan dibandingkan dengan sensor lain seperti fotodiode dan LDR yang menghasilkan keluaran sinyal analog serta memerlukan perhitungan untuk mendapatkan data intensitas cahaya [10].



Gambar 2.5 Sensor BH1750

Pada gambar 2.5 terlihat komponen utama dari sensor BH1750, yaitu :

- PD : Fotodioda adalah komponen sensor yang sensitif terhadap cahaya. Komponen ini mengubah cahaya menjadi arus listrik.
- AMP : Penguat (amplifier) memperkuat arus lemah dari fotodioda ke tingkat yang dapat diproses ADC.
- ADC : Pengonversi ADC mengubah sinyal analog dari penguat menjadi nilai digital.
- Logic : Unit logika memproses sinyal digital dari ADC untuk menghitung tingkat cahaya sekitar. Unit ini juga mencakup antarmuka I2C untuk komunikasi dengan mikrokontroler.
- OSC : Osilator internal menyediakan sinyal jam untuk operasi internal sensor.

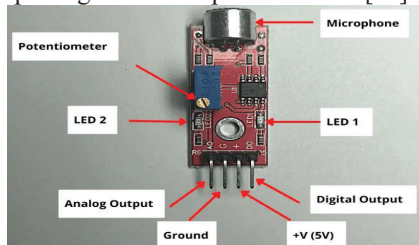
Tabel 2.3 Spesifikasi Sensor BH1750

Parameter	Spesifikasi
Catu Daya	3V ~ 5V
Arus Operasi	10µA (Standby) 120µA (Operasional)
Rentang Sensor	0 ~ 65335 Lux ± 20%

Tabel 2.3 menampilkan spesifikasi sensor BH1750. Dalam mode standby, sensor BH1750 hanya membutuhkan arus sebesar 10µA, sehingga sangat hemat energi ketika tidak aktif. Saat dalam mode operasional, sensor ini menggunakan arus sebesar 120µA. Memiliki rentang pengukuran yang sangat luas, yaitu dari 0 hingga 65335 lux, dengan akurasi ±20%. Hal ini menjadikannya sangat ideal untuk aplikasi yang memerlukan pengukuran tingkat cahaya dari kondisi sangat gelap hingga sangat terang.

2.7 Sensor KY037

Berfungsi mendeteksi intensitas suara dan mengubahnya menjadi sinyal listrik untuk diproses oleh mikrokontroler. Sensor ini beroperasi berdasarkan prinsip bahwa gelombang suara yang mengenai membran sensor akan menyebabkan kumparan kecil di balik membran tersebut bergerak naik dan turun [11]. Gerakan kumparan ini dipicu oleh kekuatan gelombang suara yang mengenainya. Perubahan posisi kumparan menghasilkan sinyal listrik dengan intensitas yang bervariasi tergantung pada kecepatan gerakan kumparan tersebut [12].



Gambar 2.6 Sensor KY037

Pada gambar 2.6 terlihat komponen utama sensor KY037 sebagai berikut :

- Q1 : Mikrophone - Menangkap gelombang suara dan mengubahnya menjadi sinyal listrik.
- VR1: Potentiometer-Mengatur sensitivitas deteksi suara.

- R1-R6: Resistors - Mengatur arus dan membagi tegangan dalam rangkaian.
- L1 dan L2: LED - Menunjukkan indikator visual dari deteksi suara.
- U1.1 dan U1.2: Operational Amplifiers (LM393) - Memperkuat sinyal dari mikrofon dan membandingkan dengan referensi.
- AO: Analog Output-Menghasilkan sinyal kontinu yang merepresentasikan intensitas suara.
- DO: Digital Output-Menghasilkan sinyal ON/OFF berdasarkan ambang batas suara.

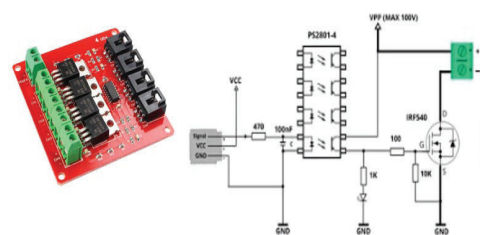
Tabel 2.4 Spesifikasi Sensor KY037

Parameter	Spesifikasi
Catu Daya	3.3V ~ 5.5V
Arus Operasi	~0.5 mA
Sensitivitas Mikrophone	-42 ± 3 dB
Output	Digital(DO) Analog(AO)

KY037 memiliki sensitivitas mikrofon sebesar -42±3 dB, yang memungkinkan sensor ini mendeteksi suara dengan tingkat presisi yang tinggi. Sensor ini menyediakan dua jenis output: digital (DO) dan analog (AO), yang memungkinkan integrasi yang mudah dengan berbagai jenis mikrokontroler dan perangkat lain. Output digital dapat digunakan untuk mendeteksi adanya suara di atas ambang batas tertentu, sementara output analog memberikan representasi kontinu dari tingkat suara yang terdeteksi. Spesifikasi ini menjadikan KY037 ideal untuk aplikasi yang memerlukan deteksi suara dengan akurasi tinggi dan fleksibilitas dalam penggunaan daya dan jenis output.

2.8 Modul MOSFET IRF540 4-Channel

Sistem ini menggunakan modul MOSFET IRF540 yang dapat mengontrol beban DC hingga 100V/10A dan sudah dilengkapi dengan Optocoupler yang berfungsi untuk melindungi MOSFET dari gangguan sinyal atau lonjakan tegangan yang dapat merusak MOSFET.



Gambar 2.7 Modul MOSFET IRF540 4-Channel (kiri) dan Skema Diagram Channel Modul (kanan)

Modul ini pada dasarnya adalah "Solid-State Relay" untuk arus DC. Maksimal 4 beban yang dapat dikendalikan secara individu dapat terhubung ke output terputus (+) dan (-), semuanya diberi daya dari satu daya yang sama. Komponen yang digunakan antara lain :

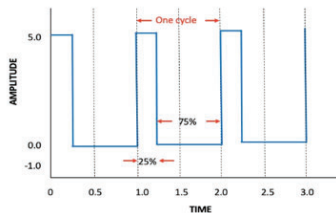
- IRF540 : Sebagai saklar elektronik untuk mengontrol aliran arus dalam rangkaian.
- PS2801-4 : Memungkinkan kontrol yang efisien dan isolasi listrik antara sinyal kontrol dan MOSFET,

memastikan bahwa sinyal yang mengendalikan MOSFET tidak mengganggu sirkuit lainnya.

- Resistor (470 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ) : Digunakan dalam rangkaian untuk membatasi arus dan membagi tegangan.
- Kapasitor (100 nF) : Berfungsi sebagai filter untuk menekan noise atau transien dalam rangkaian.

2.11 PWM

PWM (Pulse Width Modulation) merupakan teknik modulasi yang merubah lebar pulsa sinyal dengan nilai frekuensi dan amplitudo yang tetap. Sinyal tinggi PWM disebut juga dengan istilah on time dan sinyal rendah PWM disebut juga dengan istilah off time.



Gambar 2.8 Periode PWM

Gambar 2.8 menunjukkan sinyal PWM selama 3 (tiga) detik dengan 25% on time dan 75% off time, dengan 0V sebagai amplitudo rendah dan 5V sebagai amplitudo tinggi. Rumus untuk mencari lebar pulsa dan Duty Cycle.

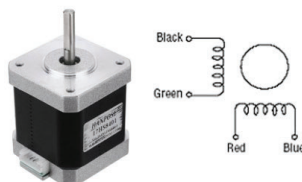
- Rumus Mencari Lebar Pulsa
 $T_{total} = T_{on} + T_{off}$ (1)
- Rumus Mencari Duty Cycle
 $Duty\ Cycle = (T_{on} / T_{total}) \times 100\%$ (2)
- Rumus Mencari Tegangan Output
 $V_{out} = Duty\ Cycle \times V_{in}$ (3)

Dimana :

- T_{total} = Waktu satu siklus pwm
- T_{on} = Waktu positif, T_{off} = Waktu negative
- Duty Cycle = lebar Siklus kerja PWM

2.12 Motor Stepper

Motor stepper adalah alat elektromekanis yang mengubah pulsa elektronik menjadi gerakan mekanis yang bersifat diskrit. Pergerakan motor stepper dipengaruhi oleh urutan pulsa yang diterimanya, sehingga memerlukan kontrol khusus untuk mengatur pergerakan dengan pulsa-pulsa yang periodik.



Gambar 2.9 Motor Stepper Nema 17

Berbeda dengan motor DC konvensional, motor stepper menawarkan beberapa keunggulan, seperti sudut rotasi yang sesuai dengan pulsa masukan, torsi penuh saat motor mulai bergerak, serta kemampuan untuk

menentukan posisi dan pergerakan dengan akurasi tinggi [13].

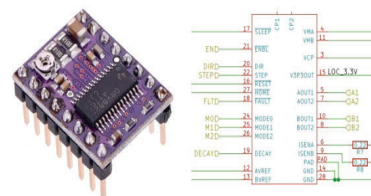
Tabel 2.5 Spesifikasi Motor Stepper Nema 17

Parameter	Spesifikasi
Catu Daya	12V
Arus Operasi	1.2A @ 4V
Sudut Step	1.8°
Jumlah Fasa	2

Tabel 2.5 memperlihatkan spesifikasi dari motor stepper Nema 17. Motor ini membutuhkan catu daya sebesar 12V untuk operasionalnya. Arus operasi motor ini adalah 1.2A pada tegangan 4V, yang menunjukkan kebutuhan arus untuk memastikan motor berfungsi secara optimal pada tegangan yang lebih rendah. Dengan sudut step sebesar 1.8 derajat, motor ini dapat bergerak dalam langkah-langkah kecil yang memungkinkan kontrol yang presisi dan ketepatan posisi, menghasilkan 200 langkah dalam satu putaran penuh. Motor ini juga memiliki dua fasa, yang memberikan kontrol yang lebih baik dan memungkinkan motor untuk bergerak dengan presisi tinggi.

2.13 Driver DRV8825

DRV8825 merupakan driver motor terintegrasi yang cocok untuk berbagai aplikasi seperti printer, scanner, dan peralatan otomatisasi lainnya. Perangkat ini dilengkapi dengan dua driver H-bridge dan satu pengatur mikrostepping yang dirancang untuk mengoperasikan motor stepper bipolar. Blok output driver terdiri dari beberapa MOSFET daya N-channel yang dikonfigurasi sebagai full H-bridges untuk menggerakkan kumparan motor stepper.



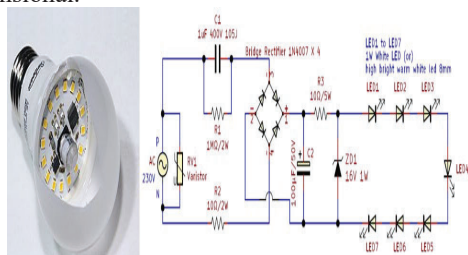
Gambar 2.10 Driver DRV8825

Driver ini mampu menangani arus hingga 2,5 ampere pada setiap output motor (dengan heat sink yang tepat, pada tegangan 24 Volt dan suhu 25°C). DRV8825 dapat diberi daya dengan tegangan suplai antara 8,2 V hingga 45 V dan menyediakan arus keluaran hingga 2,5 A pada skala penuh. Fitur STEP/DIR yang sederhana memudahkan interfacing dengan rangkaian mikrokontroler [14].

Fasilitas internal indexer pada driver ini memungkinkan eksekusi mikrostepping yang sangat akurat tanpa memerlukan kontrol arus dari mikrokontroler. Driver ini juga dilengkapi dengan 3 (tiga) pin MODE yang dapat digunakan untuk mengkonfigurasi mode motor stepper dari full-step hingga 32 mikrostep.

2.14 Lampu LED

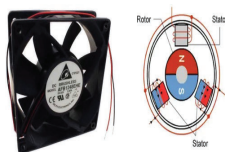
Lampu LED (Light Emitting Diode) adalah jenis lampu yang memanfaatkan dioda semikonduktor untuk memproduksi cahaya. Keunggulan lampu LED tidak hanya pada efisiensinya yang tinggi dalam penggunaan energi, tetapi juga pada umur pakainya yang lebih panjang, yang secara signifikan dapat mengurangi biaya listrik dan pemeliharaan. Lampu LED kini telah banyak digunakan di berbagai tempat, seperti di jalan raya, toko, dan bangunan komersial, menggantikan lampu pijar konvensional.



Gambar 2.11 Diagram Rangkaian Lampu LED

2.15 Kipas DC

Kipas DC mempunyai fungsi mengubah energi listrik menjadi energi elektromagnetik melalui tegangan DC dan induksi elektromagnetik, kemudian energi elektromagnetik menjadi energi mekanik dan terakhir menjadi energi kinetik sehingga menyebabkan baling-baling berputar.



Gambar 2.12 Kipas dan Motor DC

Motor dalam Kipas DC dilengkapi dengan sepasang magnet yang terletak pada bagian yang bergerak (Rotor), serta beberapa besi dengan lilitan kumparan pada bagian yang diam (Stator). Ketika arus listrik mengalir melalui kumparan besi, kumparan tersebut menjadi magnet. Sifat tarik-menolak magnet antara kumparan besi dan sepasang magnet menyebabkan magnet pada bagian Rotor akan berputar secara periodik. Hal ini menghasilkan gerakan yang diterjemahkan menjadi energi mekanik yang digunakan untuk menggerakkan bilah kipas.

2.16 Humidifier

Alat yang berfungsi untuk meningkatkan kelembaban udara dan kualitas udara dalam ruangan serta meredakan gejala kekeringan dan masalah pernapasan.



Gambar 2.13 Humidifier menyebarkan uap air

Humidifier bekerja dengan mengubah air menjadi kabut atau uap dan menyebarkannya ke udara. Humidifier

dapat membantu meredakan gejala kulit kering, bibir pecah-pecah, dan masalah pernapasan, serta mengurangi penyebaran virus dan bakteri yang terbawa udara. Namun, penting untuk menjaga tingkat kelembaban yang tepat, karena kelembaban berlebih dapat mendorong pertumbuhan jamur dan lumut. Dianjurkan untuk menjaga tingkat kelembaban dalam ruangan antara 30-50%, dan membersihkan serta mendisinfeksi humidifier secara teratur untuk mencegah penumpukan bakteri dan deposit mineral [15].

3. PERANCANGAN SISTEM

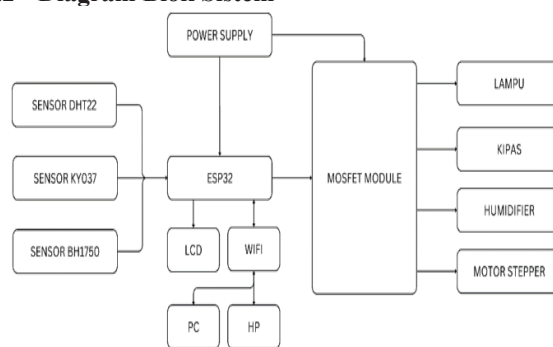
Perancangan sistem kendali ruangan untuk penderita sleep apnea meliputi pembuatan hardware dan juga software yang digunakan untuk memantau dan mengendalikan kondisi ruangan. Meliputi perancangan pada ESP32 dengan sensor DHT22, KY037 dan BH1750 serta aktuator-aktuator seperti LCD, lampu, kipas, motor stepper dan humidifier sedangkan perancangan software arduino menggunakan bahasa pemrograman dan compiler Arduino IDE.

3.1 Konsep Sistem Kendali Ruangan Untuk Penderita Sleep Apnea

Sensor DHT22 dan BH1750 diletakkan di dalam ruangan sebagai fungsi mendeteksi kondisi dan situasi ruangan penderita Sleep Apnea. Data suhu ruangan, tingkat kelembaban relatif, dan iluminasi ruangan akan dikirim ke broker MQTT secara real-time melalui ESP32. Selain itu, ESP32 juga akan melakukan Subscribe ke broker MQTT untuk mendapatkan data serta mengontrol lampu, kipas dan humidifier. Server juga akan Subscribe topik yang sama untuk mendapatkan semua data sensor untuk menghasilkan tampilan data-data sensor yang dapat diakses melalui aplikasi web. Server ini juga dapat melakukan Publish data kontrol untuk mengendalikan lampu, kipas dan humidifier secara manual.

Saat Sensor KY037 mendeteksi suara dengkur, maka ESP32 akan mengirim sinyal ke driver DRV8825 untuk mengontrol motor stepper yang akan menaikkan posisi bantal dalam upaya untuk menghentikan suara dengkur.

3.2 Diagram Blok Sistem



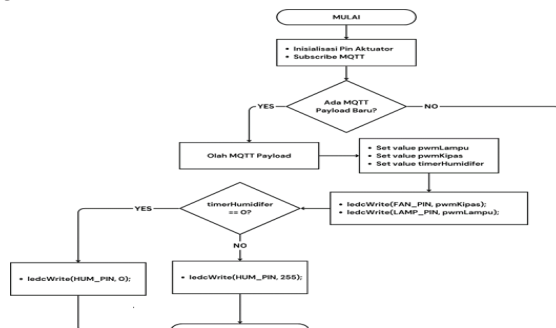
Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

Gambar 3.1 menunjukkan diagram blok dari sistem. Sensor DHT22, Sensor BH1750 dan sensor KY037 akan mengukur kebisingan, iluminasi, temperatur dan kelembapan ruangan. Data-data tersebut kemudian dikirim ke Mikrokontroler ESP32 yang akan mengolah data tersebut untuk mengendalikan aktuator berupa lampu, kipas, humidifier dan motor stepper melalui modul MOSFET. Data yang telah diolah akan dikirim melalui WiFi dan dapat diakses menggunakan Handphone atau komputer. Data tersebut juga ditampilkan di layar LCD.

3.3 Flowchart Kerja Sistem

Flowchart tidak hanya mempermudah proses pemrograman, tetapi juga membantu dalam memahami cara kerja dari sistem sehingga dapat menggambarkan alur kerja sistem secara keseluruhan.

3.3.1 Flowchart Proses Kontrol Manual Aktuator



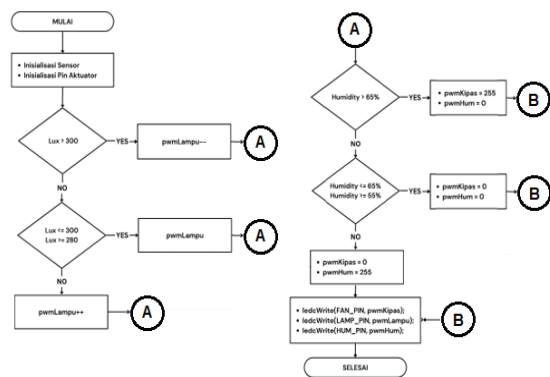
Gambar 3.2 Flowchart Kontrol Manual Aktuator

Dalam gambar 3.2 dapat dilihat proses loop kendali lampu, kipas dan humidifier secara manual. Proses akan melakukan inisialisasi pin pada mikrokontroler ESP32 yang digunakan untuk lampu, kipas dan humidifier, dan juga melakukan Subscribe ke topic “SENSOR/KONTROL” agar mikrokontroler ESP32 dapat menerima payload berupa nilai PWM dan nilai “auto mode” untuk mengendalikan aktuator. Proses kontrol manual hanya akan berjalan saat nilai “auto mode” yang diterima bernilai nol. Untuk mengendalikan lampu dan kipas, proses akan mengirimkan sinyal ke pin aktuator masing-masing sesuai dengan nilai PWM yang diterima. Sedangkan untuk mengendalikan humidifier, proses ini menggunakan nilai timer Humidifier untuk menentukan lama menyalanya humidifier dengan menggunakan sistem interval.

3.3.2 Flowchart Proses Kontrol Otomatis Kondisi Ruang.

Cara mengendalikan kondisi ruangan yang menggunakan lampu, kipas dan humidifier secara otomatis dengan menggunakan variable global Lux dan Humidity diperlihatkan flowchart 3.3.

Dalam gambar 3.3 dapat terlihat proses ini melakukan inisialisasi pin ESP32 yang digunakan untuk mengendalikan lampu, kipas dan humidifier. Proses ini juga memerlukan payload dari topic “SENSOR/KONTROL” untuk menentukan aktif tidaknya mode otomatis. Proses ini hanya akan berjalan saat nilai autoMode adalah 1.



Gambar 3.3 Flowchart Kontrol Otomatis Lampu, Kipas dan Humidifier

Untuk mengendalikan tingkat pencahayaan ruangan, proses ini menggunakan 3 logika sederhana untuk mengendalikan cahaya lampu. Logika tersebut antara lain :

1. Jika nilai Lux > 300, maka nilai pwmLampu akan terus berkurang.
2. Jika nilai Lux < 280, maka nilai pwmLampu akan terus bertambah.
3. Jika nilai Lux ≥ 280 dan ≤ 300 , maka nilai pwmLampu adalah tetap.

Sedangkan untuk mengendalikan tingkat kelembapan relatif ruangan, proses ini menggunakan 3 logika sederhana untuk mengendalikan kipas dan humidifier. Logika tersebut antara lain :

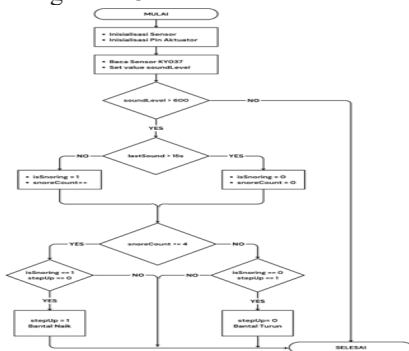
1. Jika nilai Humidity > 65, maka nilai pwmKipas adalah 255 dan nilai pwmHum adalah 0.
2. Jika nilai Humidity < 55 maka nilai pwmKipas adalah 0 dan nilai pwmHum adalah 255.
3. Jika nilai Humidity ≥ 55 dan ≤ 65 , maka nilai pwmKipas adalah 0 dan nilai pwmHum adalah 0.

Dimana Lux dan Humidity adalah nilai tingkat pencahayaan dan kelembapan ruangan yang dibaca sensor BH1750 dan DHT22. Setelah memperoleh nilai PWM lampu, kipas dan humidifier, proses lalu mengirimkan sinyal melalui pin masing-masing aktuator sesuai dengan nilai yang diperoleh.

3.3.3 Flowchart Proses Kontrol Otomatis Motor Stepper.

Pengaturan kontrol motor stepper melalui penggunaan data-data tingkat kebisingan dari sensor KY037. Proses ini akan menginisialisasi sensor KY037, pin DIR dan STEP untuk mengendalikan arah rotasi motor stepper dan hanya akan berjalan saat nilai autoMode adalah 1. Saat terdeteksi nilai soundLevel > 600, sistem akan memulai hitungan mundur. Apabila sensor kembali mendeteksi soundLevel > 600 dalam kurun waktu 15 detik, maka nilai *snoreCount* akan bertambah satu dan nilai *isSnoring* berubah menjadi 1. Sebaliknya, saat tidak ada soundLevel > 600 terdeteksi dalam kurun waktu 15 detik, maka *snoreCount* akan reset menjadi 0 dan nilai *isSnoring* berubah menjadi 0. Saat nilai *snoreCount* ≥ 4 , selanjutnya sistem akan memeriksa

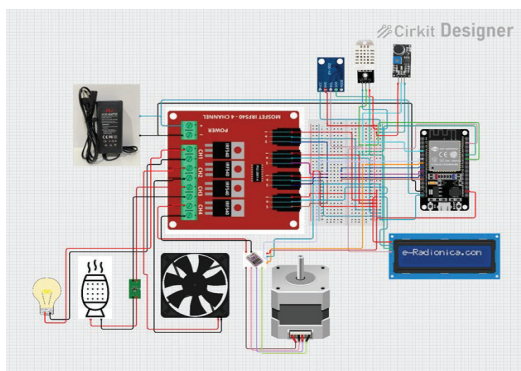
nilai *isSnoring* dan *stepUp* untuk mencegah terjadinya debounce atau pengulangan rotasi motor stepper. Jika nilai *stepUp* adalah 0 (nol) dan *isSnoring* adalah 1, maka motor stepper akan berputar searah jarum jam dan merubah nilai *stepUp* menjadi 1. Saat nilai *stepUp* adalah 1, proses memutuskan bahwa motor stepper telah menaikkan bantal sehingga tidak perlu menaikkan bantal lagi. Saat nilai *snoreCount* < 4, selanjutnya sistem akan memeriksa nilai *isSnoring* dan *stepUp*. Jika nilai *stepUp* adalah 1 dan *isSnoring* adalah 0, maka motor stepper akan berputar berlawanan arah jarum jam dan merubah nilai *stepUp* menjadi 0. Saat nilai *stepUp* adalah 0, proses memutuskan bahwa posisi bantal telah turun, sehingga motor stepper tidak perlu menurunkan bantal kembali. Cara kerja proses kontrol otomatis motor stepper diperlihatkan gambar 3.4.



Gambar 3.4 Flowchart Kontrol Motor Stepper

3.4 Wiring Diagram Sistem Keseluruhan

Berdasarkan wiring diagram dari Gambar 3.5, Mikrokontroler ESP32, MOSFET dan Aktuator mendapatkan daya langsung dari Adaptor 12V. Karena ESP32 menggunakan Base Board yang dilengkapi dengan Voltage Regulator, sehingga aman saat terhubung dengan daya hingga 16V. Sistem ini menggunakan 3 sensor yang terhubung ke ESP32 untuk memantau kondisi ruangan, yaitu sensor DHT22 untuk memantau tingkat kelembaban relatif dan suhu ruangan, sensor BH1750 untuk mengukur tingkat luminasi cahaya dan sensor KY037 untuk mendeteksi kebisingan suara dalam ruangan.



Gambar 3.5 Wiring Diagram Sistem Keseluruhan

Data-data kondisi ruangan diolah oleh ESP32 untuk mengendalikan aktuator berupa lampu, kipas, humidifier dan motor stepper secara otomatis. Lampu akan menyala sesuai dengan tingkat pencahayaan ruangan, humidifier dan kipas bekerja untuk menjaga nilai kelembaban ruangan menggunakan sensor DHT22 agar berada dibatas yang ditentukan, sedangkan motor stepper akan menaikkan bantal apabila suara dengkurkan terdeteksi. Semua Aktuator tersebut dikendalikan oleh ESP32 menggunakan MOSFET sebagai saklar elektronik.

Sensor BH1750 akan memantau pencahayaan ruangan secara realtime dan menghasilkan nilai pencahayaan dengan satuan lux. Karena sensor ini memiliki rentang pembacaan dari 0 hingga 65335 lux yang terbilang luas, maka hasil pembacaan Sensor BH1750 dalam sistem ini akan dibatasi dari 0 hingga 500 lux saja untuk menjaga simplifikasi data dan menghemat penggunaan memori ESP32.

Saat mode otomatis diaktifkan, sistem ini akan menjaga tingkat pencahayaan ruangan sekitar 280 hingga 300 lux [5] dengan mengatur daya yang diperoleh oleh lampu menggunakan PWM dan MOSFET sebagai saklar elektrik.

Sensor DHT22 akan membaca tingkat kelembaban dan suhu ruangan secara *realtime*. Pada saat nilai kelembaban yang diperoleh oleh sensor DHT22 < 55%, ESP32 akan menyalakan humidifier dan mematikan kipas hingga kelembaban ruangan mencapai 55%. Saat nilai kelembaban yang diperoleh oleh sensor DHT22 > 65%, ESP32 akan mematikan humidifier dan menyalakan kipas untuk mengurangi kelembaban ruangan hingga mencapai 65%. Apabila nilai kelembaban yang diperoleh oleh sensor DHT22 diantara 55% hingga 65%, maka humidifier dan kipas akan mati. Ambang bawah 55% dan ambang atas 65% ditetapkan untuk mencegah terjadinya siklus mati-nyala terlalu cepat yang dapat merusak ESP32, MOSFET ataupun kipas dan humidifier. Kipas dan humidifier dikendalikan menggunakan sinyal PWM dan MOSFET sebagai saklar elektronik yang dikendalikan oleh ESP32.

Sensor KY037 akan memantau tingkat kebisingan secara realtime. Sensor ini akan menghasilkan output berupa sinyal analog yang berbanding lurus dengan besarnya suara yang terdeteksi. Sensor KY037 diatur sensitifitasnya menggunakan potensiometer yang terdapat di sensor tersebut, sehingga sensor ini akan memperoleh sinyal antara 490 hingga 520 untuk tingkat kebisingan normal.

Pada saat suara menghasilkan sinyal > 600 terdeteksi, sistem akan memulai timer sebesar 15 detik [16]. Apabila dalam jangka waktu tersebut sensor kembali menghasilkan sinyal > 600, maka sistem memutuskan bahwa suara yang terdeteksi adalah dengkurkan, kemudian timer akan reset kembali menjadi 15 detik dan sistem mulai menghitung jumlah dengkurkan yang terdeteksi. Proses ini terus dilakukan secara berulang hingga jumlah

dengkuran yang terdeteksi mencapai lebih dari 3x, yang kemudian ESP32 akan mengendalikan motor stepper untuk menaikkan posisi bantal.

Pada saat sensor tidak mendeteksi suara dengan sinyal > 600 dalam 15 detik, sistem memutuskan dengkuran telah berhenti dan mereset jumlah dengkuran yang terdeteksi dan mengendalikan motor stepper untuk menurunkan bantal ke posisi semula.

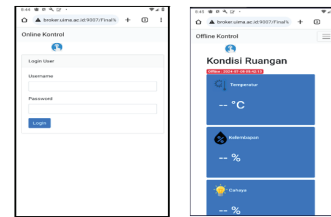
Adapun konfigurasi pin pada sensor BH1750, DHT22, KY037, Lampu, kipas, humidifier dan motor stepper adalah sbb :

- a) Sensor BH1750
 - Pin SCL sensor terhubung dengan pin 21 ESP32.
 - Pin SDA LCD terhubung dengan pin 22 ESP32.
- b) Sensor DHT22
 - Pin S (Sinyal) sensor terhubung pin 19 ESP32.
- c) Sensor KY037
 - Pin AO (Analog Output) pada sensor terhubung dengan pin 34 pada ESP32.
- d) Lampu
 - Kutub Positif dan Kutub Negatif socket lampu terhubung dengan pin output positif dan pin output negatif pada chanel 1 modul MOSFET.
- e) Kipas
 - Pin positif kipas terhubung dengan pin output positif chanel 2 modul MOSFET.
 - Pin negatif kipas terhubung dengan pin output negatif chanel 2 modul MOSFET.
- f) Humidifer
 - Kutub (+) step down converter terhubung pin output positif chanel 3 modul MOSFET.
 - Kutub (-) step down converter terhubung pin output negatif chanel 3 modul MOSFET.
 - Menghubungkan humidifier dengan step down converter menggunakan kabel USB.
- g) Motor Stepper
 - Pin positif fasa satu pada motor stepper terhubung dengan pin A1 pada DRV8825.
 - Pin negatif fasa satu pada motor stepper terhubung dengan pin A2 pada DRV8825.
 - Pin positif fasa dua pada motor stepper terhubung dengan pin B1 pada DRV8825.
 - Pin negatif fasa dua pada motor stepper terhubung dengan pin B2 pada DRV8825.

3.5 Perancangan User Interface

User interface yang digunakan untuk kontrol dan monitoring sistem adalah aplikasi Web yang dibuat menggunakan HTML, tetapi menggunakan protokol pengiriman data yang berbeda. Untuk Online kontrol, protokol yang digunakan adalah MQTT Over Websocket, yaitu dengan melakukan handshake dengan broker, Online kontrol akan terus mendapat payload yang dikirim oleh ESP32. Sedangkan untuk Offline kontrol, akan digunakan protokol HTTP request. Protokol ini digunakan karena Offline kontrol berada dalam jaringan yang sama dengan ESP32, sehingga HTTP request dapat dilakukan

dengan cepat (spam) tanpa gangguan keamanan, seperti yang terjadi saat melakukan spam HTTP request melalui internet.



Gambar 3.6 Tampilan awal Online kontrol (kiri) dan Offline kontrol (kanan)

Dari gambar 3.6 dapat terlihat bahwa Online kontrol memiliki halaman login karena aplikasi Web dapat diakses oleh siapapun yang mengetahui Web Address aplikasi tersebut. Sedangkan, Offline kontrol tidak memerlukannya karena aplikasi tersebut hanya bisa diakses saat alat yang digunakan untuk mengakses aplikasi berada dalam satu jaringan dengan ESP32.



Gambar 3.7 Menu navigasi aplikasi Web, Halaman Kondisi Ruang dan Halaman Kontrol Manual

Tampilan Online Kontrol pada aplikasi Web menampilkan Menu Kondisi Ruang, Kontrol Manual dan Logout. Halaman kondisi ruangan menampilkan data temperatur, kelembaban dan tingkat pencahayaan. Halaman ini juga menampilkan status konektivitas ESP32 dengan server. Untuk halaman Kontrol Manual memiliki 3 parameter input untuk mengendalikan lampu, kipas dan humidifier secara manual. Jika input lampu dan kipas menggunakan slider dengan jarak 0 sampai 100, untuk input humidifier berupa angka dan tombol On dan Off. Saat tombol On ditekan, aplikasi akan mengirim status on untuk menyalakan humidifier dan input angka sebagai countdown untuk mematikan humidifier secara otomatis dalam satuan menit. Tombol Off digunakan untuk mematikan humidifier secara manual dan mengabaikan countdown yang sedang berjalan. Selain itu, di halaman Kontrol Manual juga terdapat toggle untuk mengaktifkan mode otomatis. Saat toggle dalam keadaan menyala, itu menandakan bahwa sistem sedang berjalan dalam mode otomatis. Saat mode otomatis menyala, semua kontrol manual tidak dapat digunakan karena lampu, kipas dan humidifier dapat mengatur kelembaban dan cahaya ruangan secara otomatis.

4. HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengujian digunakan untuk menganalisis kinerja setiap komponen sehingga sistem kontrol dan monitoring ruangan penderita sleep apnea bekerja optimal. Pengujian seluruh sistem membantu mengevaluasi kinerja dan keberhasilan sistem.

4.1 Pengujian Sensor-Sensor

Pada tahap ini, nilai pembacaan sensor DHT22 akan dibandingkan dengan Hygrometer sedangkan sensor BH1750 akan dibandingkan dengan Lux Meter atau Light Meter.

➤ Hasil Pengujian Sensor DHT22

14:34:40.860	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:34:45.878	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:34:50.864	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:34:55.883	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:35:00.869	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.80
14:35:05.896	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.80
14:35:10.873	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:35:15.864	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:35:20.878	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:35:25.863	->	DHT	Suhu:28.80	DHT	Kelembapan:52.80
14:35:30.890	->	DHT	Suhu:28.90	DHT	Kelembapan:52.90
14:35:35.861	->	DHT	Suhu:28.70	DHT	Kelembapan:52.80
14:35:40.886	->	DHT	Suhu:28.80	DHT	Kelembapan:52.60
14:35:45.874	->	DHT	Suhu:28.70	DHT	Kelembapan:52.70
14:35:50.862	->	DHT	Suhu:28.70	DHT	Kelembapan:52.60
14:35:55.885	->	DHT	Suhu:28.80	DHT	Kelembapan:52.60
14:36:00.873	->	DHT	Suhu:28.70	DHT	Kelembapan:52.60



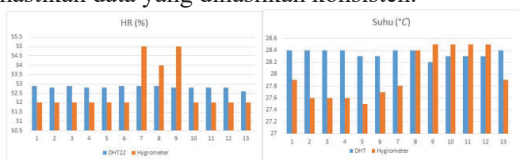
Gambar 4.1 Pembacaan DHT22 & Hygrometer

Gambar 4.1 menunjukkan hasil pengukuran nilai suhu dan kelembapan relative (HR) dimana nilai DHT22 akan dibandingkan dengan nilai Hygrometer. Kedua sensor diletakkan berdekatan agar dapat mengukur kondisi yang sama.

Tabel 4.1 Tabel hasil DHT22 & Hygrometer

t	Suhu (°C)		HR (%)	
	DHT22	Hygrometer	DHT22	Hygrometer
0	28,4	27,9	52,9	52
5	28,4	27,6	52,8	52
10	28,4	27,6	52,9	52
15	28,4	27,6	52,8	52
20	28,3	27,5	52,8	52
25	28,3	27,7	52,9	52
30	28,4	27,8	52,9	55
35	28,4	28,4	52,9	54
40	28,2	28,5	52,8	55
45	28,3	28,5	52,8	52
50	28,3	28,5	52,8	52
55	28,3	28,5	52,8	52
60	28,4	27,9	52,6	52
Rata-Rata	28,35	28	52,82	52,62

Hasil perbandingan diambil setiap 5 detik untuk memastikan data yang dihasilkan konsisten.



Gambar 4.2 Chart Perbandingan Pengukuran Suhu dan Kelembapan

Berdasarkan dari grafik perbandingan pada gambar 4.2, dapat diketahui nilai error HR dan selisih rata-rata suhu antara sensor DHT22 dan Hygrometer dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Percent Error HR} = \left| \frac{52,82 - 52,62}{52,62} \right| \times 100\% = 0.38\%$$

$$\text{Selisih Rata - rata Suhu} = |28,35 - 28| = 0.35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Berdasarkan datasheet DHT22, sensor tersebut memiliki rentang error pengukuran suhu sebesar $\pm 0.5^\circ\text{C}$ dan pengukuran HR sebesar 2%. Karena hasil perbandingan masih dalam rentang error pengukuran, maka dapat disimpulkan bahwa sensor DHT22 bekerja dengan baik.

➤ Hasil Pengujian Sensor BH1750

13:36:28.319	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:28.819	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:29.292	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:29.840	->	BH1750	Cahaya:30.83
13:36:30.343	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:30.813	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:31.331	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:31.847	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:32.320	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:32.836	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:33.305	->	BH1750	Cahaya:30.83
13:36:33.852	->	BH1750	Cahaya:30.83
13:36:34.311	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:34.828	->	BH1750	Cahaya:30.00
13:36:35.348	->	BH1750	Cahaya:30.83



Gambar 4.3 Perbandingan hasil pembacaan BH1750 dengan Lux Meter

Penempatan sensor BH1750 dan Lux Meter saat pengukuran harus berdekatan agar didapat hasil pengukuran kondisi pencahayaan yang sama.

Tabel 4.2 Tabel hasil BH1750 dan Lux Meter

NO	Lux	
	BH1750	Lux Meter
1	29,17	30
2	34,17	35
3	40,83	40
4	44,17	45
5	51,67	50
6	57,50	55
7	62,50	60
8	64,17	65
9	70,83	70
10	77,50	75
11	82,50	80
12	86,67	85
13	95,83	90
Rata-rata	61,35	60,00

Tabel 4.2 menampilkan perbandingan tingkat pencahayaan yang terdeteksi sensor BH1750 dan Lux Meter. Keragaman intensitas cahaya digunakan untuk memastikan bahwa sensor BH1750 dan Lux Meter dapat memberikan hasil pengukuran yang konsisten dan tepat dalam berbagai kondisi pencahayaan.

Berdasarkan hasil dari perbandingan tersebut, dapat diketahui nilai error sensor BH1750 dan Lux meter dengan menggunakan rumus sbb :

$$\text{Percent Error} = \left| \frac{61,35 - 60}{60} \right| \times 100\% = 2,25\%$$

Karena nilai error hasil pengujian masih berada di bawah 20% yang merupakan rentang error sensor BH1750, maka dapat disimpulkan sensor BH1750 bekerja dengan baik.

➤ Hasil Pengujian Sensor KY037

Pengujian dan kalibrasi sensor KY037 menggunakan beberapa data suara dengkur yang diperoleh dari sumber online, seperti soundsnap.com [16]. *SnoreCount* bertambah saat ada 2 (dua) suara terdeteksi yang melebihi threshold di bawah 15 detik. Jika suara terdeteksi kurang dari threshold atau waktu antara dua suara lebih 15 detik, maka *snorecount* akan reset menjadi 0 (nol).

Suara A, B dan D berhasil dideteksi oleh sensor secara baik dari jarak 4 cm dan 7 cm, tetapi gagal mendeteksi beberapa dengkur dalam jarak 10 cm. Suara C hanya berhasil terdeteksi 1 suara dengkur karena jarak antara dengkur yang melebihi threshold lebih dari

15 detik yang menyebabkan *snoreCount* dihitung ulang kembali dari 0.

Tabel 4.3 Kalibrasi Sensor KY037

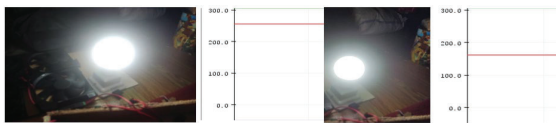
NO	Data Suara	Durasi (detik)	Jarak (cm)	snoreCount
1	Suara_A	34	4	5
2	Suara_A	34	7	5
3	Suara_A	34	10	3
4	Suara_B	32	4	5
5	Suara_B	32	7	5
6	Suara_B	32	10	4
7	Suara_C	53	4	1
8	Suara_C	53	7	1
9	Suara_C	53	10	0
10	Suara_D	61	4	8
11	Suara_D	61	7	8
12	Suara_D	61	10	5

4.2 Pengujian Kontrol Manual

Pengujian lampu, kipas, dan humidifier secara manual dilakukan untuk memastikan bahwa ketiga perangkat ini berfungsi dengan baik dan sesuai dengan kebutuhan. Hasil dari pengujian ini dapat digunakan untuk memastikan bahwa sistem kontrol manual yang melibatkan ketiga perangkat ini dapat bekerja secara optimal.

➤ Hasil Pengujian Kontrol Lampu Manual

Untuk melakukan pengujian lampu secara manual, dilakukan dengan menggerakkan slider pada input lampu dan mengamati perubahan cahaya lampu serta besar sinyal PWM yang dikirim oleh ESP32 melalui serial monitor Arduino IDE.

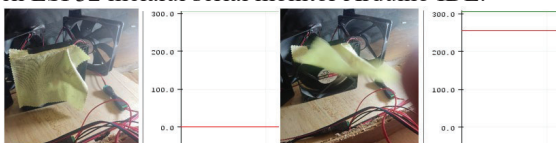


Gambar 4.4 Kontrol lampu dengan input 100% (Atas) dan 50% (Bawah)

Perbedaan terang cahaya lampu terlihat pada Gambar 4.4. Tampilan serial plotter menunjukkan perubahan besar sinyal PWM saat input dari kontrol berubah. Pada saat slider input Lampu digerakkan ke 100%, lampu menyala dengan terang dengan sinyal sebesar 255 PWM sehingga lampu menerima tegangan penuh sebesar $\pm 12V$. Saat slider input Lampu digerakkan 50%, menyebabkan cahaya lampu mulai meredup karena sinyal PWM yang dikirim menurun hingga mencapai 128 PWM sehingga lampu hanya menerima tegangan sebesar $\pm 6V$.

➤ Hasil Pengujian Kontrol Manual Kipas

Pengujian kipas dilakukan dengan menggerakkan slider pada input kipas dan mengamati perubahan kecepatan putaran dan besar sinyal PWM yang dikirim oleh ESP32 melalui serial monitor Arduino IDE.



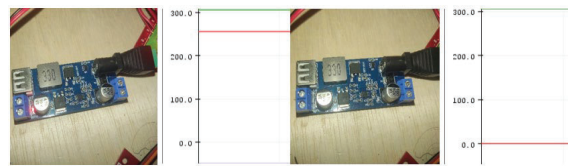
Gambar 4.5 Kipas Input 0% (kiri) dan 100% (kanan)

Gambar 4.5 menampilkan perbedaan kecepatan putaran kipas dengan input 100% dan 0%. Tampilan serial plotter menunjukkan perubahan besar sinyal PWM

yang dikirim ESP32 saat input dari kontrol berubah. Saat slider input kipas digerakkan ke value 100%, kipas berputar dengan kecepatan penuh ESP32 mengirimkan sinyal sebesar 255 PWM sehingga kipas menerima tegangan penuh sebesar $\pm 12V$. Pada saat slider digerakkan ke value 0% secara perlahan, kecepatan kipas akan menurun karena sinyal PWM yang dikirim juga menurun hingga mencapai 0 PWM sehingga kipas tidak menerima tegangan 0 volt.

➤ Hasil Pengujian Kontrol Manual Humidifier

Pengujian humidifier dilakukan dengan memasukkan durasi menyala humidifier yang diinginkan dalam satuan menit dan menekan tombol On untuk memulai timer. Tombol Off digunakan untuk mematikan humidifier secara manual.



Gambar 4.6 Humidifier dalam keadaan menyala (kiri) dan mati setelah timer selesai (kanan)

ESP32 mengirimkan sinyal PWM sebesar 255 (nilai maksimum) agar humidifier aktif dan bekerja. Ketika timer menghitung mundur hingga mencapai 0 atau tombol OFF ditekan oleh *user*, maka ESP32 mengubah sinyal PWM yang dikirimkan menjadi 0, menyebabkan humidifier berhenti beroperasi atau tidak aktif.

4.3 Hasil Pengujian Otomatis Lampu, kipas dan Humidifier

Perhatikan tabel 4.4, yang merupakan pengujian terhadap otomatis kipas dan humidifier.

Tabel 4.4 Pengujian Otomatis Kipas dan Humidifier

NO	Target HR	UI HR	Kipas	Humidifier
1	55% - 65%	76.84%	On	Off
2	55% - 65%	60.31%	Off	Off
3	55% - 65%	45.84%	Off	On

Saat kelembaban relatif (HR) aktual bernilai 76.84% (melebihi target) dari 55%-65%, maka kipas nyala untuk menurunkan kelembaban dan humidifier dimatikan. Setelah (HR) aktual bernilai 60.31% (dalam rentang target) dari 55%-65%, maka kipas dan humidifier dimatikan karena kondisi sudah sesuai target. Saat HR aktual bernilai 45.84% (di bawah rentang target) dari 55%-65%, maka kipas dimatikan dan humidifier dinyalakan agar kelembaban meningkat hingga mencapai target.

Saat tingkat pencahayaan aktual (17 lux) jauh di bawah rentang target yang diinginkan (280-300 lux), terang cahaya lampu akan meningkat. Setelah tingkat pencahayaan aktual (283 lux) mencapai rentang target yang diinginkan (280-300 lux), status lampu tetap karena pencahayaan sudah sesuai dengan target. Saat tingkat pencahayaan aktual (500 lux) jauh di atas rentang target yang diinginkan (280-300 lux), sehingga lampu

diredupkan untuk menurunkan tingkat pencahayaan ruangan hingga mencapai rentang target.

Tabel 4.5 Pengujian Lampu Otomatis

NO	Target Lux	UI Lux	Lampu
1	280-300	17	<i>Menerang</i>
2	280-300	283	<i>Tetap</i>
3	280-300	500	<i>Meredup</i>

4.4 Hasil Pengujian Motor Stepper

Motor Stepper untuk pengujian adalah Nema 17 yang dilengkapi dengan lead screw sebesar 8 mm. motor bergerak sebesar 8 mm untuk setiap putaran dengan sudut langkah 1.8°, sehingga memerlukan 200 step untuk melakukan satu putaran [17]. Jumlah putaran dan step untuk menggerakkan nut sebesar 100 mm atau 10 cm dapat ditemukan dengan rumus :

$$Step = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \text{ step}$$

$$Putaran = \frac{100mm}{8mm} = 12.5 \text{ putaran}$$

$$Total \text{ Step} = Putaran \times Step = 12.5 \times 200 = 2500 \text{ step}$$



Gambar 4.7 *snoreCount* mencapai nilai 4 (Kiri) dan pengujian motor stepper (kanan)

LCD menampilkan nilai *snoreCount* lebih besar dari 3, sehingga stepper mulai berputar searah jarum jam sebanyak 12.5 putaran dan nut akan naik sebesar 10 cm. Jika suara dengkur tidak terdeteksi dalam jangka waktu 15 detik, *snoreCount* akan me-reset nilai menjadi 0 dan stepper berputar berlawanan arah jarum jam dan nut akan turun sebesar 10 cm ke posisi awal.

5. SIMPULAN

Hasil dari perancangan, pembuatan, dan pengujian alat menunjukkan :

- Selisih rata-rata suhu pada sensor DHT22 dan Hygrometer adalah 0,35°C dan persentase error HR adalah 0,38% sedangkan Nilai error pada sensor BH1750 dan sensor Lux meter sebesar 2,25%.
- Data-data dari sensor-sensor dikirim ke database Server menggunakan protokol MQTT.
- Pengendalian Online menggunakan protokol MQTT Over Websocket dengan melakukan handshake dengan broker, sehingga akan terus mendapat payload yang dikirim oleh ESP32. Sedangkan pengendalian Offline menggunakan protokol HTTP request.

DAFTAR PUSTAKA

- A. M. Osman, S. G. Carter, J. C. Carberry, and D. J. Eckert, "Obstructive sleep apnea: current perspectives,".

- A. Lax, S. Colamartino, P. Banfi, and A. Nicolini, "Sleep-related breathing disorders and non-invasive ventilation,".
- E. Supriyadi and S. Dinaryati, "Rancang Bangun System Monitoring dan Kendali Listrik Rumah Tangga Berbasis ESP8266 NodeMCU," Jurnal Elektro, vol. 4, no. 4, 2020.
- C. Lou et al., "Human respiratory monitoring based on schottky resistance humidity sensors," Materials (Basel).
- S. Lappharat, N. Taneepanichskul, S. Reutrakul, and N. Chirakalwasan, "Effects of Bedroom Environmental Conditions on the Severity of Obstructive Sleep Apnea,".
- M. E. Billings, L. Hale, and D. A. Johnson, "Physical and Social Environment Relationship With Sleep Health and Disorders,".
- E. Rustami, R. Fitria Adiati, M. Zuhri, and A. Arif Setiawan, "Uji Karakteristik Sensor Suhu dan Kelembaban Multi-Channel Menggunakan Platform Internet of Things (IoT),".
- C. W. Hew and M. Ramasamy, "Development of a IoT Based Low Cost Wearable Smart Health Monitoring System for Elderly,".
- F. Marwita, A. Ariman, M. Febriansyah, and I. Iswoko, "Rancang Bangun Alat Ukur Kondisi Ruang Inkubator Bayi berbasis Komputer PC dan Aplikasi Android,".
- H. Rahman, A. F. Adziima, and S. F. Mujiyanti, "Otomatisasi Lampu Selasar Departemen Instrumentasi Menggunakan Light Intensity Detector Bh1750 Berbasis Expert System,".
- A. A. Al-Farzaq, H. Harmadi, and E. Elvaswer, "Wireless Data Logger Instrument for Indoor Acoustic Quality Measurement Based on Noise Background, Sound Distribution and Reverberation Time,".
- A. Muis and M. I. Thirafi, "Rancang Bangun Robot Pembersih Lantai dengan Sensor Suara,".
- Ooznest.co.uk, "Nema 17 stepper motor," Ooznest.Co.Uk.
- R. Kusmayanto, G. Heryana, and Jatira, "Perancangan Sistem Mekanik Penggerak Sumbu X Dan Y Pada Mesin CNC (Computer Numerical Control) CO2 Laser Cutting,".
- W.-T. Liu et al., "The impacts of ambient relative humidity and temperature on supine position-related obstructive sleep apnea in adults,".
- T. Khan, "A deep learning model for snoring detection and vibration notification using a smartwearable gadget,".
- S. Romadhon and A. Multi, "Design and Development of Real-Time Monitoring & Controlling Infant Incubator with Tilt Stabilizer Using Raspberry Pi Remotely Controlled via PC and Smartphone to Reduce Tilt during Baby Transfer,".

Penerapan Antena MIMO Pada Sistem Antena SISO

H. Heru Abrianto¹, Irmayani², Aroli Ignatius Zai³

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tama Jagakarsa, Jakarta

^{2,3}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Institut Sains dan Teknologi Nasional

E_mail: heruab@gmail.com

ABSTRAK

Perkembangan teknologi komunikasi bergerak dimulai dengan teknologi 2G kemudian berkembang ke 2.5G (GPRS), lalu meningkat ke teknologi 3G yang pada akhirnya berkembang lebih jauh lagi ke 3.5G (HSDPA) yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan akan peningkatan layanan data kepada pelanggan. Generasi berikutnya, *Long Term Evolution (LTE)* dirancang untuk menghasilkan luas cakupan yang yang besar dengan menggunakan teknik antena jamak seperti MIMO 2x2. Penerapan Sistem Antena *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* pada Sistem Antena *Single Input Single Output (SISO)* melalui analisa perhitungan *link budget* (antena SISO/MIMO ke *Mobile Station*) dan Analisa luas cakupan (*coverage*) atau biasa dikenal dengan *RSRP (Reference Signal Received Power)* menggunakan peralatan perencanaan (*desain tool*) IBwave. Penerapan Antena MIMO (2x2) pada Sistem Antena SISO, daya yang diterima secara keseluruhan sebesar 99,60% dimana sudah melampaui batas ambang yang ditentukan/*threshold* ($RSRP_{ths} \geq 95\%$ di level -95 dBm. Berdasarkan hasil pengujian luas area *coverage* mengalami peningkatan sebesar 8,6% secara keseluruhan.

Kata kunci: LTE, SISO, MIMO, coverage area, RSRP

ABSTRACT

The development of mobile communication technology starts with 2G technology and then develops to 2.5G (GPRS), then enhances to 3G technology which eventually develops further to 3.5G (HSDPA) which aims to meet the needs of improvement data services to customers. Next Generation, Long Term Evolution (LTE) is designed to produce a large coverage area using multiple antenna techniques such as MIMO 2x2. Planning for the Implementation of MIMO Antenna System at SISO Antenna Systems through analysis of link budget calculations (SISO/MIMO to MS antenna) and wide coverage analysis, commonly known as RSRP (Reference Signal Received Power) by using IB-Wave planning tools (design tool). Planning for the implementation of MIMO Antenna (2x2) at SISO Antenna System, at overall power received is 99.60% which has exceeded the specified minimum threshold ($RSRP_{ths} \geq 95\%$ at level -95 dBm. Based on the results of testing coverage area increased by 8.6% overall.

Keywords: LTE, SISO, MIMO, coverage area, RSRP

1. PENDAHULUAN

Dinamika teknologi dewasa ini sudah semakin sampai ke dunia teknologi yang lebih canggih. Diawali dengan teknologi komunikasi telepon *fixed line*, kemudian berkembang dengan teknologi seluler analog 1G (AMPS), sampai akhirnya ber-kembang ke teknologi seluler digital (GSM, CDMA/WCDMA dan LTE).

Berbagai penelitian dilakukan dalam rangka meningkatkan layanan dan performansi yang tinggi, sehingga membuat pengguna saat ini lebih banyak menggunakan jaringan telekomunikasi tanpa kabel karena beberapa kelebihan yang dimiliki seperti dapat digunakan dimana saja (Budiono, 2013).

Teknologi yang sedang dikembangkan dalam dunia jaringan broadband seluler yang secara khusus berfokus pada standar generasi berikutnya, yaitu 5G, menysasar spektrum gelombang milimeter 28 GHz dan seterusnya. Beberapa teknologi futuristik yang meletakkan

dasar bagi standar 5G, menyoroti konsep MIMO masif yang menggunakan susunan antena dan teknik beamforming untuk memenuhi tuntutan kecepatan data yang tinggi (Reddy, 2016).

Pada sistem komunikasi radio pada saat ini dibutuhkan kecepatan data yang tinggi, kapasitas yang besar, ukuran yang kecil dan bobot yang ringan (Arius, 2020). Antena adalah bagian penting dari perangkat komunikasi radio, berbagai metode digunakan untuk mengembangkan antena termasuk bahan, bentuk, dan ukuran antena sehingga kinerja antena yang tinggi dapat dicapai (Rahmania, 2019).

Sistem antena Multiple Input Multiple Output (MIMO) merupakan suatu sistem yang digunakan pada antena, baik di sisi pengirim maupun di sisi penerima, antena MIMO dapat meningkatkan kapasitas kanal tanpa membutuhkan peningkatan bandwidth maupun tambahan daya transmisi. Dengan

demikian laju transfer data yang tinggi, sistem yang handal dan area jangkauan yang lebih luas dapat tercapai (Ahmadi, 2015).

Sistem antena MIMO dapat diaplikasikan pada komunikasi radio, untuk WiFi dan WiMax (Abrianto and Irmayani 2023), (Ardianto, 2018). Sejalan dengan perkembangan teknologi perangkat komunikasi, banyak penelitian telah dilakukan pada antena. Antena berkembang cepat dan dapat dilihat dalam berbagai ukuran, bahan dan bentuk (Kustiawan, 2016).

Pengembangan dilakukan sesuai dengan kebutuhan dan aplikasi sistem transmisi gelombang mikro ke satelit. Antena yang diterapkan pada perangkat seluler harus memiliki dimensi kecil dengan daya pancar dan penerima yang baik. Fitur-fitur ini hanya dapat dicapai oleh antena microstrip, di mana antena ini memiliki ukuran kecil, tipis, berbagai pola radiasi dan mudah untuk membuatnya (Hidayat, 2019).

Dalam meningkatkan kinerja antena, antena dibentuk dan diatur dari beberapa antena yang disebut antena array. Susunan antena dapat berupa port tunggal atau banyak port (Syawaludin, 2016).

Perangkat komunikasi saat ini yang terdiri dari beberapa generasi dengan frekuensi kerja yang berbeda juga telah mengarah pada pengembangan teknologi antena yang bekerja pada multi frekuensi (Rahmadyanto, 2009).

Perkembangan teknologi komunikasi bergerak dimulai dengan teknologi 2G kemudian berkembang ke 2.5G (GPRS), lalu meningkat ke teknologi 3G yang pada akhirnya berkembang lebih jauh lagi ke 3.5G (HSDPA) yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan akan peningkatan layanan data kepada pelanggan.

Hal inilah yang mendorong dunia teknologi selular untuk lebih meningkatkan lagi penemuan barunya, yaitu dengan adanya teknologi baru yaitu 4G, yang lazimnya disebut dengan teknologi LTE. Adapun teknologi 4G ini dikembangkan dari teknologi sebelumnya, yaitu 3G, dimana sangat jauh berbeda dari infrastruktur yang diterapkan. Sebagai salah satu contoh: tidak dipergunakannya lagi *switch relay (RNC)* pada 3G yaitu dari site (*eNode_B*) terhubung langsung ke *core (Cloud System)* (Stefania et al., 2011)

Dalam penerapannya, ditemukan adanya perbedaan power yang dihasilkan oleh masing masing perangkat (*Node_B* untuk 3G dan *eNode_B* untuk LTE) yaitu, *EIRP (Effective*

Isotropic Radiated Power) pada 4G (LTE) lebih kecil dari pada 3G (*WCDMA*)

Pada keluaran *eNode_B* menghasilkan power yang lebih kecil dibandingkan dengan *Node_B* 3G (*WCDMA*) sehingga distribusi antena yang digunakan akan semakin kompleks. Penerapan perancangan teknologi baru (*New Technology Design*) pada LTE akan menghasilkan kecepatan data yang semakin tinggi. Teknologi menggunakan antena *Multiple Input Multiple Output (MIMO)* merupakan teknologi yang sudah diterapkan oleh operator telekomunikasi di Indonesia.

Dengan penerapan teknologi MIMO 2x2 pada jaringan teknologi LTE, akan menghasilkan luas area cakupan/*coverage* yang lebih besar (Irmayani, I., Anggraini 2023).

Hal inilah yang menjadi latar belakang penulisan penelitian ini untuk menganalisa penerapan Antena MIMO pada Sistem Antena *Single Input Single Output (SISO)* menggunakan teknologi 4G (*Long Term Evolution/LTE*) pada cakupan di dalam gedung (*Indoor Coverage*)

2. DASAR TEORI

2.1 Komunikasi menggunakan Teknologi Antena pada Jaringan LTE

Saat ini, dimana terjadi peningkatan kebutuhan akan kecepatan layanan data pada sistem komunikasi *wireless (Wireless Mobile Communication)*, dan sangat berkembang pesat di masyarakat, yang merupakan pengguna aktif dengan banyaknya piranti yang dipergunakan oleh pelanggan dalam mengakses layanan internet dan kebutuhan lainnya, seperti: *Smartphone, Modem, WiFi, Tablet Phone, Cloud Computing* dan lain sebagainya. Ada tiga hal yang perlu diperhatikan oleh setiap operator penyelenggara Layanan 4G (kemudian disebutkan sebagai LTE) yaitu: Kecepatan Tinggi (*High Speed*), Kualitas Multimedia yang Tinggi (*High Quality Multimedia*) dan Kapasitas Kanal yang besar (*Large Capacity*) (Cox, 2014).

LTE adalah sebuah standarisasi jaringan akses radio evolusi jangka panjang yang dikeluarkan oleh Third Generation Partnership Project (3GPP) dengan tujuan membangun sistem dengan kecepatan data yang sangat tinggi dengan latency yang rendah. Secara umum, LTE didesain untuk mencapai kecepatan data maksimum 100 Mbps untuk arah downlink dan 50 Mbps untuk arah uplink (3GPP, 2011).

Hal inilah yang menuntut para Operator Telekomunikasi yang berlisensi untuk menjawab kebutuhan pengguna atau pelanggan untuk dapat berkomunikasi dan mengirimkan data yang berupa suara (*voice*) atau pun gambar (*streaming*) dan video (*multimedia*) dengan kecepatan yang mumpuni dan kualitas yang terbaik.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengana-lisa penerapan perencanaan teknologi LTE pada cakupan dalam gedung (*Indoor coverage*) agar dapat memenuhi kebutuhan pelanggan dari operator telekomunikasi PT. XL Axiata, Tbk, dan untuk memastikan luas cakupan dengan menggunakan Sistem Antena MIMO lebih baik dari Sistem Antena SISO.

Pada teknologi dasar antena indoor banyak dikenal dengan beberapa jenis antena yang biasanya dipertimbangkan untuk dipakai dalam perencanaan penerapan antena. Hal ini tergantung kepada kemampuan dari beberapa antena yang didesain untuk dapat memberikan kontribusi pada saat Pemancaran (*Tx: Transmitter*) dan/atau Penerimaan (*Rx: Receiver*), dimana dalam teknologinya dapat diklasifikasikan dalam beberapa jenis yaitu: SISO (*Single Input Single Output*), SIMO (*Single Input Multiple Output*), MISO (*Multiple Input Single Output*) dan MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

2.2 Teknologi Antena

MIMO adalah teknologi antena untuk komunikasi nirkabel di mana beberapa antena yang digunakan pada kedua sumber: pemancar (*transmitter*) dan tujuan/penerima (*receiver*). Antena pada setiap akhir dari rangkaian komunikasi digabungkan untuk meminimalkan kesalahan dan mengoptimalkan kecepatan data. MIMO adalah salah satu dari beberapa bentuk teknologi antena cerdas. Komunikasi nirkabel menggunakan sistem Antena MIMO memungkinkan peningkatan efisiensi spektrum untuk total daya pancar yang diberikan. Antena MIMO dapat bekerja pada WLAN dan WiMax yang bekerja pada frekuensi 2.4 dan 5 GHz, dan memiliki gain yang tinggi (Abrianto and H.Mukdien 2022).

Peningkatan kapasitas dicapai dengan memperkenalkan saluran spasial tambahan yang dieksploitasi dengan menggunakan ruang-waktu *coding*. Faktor-faktor yang mempengaruhi sistem MIMO termasuk kompleksitas saluran, gangguan eksternal dan kesalahan estimasi kanal. Istilah *multichannel* menunjukkan bahwa penerima menggabung

kan beberapa antena dengan menggunakan adaptasi ruang waktu frekuensi. Sistem pengolahan MIMO adalah pengembangan komunikasi *array* antena (Szini et al., 2014).

Penggunaan *transmit diversity* telah diteliti baru-baru ini dimana keuntungan komunikasi MIMO, yang mengeksploitasi saluran fisik antara jumlah pengiriman (*transmitter*) dan jumlah penerimaan (*receiver*) pada antena mendapatkan hasil yang signifikan. Sementara channel bisa jadi *non-stasioner* yang tidak dapat diperkirakan dalam pengertian yang bermanfaat, sistem MIMO memberikan sejumlah keunggulan dibandingkan komunikasi tunggal-antena ke tunggal-antena. Sensitivitas terhadap fading dapat dikurangi dengan tata ruang keragaman yang disediakan oleh beberapa jalur spasial.

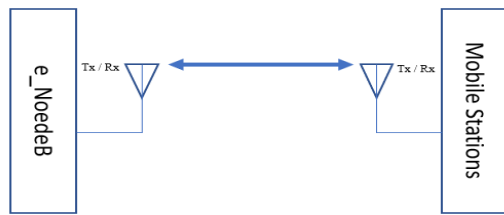
Secara spesifik penerapan perencanaan untuk MIMO berdasarkan beberapa parameter perhitungan dalam simulasi perbandingan antara 2 (dua) jenis antena MIMO yang berbeda, yaitu dalam bahasa sederhananya adalah perhitungan desain penempatan antena MIMO dalam simulasi perhitungan terhadap *MS* (user/pengguna)

Dalam penggunaan antena memang berbeda-beda untuk desain penempatannya, dan pembahasan dalam penelitian ini dirancang untuk perencanaan dalam melayani cakupan dari Antena SISO (*Single Input Single Output*) dan MIMO (*Multiple Input Multiple Output*).

Desain dari perencanaan penerapannya beserta simulasi dari penjelasan diatas untuk antena MIMO yang dibahas dari penelitian ini dibahas dalam detail selanjutnya.

2.3 Teknologi Antena SISO

SISO (input tunggal, output tunggal) mengacu pada sistem komunikasi nirkabel di mana satu antena digunakan di sumber (pemancar) dan satu antena digunakan di tujuan (penerima). Konsep teknologi antena SISO diciptakan dengan tunggal-input dan tunggal-output, ditunjukkan pada gambar 1. SISO juga memiliki kecepatan data yang berkurang dalam kondisi saling berhadapan. SISO adalah teknologi antena paling sederhana, dimana sistem antenna SISO rentan terhadap masalah yang disebabkan oleh efek multipath.



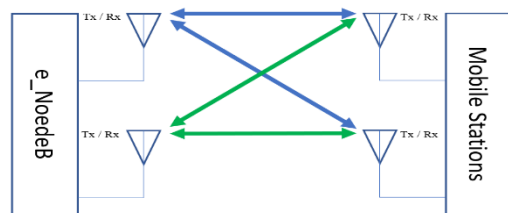
Gambar 1 Sistem antenna SISO

2.4 Teknologi Antena MIMO

Konsep teknologi antena MIMO 2x2 diciptakan berdasarkan kebutuhan untuk menghasilkan luas cakupan yang lebih besar. Suatu desain antena MIMO 2x2 yang baik mengharuskan setiap pasangan antena memiliki *power loss* yang sama untuk mendapatkan *gain* yang sama untuk mengoptimalkan kapasitas MIMO 2x2 (Bhagya et al., 2012)

Sistem MIMO (Multiple Input Multiple Output) merupakan suatu sistem wireless yang dapat meningkatkan kapasitas kanal dengan menggunakan multi antena di sisi pengirim maupun di penerima (Ardianto et al., 2018).

MIMO dikondisikan dengan penggunaan multiantena pada pemancar dan penerima yang bekerja pada frekuensi yang multiple in ini berarti sistem mengirimkan dua atau lebih sinyal radio dengan simultan. Multiple out berarti dua atau lebih sinyal radio didapatkan pada penerima. Secara umum keunggulan dari sistem MIMO adalah dengan multiantena dapat mengirimkan banyak sinyal dan menerima banyak sinyal.



Gambar 2 Sistem antenna MIMO

Dalam sistem MIMO, informasi yang sama dapat dikirim dan diterima dari beberapa antena secara bersamaan. Fading antara antena pemancar dan penerima dapat dianggap independen, sehingga probabilitas terdeteksinya informasi yang akurat akan lebih tinggi. Fading sinyal dapat dikurangi dengan teknik diversity yang berbeda, di mana sinyal ditransmisikan melalui beberapa jalur fading yang independen dalam waktu, frekuensi atau ruang yang dikombinasikan secara konstruktif pada penerima.

Tuntutan peningkatan data rate dan kualitas layanan dari suatu sistem komunikasi wireless memicu lahirnya teknik baru untuk meningkatkan efisiensi spektrum dan perbaikan kualitas saluran. Sistem MIMO (Multiple Input Multiple Output) merupakan suatu sistem wireless yang dapat meningkatkan kapasitas kanal dengan menggunakan multi antena di sisi pengirim maupun di penerima

Pada fungsi diversity-nya data yang dipancarkan pada setiap antena pemancar adalah sama. Kemudian dapat digunakan metode transmitter selection diversity untuk memilih satu pemancar saja dengan kualitas terbaik. Sedangkan pada penerima digunakan metode combining (EGC/MRC) untuk mendapatkan diversitas murni. Model diversity digunakan untuk mengurangi galat akibat fading dan noise dengan diversitas antena pada pemancar dan penerima.

Pada fungsi multiplexingnya data masukan dapat dipecah menjadi beberapa bagian yang independen dan dikirimkan oleh masing-masing antena pemancar yang bekerja pada frekuensi yang sama. Keuntungan utama MIMO multiplexing didapatkan dengan mengirim sinyal yang berbeda pada bandwidth sama dan dapat disandikan dengan tepat pada penerima. Jadi seperti terdapat satu kanal untuk satu pemancar.

2.5 Perangkat pendukung penerapan perencanaan dalam gedung.

Penggunaan perangkat pendukung dalam penerapan perencanaan dalam gedung juga sangat diperlukan untuk menghantarkan sinyal yang dihasilkan dari Radio Unit untuk sampai ke Antena pemancar, baik itu antena SISO maupun antena MIMO. Adapun jenis perangkat yang dipergunakan dalam rancangan untuk pembagian distribusi koneksi ke antena dapat berupa Perangkat Pasif, yaitu: perangkat yang bertujuan untuk membagi distribusi koneksi dari Radio Unit. Sedangkan penggunaan Perangkat Aktif, yaitu: bertujuan untuk memberikan penguatan sinyal yang sudah lemah sebelum menuju antena agar output sinyal power yang dipancarkan antena dapat maksimal.

Penerapan Antena MIMO pada Sistem Antena SISO menggunakan Radio Unit yang menghasilkan daya pancar utama dan menjadi sistem yang mengintegrasikan luas cakupan area indoor dengan suatu jaringan LTE operator, dimana biasa disebut sebagai Pico

Cell, dengan memasang Radio Unit Ericsson yang memiliki daya/power + 13,47 dBm.

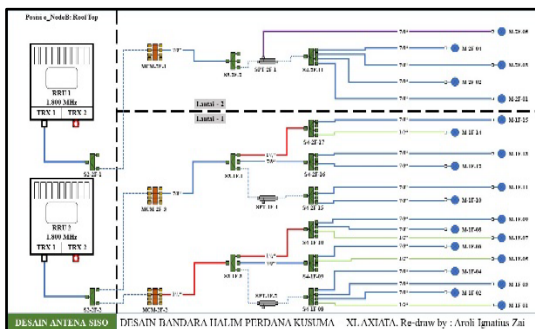
3. PERENCANAAN ANTENA DALAM GEDUNG

3.1 Perencanaan Antena.

Salah satu tempat untuk dilakukan perencanaan jaringan seluler adalah lantai 1 dan lantai 2 dalam gedung. Hal ini untuk melayani pelanggan pada area terminal kedatangan dan keberangkatan di Bandar Udara Halim Perdana Kusumah Jakarta. Untuk mengatasi hal tersebut, perlu dilakukan perencanaan jaringan LTE dalam gedung, agar pelanggan yang berada di dalam gedung dapat menikmati layanan komunikasi data yang cepat dan handal, karena pada era digital ini para pelanggan menuntut adanya layanan komunikasi data yang cepat dan handal serta dapat diakses dimanapun dan kapanpun.

Pada perencanaan ini dilakukan perhitungan untuk mendapatkan jumlah antena yang digunakan menggunakan alat perancangan (*IB-Wave design tools*). Penempatan indoor antena MIMO pada lantai 1 dan lantai 2 menggunakan teknologi LTE pada frekuensi 1800 MHz. Antena MIMO yang akan digunakan memiliki pola radiasi *omni-directional*.

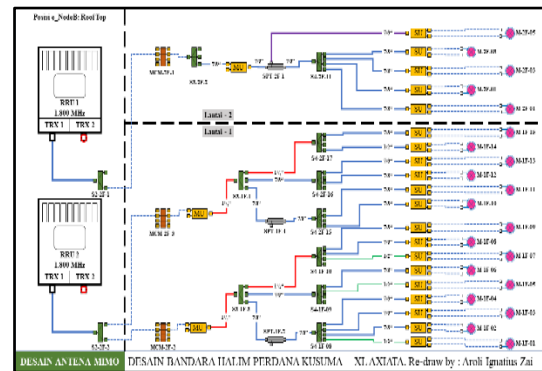
Sebelum melangkah lebih jauh untuk mengetahui bagaimana penerapan antena MIMO, terlebih dahulu mengetahui kondisi sistem antena SISO eksisting yang menjadi system dasar dalam penelitian ini.



Gambar 3 sistem antena SISO eksisting

Selanjutnya penerapan antena MIMO, dapat ditampilkan pada gambar 4 dimana XL Axiata, Tbk, merencanakan untuk menerapkan perencanaan untuk lantai 1 dengan jumlah 15 (lima belas) antena MIMO dan untuk lantai 2 dengan jumlah 5 (lima) antena MIMO dengan posisi Radio Unit ditempatkan pada posisi atas gedung (Roof Top), menjadi totalnya 15 (lima belas) antena yang direncanakan.

Dengan masing-masing jarak posisi antena yang bervariasi satu sama lain dengan tujuan untuk meliputi semua area cakupan Gedung seluas 6.047,98 m². Sedangkan jarak posisi antena terhadap lokasi Radio Unit juga bervariasi yang menyebabkan panjang kabel juga berbeda-beda.



Gambar 4 Penerapan sistem antena MIMO

3.2 Perhitungan Nilai Parameter.

Untuk merencanakan penerapan distribusi antena dalam *DAS (Distribution Antena System)* memerlukan perencanaan yang matang dengan memperhatikan aspek perhitungan rugi-rugi (*loss*) dari setiap Perangkat Pasif (perangkat yang tidak memberikan penguatan signal/*Gain*) yang dipergunakan, sehingga mendapat hasil perencanaan yang memiliki daya pancar yang maksimal. Dimana dalam pendistribusian koneksinya dari *Radio Unit (RU)* ke Antena membutuhkan perangkat penghubung (Kabel dan Konektor) dan pendistribusi (*Splitter, Tapper, MCM*) Jumlah rugi-rugi secara keseluruhan yang lebih sering dikenal dengan *Total Loss* adalah jumlah rugi-rugi transmisi di media koneksi dari *Radio Unit* ke Antena.

Perhitungan *Link Budget* untuk *RSRP* dengan menggunakan *Desain Tool* adalah merupakan perhitungan arlgoritmik/prediksi penyebaran sinyal yang memperhitungkan level daya penerimaan (*RSRP*) memperhitungkan luas cakupan area (*coverage plot area*)

XL menerapkan Level daya *threshold (RSRP_{ths})* adalah $\geq -95,00$ dBm dengan luas meliputi cakupan $\geq 95,00\%$. Apabila luas cakupan penerapan perencanaan sudah lebih dari $\geq 95\%$ meliputi semua area gedung (*ondor coverage area*) di level penerimaan $\geq -95,00$ dBm, maka perencanaan dalam gedung (*desain indoor*) tersebut dapat diterima untuk diimplementasikan.

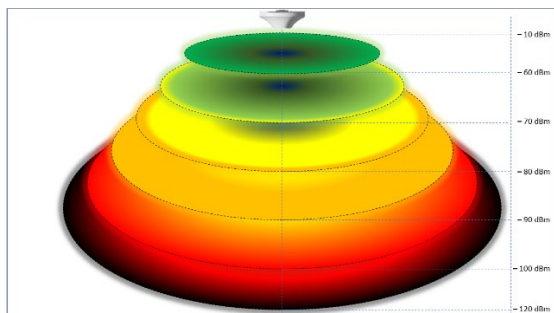
Adapun perhitungan dilakukan secara bertahap sebagai berikut:

- a. Rugi-rugi dan penguatan perangkat
- b. Link Budget
- c. Prediksi RSRP pada *Design Tool*.

Dalam hal ini, tidak diuraikan lebih detail mengenai cara kerja algoritmik desain tools yang dipergunakan *IB-Wave*, akan tetapi lebih kepada analisa penerapan menggunakan Antena SISO (*RSRP coverage plot area DAS SISO*) terhadap Antena MIMO (*RSRP coverage plot DAS MIMO*)

Design Tools *IB-Wave* menggambarkan hasil penerapan antena SISO dan MIMO yang didapatkan pada umumnya sama. Hanya saja yang membedakan pada hasil akhir coverage plot area RSRP (*Reference Signal Received Power*) dikarenakan komponen peralatan yang menjadi dasar perencanaan. Dalam hal ini, Sistem Antena MIMO akan memiliki tambahan perangkat seperti *MU (Main Unit)* dan *SU (Service Unit)* sebagai tambahan jalur input dalam MIMO 2x2.

Adapun pola perhitungan dari RSRP yang dihasilkan mengikuti kaidah-kaidah yang digambarkan pada gambar 5



Gambar 5 RSRP level legend

4. HASIL dan Pembahasan

4.1 Penerapan Sistem Antena SISO

Dalam rancangan penempatan *antena SISO* pada pada lantai 1 dan lantai 2 yang perlu diperhatikan adalah luas cakupan dari antena. Dari luas cakupan ini dapat menentukan jarak yang dibutuhkan antar antena yang akan dipasang dalam gedung selain pendukung parameter lainnya. Pada gambar 3 jumlah antena MIMO yang akan ditempatkan pada lantai 1 adalah 15 (lima belas) antena dan lantai 2 adalah 5 (lima) antena. Dalam perencanaannya memerlukan beberapa perangkat untuk merencanakan *DAS SISO* dengan detail yang ditunjukkan pada table 1.

Tabel 1 Perangkat eksisting *DAS SISO*

No.	Perangkat	Jumlah	No.	Perangkat	Jumlah
1.	Radio Unit	2 Unit	7.	MCM 4 W	3 Unit
2.	Antena SISO	20 Unit	8.	Kabel Jumper (3 meter)	2 buah (dan konektor)
3.	Spliter 2 W	2 Unit	9.	Kabel 1 1/4 "	1.717,38 meter
4.	Spliter 3 W	3 Unit	10.	Kabel 7/8 "	739,73 meter
5.	Spliter 4 W	7 Unit	11.	Kabel 1/2 "	55,31 meter
6.	Tapper 2 W	3 Unit	12.	Konektor	72 buah

Untuk perhitungan selengkapnya pada keseluruhan perhitungan Link Budget untuk penerapan Sistem Antena SISO dapat dilihat pada table 2.

Tabel 2 Perhitungan *Link Budget* eksisting sistem antena SISO

Position	Antena	Frequency	Power e_NodB	Loss Inradation Network	Input Antena SISO	Antena SISO Gain	Antena SISO EIRP	Propagation Loss (PL)	IBLM			Total Atr Loss	Predicted MS Received Level (RSRP)
									Type	Loss	Loss		
		MHz	dBm	dB	dB	dBi	dBm	dB	Environment	dB	dB	dBm	
Lantai 1	M-1F-1	1.800	13,47	-28,67	-15,20	5,00	-10,20	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,84	
	M-1F-2	1.800	13,47	-29,03	-15,56	5,00	-10,56	-37,54	Moderately Open	-30,00	-67,54	-78,10	
	M-1F-3	1.800	13,47	-28,40	-14,93	5,00	-9,93	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,57	
	M-1F-4	1.800	13,47	-29,12	-15,65	5,00	-10,65	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-76,29	
	M-1F-5	1.800	13,47	-28,82	-15,35	5,00	-10,35	-37,54	Low	-33,10	-70,64	-80,99	
	M-1F-6	1.800	13,47	-28,59	-15,12	5,00	-10,12	-37,54	Moderately Open	-30,00	-67,54	-77,66	
	M-1F-7	1.800	13,47	-28,89	-15,42	5,00	-10,42	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-76,06	
	M-1F-8	1.800	13,47	-28,66	-15,19	5,00	-10,19	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,83	
	M-1F-9	1.800	13,47	-29,24	-15,77	5,00	-10,77	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-76,41	
	M-1F-10	1.800	13,47	-28,52	-15,05	5,00	-10,05	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,69	
	M-1F-11	1.800	13,47	-29,01	-15,54	5,00	-10,54	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-76,18	
	M-1F-12	1.800	13,47	-27,87	-14,40	5,00	-9,40	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,05	
	M-1F-13	1.800	13,47	-28,42	-14,95	5,00	-9,95	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,59	
	M-1F-14	1.800	13,47	-28,71	-15,24	5,00	-10,24	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,88	
	M-1F-15	1.800	13,47	-29,06	-15,59	5,00	-10,59	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-76,23	
Lantai 2	M-2F-1	1.800	13,47	-27,68	-14,21	5,00	-9,21	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-74,85	
	M-2F-2	1.800	13,47	-28,15	-14,68	5,00	-9,68	-37,54	Moderately Open	-30,00	-67,54	-77,22	
	M-2F-3	1.800	13,47	-27,54	-14,07	5,00	-9,07	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-74,71	
	M-2F-4	1.800	13,47	-28,17	-14,70	5,00	-9,70	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-75,34	
	M-2F-5	1.800	13,47	-24,93	-11,46	5,00	-6,46	-37,54	Low	-33,10	-70,64	-77,10	

4.2 Penerapan Antena MIMO

Dalam rancangan penempatan *antena MIMO (Multi Input Multi Output)* pada posisi yang sama dengan Sistem Antena SISO dan dengan jumlah antena MIMO yang akan ditempatkan sama dengan eksisting lantai 1 adalah 15 (lima belas) antena dan lantai 2 adalah 5 (lima) antena. Dalam perencanaannya memerlukan beberapa perangkat untuk merencanakan *DAS MIMO* dengan tetap menggunakan *DAS SISO* dimana perbedaan penerapan menambahkan *MU (Main Unit)* dan *SU (Service Unit)* dengan detail yang ditunjukkan pada table 3.

Tabel 3 Perangkat *DAS MIMO*

No.	Perangkat	Jumlah	No.	Perangkat	Jumlah
1.	Radio Unit	2 Unit	8.	Main Unit	3 Unit
2.	Antena MIMO	20 Unit	9.	Service Unit	3 Unit
3.	Spliter 2 W	2 Unit	10.	Kabel Jumper (3 meter)	2 buah (dan konektor)
4.	Spliter 3 W	3 Unit	11.	Kabel 1 ¹ / ₄ "	1.717,38 meter
5.	Spliter 4 W	7 Unit	12.	Kabel 7 ⁷ / ₈ "	739,73 meter
6.	Tapper 2 W	3 Unit	13.	Kabel 1/2 "	55,31 meter
7.	MCM 4 W	3 Unit	14.	Konektor	72 buah

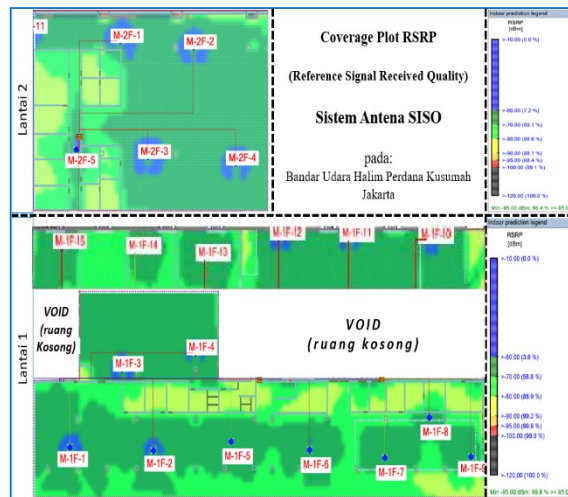
Untuk perhitungan selengkapnya pada keseluruhan Link Budget pada penerapan Sistem Antena MIMO dapat dilihat pada table 4.

Tabel 4 Perhitungan *Link Budget* perencanaan sistem antena MIMO

Pondok	Antena	Frequency	Power e _{NodeB}	Loss Isyarat	Input Antena SISO	Antena MIMO Gain	Antena SISO	FIRP	Propagation Loss (PL)	IBLM			Total Air Loss	Predicted MS Received Level (RSRP)		
										Loss	Type Environment	Loss			Loss	Loss
Lantai 1	M-1F-1	1.800	13,47	-31,57	-18,10	5,00	-13,10	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,74				
	M-1F-2	1.800	13,47	-31,93	-18,46	5,00	-13,46	-37,54	Moderately Open	-30,00	-67,54	-81,01				
	M-1F-3	1.800	13,47	-31,30	-17,83	5,00	-12,83	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,47				
	M-1F-4	1.800	13,47	-32,02	-18,55	5,00	-13,55	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-79,19				
	M-1F-5	1.800	13,47	-31,72	-18,25	5,00	-13,25	-37,54	Low	-33,10	-70,64	-83,90				
	M-1F-6	1.800	13,47	-31,49	-18,02	5,00	-13,02	-37,54	Moderately Open	-30,00	-67,54	-80,56				
	M-1F-7	1.800	13,47	-31,79	-18,32	5,00	-13,32	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,96				
	M-1F-8	1.800	13,47	-31,56	-18,09	5,00	-13,09	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,73				
	M-1F-9	1.800	13,47	-32,14	-18,67	5,00	-13,67	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-79,32				
	M-1F-10	1.800	13,47	-31,42	-17,95	5,00	-12,95	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,59				
	M-1F-11	1.800	13,47	-32,54	-19,07	5,00	-14,07	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-79,71				
	M-1F-12	1.800	13,47	-31,45	-17,98	5,00	-12,98	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,62				
	M-1F-13	1.800	13,47	-31,72	-18,25	5,00	-13,25	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,89				
	M-1F-14	1.800	13,47	-32,02	-18,55	5,00	-13,55	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-79,19				
	M-1F-15	1.800	13,47	-32,36	-18,89	5,00	-13,89	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-79,54				
Lantai 2	M-2F-1	1.800	13,47	-31,57	-18,10	5,00	-13,10	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,74				
	M-2F-2	1.800	13,47	-31,93	-18,46	5,00	-13,46	-37,54	Moderately Open	-30,00	-67,54	-81,01				
	M-2F-3	1.800	13,47	-31,30	-17,83	5,00	-12,83	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-78,47				
	M-2F-4	1.800	13,47	-32,02	-18,55	5,00	-13,55	-37,54	Open	-28,10	-65,64	-79,19				
	M-2F-5	1.800	13,47	-31,72	-18,25	5,00	-13,25	-37,54	Low	-33,10	-70,64	-83,90				

4.3 Prediksi RSRP *IB-Wave* Desain Tools

Perhitungan *Link Budget* untuk *RSRP* dengan menggunakan *IB-Wave Desain Tools* adalah merupakan perhitungan arlgoritmik/prediksi penyebaran sinyal yang memperhitungkan level daya penerimaan (*RSRP*) dengan memperhitungkan luas cakupan area (*coverage plot*). Berikut ini adalah hasil distribusi kekuatan sinyal (*RSRP*) yang dihitung berdasarkan penetrasi setiap meter persegi mulai dari 0 dBm pada Sistem Antena SISO.

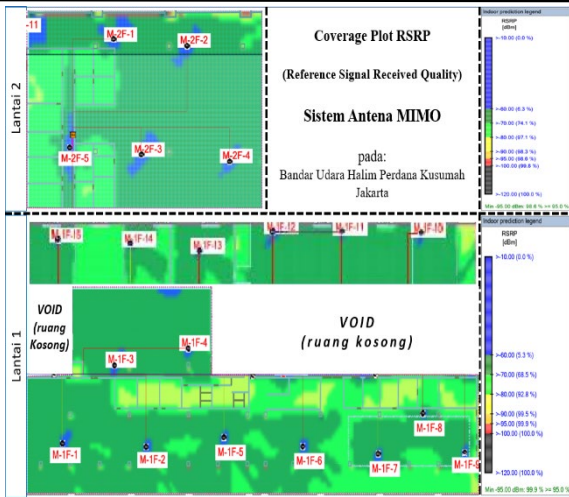


Gambar 6 Coverage Plot RSRP sistem antena SISO

Dari hasil perhitungan, tampak terjadi penurunan nilai terhadap desain *DAS MIMO* saat direncanakan pada Sistem Antena SISO. Hal ini disebabkan adanya penambahan Perangkat Aktif *MU (Main Unit)* dan *SU (Service Unit)* pada perencanaan *DAS (Distribution Antena System)* MIMO karena tidak dilakukan penambahan jalur pembagian kanal tambahan langsung dari *Radio Unit* untuk *input* kedua dari Sistem Antena SISO eksisting. Hal ini lebih kepada pertimbangan praktis dan ekonomis terhadap pemasangan jalur baru, walaupun akan ada penambahan perangkat baru yang sewaktu-waktu dapat dipergunakan penguatan/*gain*nya. Sehingga perhitungan pada saat merencanakan penerapan Sistem Antena MIMO 2x2 ini menambahkan rugi-rugi/*loss* di dalam perhitungan, nilai rata-rata adalah 2,95 dBm.

4.4 Hasil Simulasi Antena MIMO Pada Sistem Antena SISO

Setelah menganalisa lebih dalam, didapatkan hasil bahwa penerapan Antena MIMO pada Sistem Antena SISO meningkatkan cakupan sinyal (*RSRP*). Hasil dari *coverage plot RSRP* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 7 dari desain tools *IB-Wave* pada Sistem Antena MIMO (*Multi Input Multi Output*), dimana dalam hal ini diambil hanya untuk 15 Antena pada posisi lantai 1 yaitu: Antena 1 (M-1F-01) sampai dengan Antena 15 (M-1F-15) dan 5 Antena pada posisi lantai 2 yaitu: Antena 1 (M-2F-01) sampai dengan Antena 5 (M-2F-05) saja.



Gambar 7 Coverage Plot RSRP sistem antena MIMO

Selanjutnya dilakukan perhitungan pada penerimaan level sinyal untuk setiap range level penerimaan sinyal (*RSRP*) pada Sistem Antena SISO ditunjukkan pada table 5.

Tabel 5 Simulasi *coverage (RSRP)* desain SISO

Posisi	RSRP (range)	RSRP Sistem Antena SISO (%)	Luas Coverage (m ²)	RSRP _{th} ≥ 95,00 dBm (%)
Lantai 1	0 dBm s.d -60.00 dBm	3,60%	169,19	99,80%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	55,20%	2594,30	
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	30,10%	1414,64	
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	10,30%	484,08	
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,60%	28,20	
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,10%	4,70	
Lantai 2	0 dBm s.d -60.00 dBm	7,20%	97,07	98,40%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	61,90%	834,52	
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	17,50%	235,93	
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	11,50%	155,04	
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,30%	4,04	
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,70%	9,44	
Total Lantai	0 dBm s.d -60.00 dBm	4,40%	266,11	99,50%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	56,70%	3429,20	
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	27,30%	1651,10	
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	10,50%	635,04	
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,60%	36,29	
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,20%	12,10	
	-100.00 dBm s.d -120.00 dBm	0,30%	18,14	0,50%

Hasil dari coverage plot *RSRP* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 7 dari desain tools *IB-Wave* pada Sistem Antena SISO (*Single Input Single Output*), dimana dalam hal ini diambil hanya untuk 15 Antena pada posisi lantai 1 yaitu: Antena 1 (M-1F-01) sampai dengan Antena 15 (M-1F-15) dan 5 Antena pada posisi lantai 2 yaitu: Antena 1 (M-2F-01) sampai dengan Antena 5 (M-2F-05) saja.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan terhadap pembagian penerimaan level sinyal untuk setiap range level penerimaan sinyal (*RSRP*) pada Sistem Antena SISO yang ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 6 Simulasi *coverage (RSRP)* desain MIMO

Posisi	RSRP (range)	RSRP Sistem Antena SISO (%)	Luas Coverage (m ²)	RSRP _{th} Sistem Antena SISO (%)
Lantai 1	0 dBm s.d -60.00 dBm	5,30%	249,09	99,90%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	63,20%	2.970,28	
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	24,30%	1.142,05	
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	6,70%	314,89	
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,40%	18,80	
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,10%	4,70	
Lantai 2	0 dBm s.d -60.00 dBm	6,30%	84,93	98,60%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	67,80%	914,06	
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	23,00%	310,08	
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	1,20%	16,18	
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,30%	4,04	
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	1,20%	16,18	
Total Lantai	0 dBm s.d -60.00 dBm	5,50%	332,64	99,60%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	64,20%	3.882,80	
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	24,00%	1.451,52	
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	5,60%	338,69	
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,30%	18,14	
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,30%	18,14	
	-100.00 dBm s.d -120.00 dBm	0,10%	6,05	0,40%

4.5 Hasil Pengukuran RSRP

Setelah penerapan Antena MIMO pada Sistem Antena SISO, nilai RSRP sudah melampaui batas ambang yang ditentukan / *threshold* adalah ($RSRP_{th}$) ≥ 95% di level - 95 dBm pada lantai 1 sebesar 99,90%, sedangkan pada lantai 2 sebesar 98,60% dan pada total keseluruhan lantai dihasilkan sebesar 99,60%.

Dari hasil tersebut maka perencanaan tersebut dapat diterima karena sudah memenuhi standarisasi batas ambang yang ditentukan/ *threshold* ($RSRP_{th}$) yang dimiliki oleh operator.

Dari hasil pengujian terjadi peningkatan RSRP sebesar 8,6% pada keseluruhan lantai yaitu dari level 0.00 dBm s.d -70.00 dBm. Untuk lebih detailnya ditunjukkan pada detail tabel 7.

Tabel 7 Hasil pengujian nilai RSRP

Posisi	RSRP (range)	RSRP Sistem SISO (%)	Luas pada Sistem SISO (m ²)	RSRP Sistem MIMO (%)	Luas pada Sistem MIMO (m ²)	Selisi Margin (%)	RSRP _{th} Sistem SISO	RSRP _{th} SISTEM MIMO
Lantai 1	0 dBm s.d -60.00 dBm	3,60%	169,19	5,30%	249,09	-1,70%	99,80%	99,90%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	55,20%	2594,30	63,20%	2970,28	-8,00%		
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	30,10%	1414,64	24,30%	1142,05	-5,80%		
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	10,30%	484,08	6,70%	314,89	-3,60%		
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,60%	28,20	0,40%	18,80	-0,20%		
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,10%	4,70	0,10%	4,70	0,00%		
Lantai 2	0 dBm s.d -60.00 dBm	7,20%	97,07	6,30%	84,93	0,90%	98,40%	98,60%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	61,90%	834,52	67,80%	914,06	-5,90%		
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	17,50%	235,93	23,00%	310,08	-5,50%		
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	11,50%	155,04	1,20%	16,18	-10,30%		
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,30%	4,04	0,30%	4,04	0,00%		
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,70%	9,44	1,20%	16,18	0,50%		
Total Lantai	0 dBm s.d -60.00 dBm	4,40%	266,11	5,50%	332,64	-1,10%	99,50%	99,60%
	-60.00 dBm s.d -70.00 dBm	56,70%	3429,20	64,20%	3882,80	-7,50%		
	-70.00 dBm s.d -80.00 dBm	27,30%	1651,10	24,00%	1451,52	-3,30%		
	-80.00 dBm s.d -90.00 dBm	10,50%	635,04	5,60%	338,69	-4,90%		
	-90.00 dBm s.d -95.00 dBm	0,60%	36,29	0,30%	18,14	-0,30%		
	-95.00 dBm s.d -100.00 dBm	0,20%	12,10	0,10%	18,14	0,10%		
	-100.00 dBm s.d -120.00 dBm	0,30%	18,14	0,10%	6,05	-0,20%	0,50%	0,40%

5. SIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat ditarik suatu simpulan sebagai berikut:

1. Perencanaan Penerapan Antena MIMO (2x2) pada Sistem Antena SISO, daya yang diterima secara keseluruhan sebesar 99,60% yang mana sudah melampaui batas ambang yang ditentukan / threshold ($RSRP_{th}$) $\geq 95\%$ di level -95 dBm
2. Berdasarkan hasil pengujian luas area cakupan/coverage mengalami peningkatan sebesar 8,6% secara keseluruhan

DAFTAR REFERENSI

- Abrianto, H. Heru, and Irmayani H. Mukdien. 2022. "Disain Antena Mikrostrip Array Tiga Band Untuk Aplikasi WiFi Dan WiMax." *Teknik: Jurnal Ilmu Teknik Dan Informatika* 2 (1): 23–30. <https://doi.org/10.51903/teknik.v2i1.105>.
- Abrianto, H. Heru, and I. Irmayani. 2023. "Disain Antena Mikrostrip Antena Segiempat MIMO 4X4 Untuk Aplikasi WIFI Dan WIMAX." *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia* 8 (1): 651–64. <http://dx.doi.org/10.36418/syntax-literate.v8i1.11262>.
- Irmayani, I., Anggraini, A. 2023. "Peningkatkan QoS Layanan Video Call Dengan Metode DASTFBC Sistem MIMO2x2 Pada Jaringan LTE." *Sainstech: Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Sains Dan Teknologi* 33 (4): 1–15. <https://doi.org/10.37277/stch.v33i4.1802>.
- Budiono, Fahrizal Lukman. (2013). Persepsi dan Harapan Pengguna terhadap Kualitas Layanan Data pada Smartphone di Jakarta. *Buletin Pos Dan Telekomunikasi*, 11(2), 93–108.
- Arius, Dony, 2020, Komunikasi data, Penerbit Andi.
- Rahmania, Luthfia, 2019, Modul Praktikum Antena Mikrostrip Circular Patch Pada Frekuensi 3GHZ. Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Ahmadi, Candra. (2015). Analisis Kapasitas Kanal terhadap Jumlah Antena Pada Sistem MIMO (Multiple Input Multiple Output). *Sisfotenika*, 5(1), 37–48.
- Kustiawan, Usep. (2016). Pengembangan media pembelajaran anak usia dini. Penerbit Gunung Samudera [Grup Penerbit PT Book Mart Indonesia].
- Hidayat, Arif. (2019). Misteri Satelit di Luar Angkasa.
- Syawaludin, Abdul. (2016). Rancang Bangun Antena Mikrostrip Linier Array 4 Element Dengan Pencatuan Proximity Coupling Frekuensi 1, 5GHz–1, 6GHz Pada Aplikasi Mobile Satellite. Universitas Negeri Jakarta.
- Rahmadyanto, Heri. (2009). Rancang Bangun Antena Mikrostrip Slot Triangular Array 8 Elemen dengan Pencatuan Microstrip Feed Line Secara Tidak Langsung untuk Aplikasi CPE Wimax. Skripsi Sarjana Teknik Elektro Fakultas Teknik. Jakarta: Universitas Indonesia (UI).
- Stefania Sesia (ST-Ericsson France), Issam Toufik (ETSI, France) and Matthew Baker (Alcatel-Lucent, UK) (2011). LTE –The UMTS Long Term Evolution, from theory to practice, Second Edition, included Release 10 for LTE Advanced, by A John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- 3GPP, <https://www.3gpp.org/specifications-technologies>
- Cox, Christopher, 2014. "Introduction of LTE 2nd Edition", UK
- I. Szini, A. (Department of Electronic Systems, Faculty of Engineering and Science, Aalborg University, Denmark), Scannavini (Motorola Mobility Inc. Libertyville USA), and L.J. Foged (SATIMO, Pomezia, Italy), 2014, MIMO 2X2 Reference Antennas Concept (Antennas, Propagation and Radio Networking).
- Ardianto, Fajar Wahyu, Mufti, Nachwan, & Syihabuddin, Budi. (2018). Analisis Simulasi Antena MIMO 4x4 Susunan Persegi dan Sirkular pada Frekuensi 15 GHz. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi*, 7(2), 174–182.
- C.J. Reddy and Gopinath Gampala, 2016, Design of millimeter wave antenna arrays for 5G cellular applications using FEKO Conference: 2016 IEEE/ACES International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics(ACES). DOI:[10.1109/ROPACES.2016.7465426](https://doi.org/10.1109/ROPACES.2016.7465426)

Bhagya R dan A. G. Ananth, (ISSN: 2231-2307, Volume-2, Issue-3, July 2012)
Study Of Transmission Characteristics Of 2x2 Mimo System for OFDM Multiplexing and BPSK Modulation With ZF Equalizer And MMSE Receivers, in International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE).

Schematic Diagram LTE Design Menara Prima Building, XL – QDC Technologies, Horizontal Design.

Schematic Diagram LTE Design Menara Prima Building, XL – QDC Technologies, Diagram Terintegrasi.