

Perancangan Aplikasi *Link Budget* Untuk Sistem Komunikasi Satelit Berbasis *Website*

1st Muhammad Luthfi

School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

muhluthfii@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Iyan Cahyana

School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

iyancahyana@student.telkomuniversity.ac.id

3rd Muhammad Sultan Pasha Dondo

School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

sultanpasha@student.telkomuniversity.ac.id

4th Maharddhika Paramananda

School of Electrical Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

paramananda@student.telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Perancangan aplikasi sistem komunikasi satelit seringkali terkendala oleh kerumitan perhitungan *link budget* yang berperan penting dalam menentukan kualitas sinyal. Berbagai parameter teknis seperti daya transmisi, *path loss*, *gain* antenna, dan kondisi lingkungan menjadi tantangan tersendiri bagi pengguna, khususnya dalam memahami dan menghitung *link budget* secara akurat. Kesalahan dalam perhitungan ini dapat menimbulkan dampak serius, seperti menurunnya kecepatan transmisi data hingga kegagalan layanan komunikasi. Untuk mengatasi masalah tersebut, dikembangkan sebuah aplikasi berbasis *website* yang mempermudah pengguna dalam melakukan perhitungan *link budget* pada sistem komunikasi satelit. Aplikasi ini dilengkapi antarmuka yang intuitif, visualisasi interaktif, serta alat simulasi untuk mendukung efisiensi dan akurasi dalam perencanaan sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aplikasi SkyLinkCal mampu menghasilkan perhitungan yang konsisten dengan metode manual dan *software* lain dengan tingkat akurasi tinggi. Visualisasi orbit satelit dinilai informatif berdasarkan perbandingan dengan GMAT NASA. Selain itu, survei kepuasan pengguna melalui *System Usability Scale* menunjukkan skor rata-rata 82,988, yang mencerminkan penerimaan positif dari pengguna. Meski demikian, simulasi *hardware* memerlukan pengembangan lanjutan untuk memperoleh nilai redaman optimal.

Kata kunci— Atenuasi, *Link budget*, Komunikasi Satelit, SkyLinkCal, *Website*, Visualisasi.

I. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi satelit memiliki peran penting dalam menyediakan layanan komunikasi di berbagai wilayah, termasuk area yang tidak terjangkau oleh jaringan terestrial. Satelit merupakan suatu benda yang beredar di ruang antariksa dan mengelilingi bumi, berfungsi sebagai stasiun radio yang menerima, memproses dan memancarkan kembali sinyal komunikasi radio [1]. Satelit berfungsi sebagai stasiun yang menerima, memproses, dan memancarkan kembali sinyal informasi melalui frekuensi *uplink* dan *downlink*. Dalam merancang sistem ini, perhitungan *link budget* menjadi aspek yang penting karena menentukan apakah daya

sinyal yang diterima masih berada di atas ambang batas minimum untuk menjamin kualitas komunikasi. Parameter-parameter seperti *Effective Isotropic Radiated Power* (EIRP), *transmit power*, *path loss*, *antenna gain*, dan kondisi lingkungan *eksternal* secara bersamaan memengaruhi hasil perhitungan *link budget* dan, pada akhirnya, kinerja sistem komunikasi secara keseluruhan [2]. Perhitungan *link budget* sering kali menjadi tantangan karena melibatkan banyak parameter yang kompleks dan rentan menimbulkan kesalahan, yang dapat berdampak pada penurunan kualitas layanan komunikasi satelit. Meskipun telah tersedia berbagai alat bantu seperti Satmaster, kalkulator Excel AMSAT IARU, serta beberapa situs yang penggunaannya masih terbatas karena kendala biaya, antarmuka yang rumit, atau fitur yang kurang mendalam.

Melalui pengembangan aplikasi ini, dilakukan pengujian untuk menilai kesesuaian hasil perhitungan dengan metode manual dan perangkat lunak pembanding. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *website* SkyLinkCal mampu menghasilkan perhitungan *link budget* yang konsisten dan sesuai dengan standar perhitungan yang telah ada, dengan selisih yang sangat kecil dan tidak memengaruhi hasil akhir secara keseluruhan. Selain itu, fitur visualisasi orbit satelit dan simulasi *signal attenuation* berfungsi dengan baik dan dinilai membantu dalam memahami performa sistem komunikasi secara lebih menyeluruh. Evaluasi dari pengguna melalui metode *System Usability Scale* juga menunjukkan tingkat penerimaan yang positif terhadap kemudahan penggunaan dan kelengkapan fitur. Dengan demikian, *platform* ini dinilai layak digunakan sebagai alat bantu dalam proses perencanaan sistem komunikasi satelit yang efisien dan informatif.

II. KAJIAN TEORI

A. Sistem Komunikasi Satelit

Komunikasi satelit adalah proses pengiriman sinyal radio menuju satelit maupun dari satelit yang mengorbit bumi,

untuk memungkinkan komunikasi antara tempat-tempat jauh di bumi [3]. *Space segment* pada system komunikasi satelit terdiri dari satelit dan fasilitas darat yang menyediakan fungsi *telemetry*, *tracking*, dan *command* (TTC) serta kebutuhan logistik untuk satelit. Sedangkan untuk *earth segment* adalah bagian dari sistem komunikasi satelit yang dibentuk oleh stasiun-stasiun bumi yang digunakan untuk memancarkan dan menerima sinyal lalu lintas dari segala jenis menuju dan dari satelit yang membentuk *interface* dengan jaringan terrestrial [4].

B. Link budget Satelit

Pada komunikasi satelit terdapat dua jalur transmisi utama, yaitu *uplink* dan *downlink*. *Uplink* dari sirkuit satelit merupakan sirkuit di mana stasiun bumi akan mengirimkan sinyal ke satelit dan satelit akan menerimanya. Sedangkan, *downlink* dari sirkuit satelit merupakan sirkuit yang memancarkan sinyal dari satelit dan stasiun bumi akan menerimanya [5]. Dalam komunikasi satelit, analisis *link budget* merupakan bagian terpenting untuk menentukan *gain* dan kerugian sinyal *transmitter* ke *receiver*.

C. Gain

Gain antena adalah rasio daya yang dipancarkan atau diterima per satuan sudut padat oleh antena pada arah tertentu terhadap daya yang dipancarkan atau diterima per satuan sudut padat oleh antena isotropik yang diberi daya yang sama [6].

D. Figure Of Merit

Kualitas atau efisiensi bagian penerima dari sambungan komunikasi satelit sering ditentukan oleh *figure of merit* [7]. *Figure of merit* merupakan karakteristik kinerja paling mendasar dari stasiun bumi pada bagian *receiver*, didefinisikan sebagai rasio antara *gain* antena dan *system noise temperature*. Desain antena yang baik melibatkan optimasi G/T secara keseluruhan [4].

E. Panjang Gelombang

Panjang gelombang adalah jarak antara dua titik yang sama pada gelombang yang berurutan, misalnya dari satu puncak ke puncak berikutnya atau dari satu lembah ke lembah berikutnya.

F. Power Deliver

Power deliver adalah jumlah daya listrik yang sampai ke antena dari *transmitter*, setelah melewati komponen seperti kabel dan konektor. Saat sinyal dikirim dari *transmitter*, sebagian energi bisa hilang dalam perjalanan, misalnya karena panas pada kabel atau sambungan yang buruk.

G. Noise Power

Dalam menghitung *link budget*, istilah N_0 (*noise spectral density* dalam W/Hz) atau istilah T (*temperatur noise*) digunakan sebagai pengganti *noise power* (N), sehingga tidak perlu lagi menentukan *bandwidth* (B) di mana *noise* diukur.

H. Effective Isotropic Radiated Power

EIRP adalah hasil ($P_T G_T$) dari daya yang tersedia pada output antena dan gain transmisi ke satelit pada frekuensi yang ditinjau [8].

I. Signal To Noise Power Ratio (S/N)

S/N merupakan perbandingan daya sinyal Terhadap daya *noise* pada keluaran *receiver*. Perbandingan ini sering kali disebut sebagai perbandingan sinyal terhadap *noise* pasca-detektor atau tujuan [7].

J. Path Loss

Path loss menggambarkan bagaimana daya yang diterima sinyal berkurang sehubungan dengan jarak pemancar dan penerima. Hal ini disebabkan oleh hilangnya daya yang dipancarkan oleh pemancar serta pengaruh saluran propagasi [10].

K. Noise System Temperature

Kontribusi *noise* dari setiap perangkat dalam jalur transmisi, termasuk *noise* dari langit, dikombinasikan untuk membentuk suhu *noise* sistem secara keseluruhan, yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kinerja sambungan secara keseluruhan [7].

L. Eccentricity

Eccentricity adalah ukuran sirkularitas orbit. Semakin tinggi eksentrisitasnya, semakin datar *elips* nya. Orbit sirkular adalah kasus khusus dari *elips* dengan sumbu mayor dan minor yang sama (eksentrisitas nol) [7].

M. Mean Orbit Altitude

Mean orbit altitude adalah ukuran rata-rata jarak antara satelit dan permukaan bumi selama satu kali putaran orbit. Istilah ini umumnya digunakan untuk menggambarkan orbit yang bentuknya tidak bulat sempurna (*elips*), karena jarak satelit ke bumi terus berubah saat satelit mengelilingi bumi.

N. Mean Orbit Radius

Mean orbit radius merupakan nilai rata-rata dari jarak antara satelit dan pusat bumi selama satelit menyelesaikan satu putaran orbit. Istilah ini biasanya digunakan ketika orbit satelit berbentuk *elips* karena jaraknya terhadap bumi tidak tetap, melainkan berubah-ubah sepanjang lintasannya.

O. Slant Range

Slant range adalah jarak garis lurus antara satelit dan stasiun bumi. Jarak ini sangat penting dalam komunikasi satelit karena menentukan waktu tempuh sinyal, pelemahan sinyal (*path loss*), pergeseran frekuensi akibat efek *doppler*, serta akurasi pelacakan posisi satelit oleh antena di bumi [8].

P. Pointing Loss

Axis loss pada stasiun bumi disebut juga *pointing loss*. *Pointing loss* sendiri biasanya hanya persepuluh dB. Selain *pointing loss*, kerugian dapat terjadi pada antena akibat ketidak sejajaran arah polarisasi [5].

Q. Antenna Roll-Off

Antenna roll-off merupakan parameter yang mengukur seberapa besar kerugian kekuatan sinyal yang disebabkan oleh ketidaksempurnaan atau kesalahan dalam penempatan (*pointing*) antena dalam satuan derajat.

R. Polarization Loss

Polarisasi gelombang radio ditentukan oleh orientasi vektor medan listrik dan magnet pada suatu titik tetap di

ruang angkasa. Gelombang terpolarisasi linier adalah gelombang yang vektor medan listrik dan medan magnetnya selalu berada pada arah yang tetap di suatu titik di ruang angkasa sebagai fungsi waktu [9].

S. Cross Polarization Isolation

Cross polarization isolation (XPI) adalah rasio dalam arah tertentu, antara amplitudo medan RF yang terpolarisasi bersama dengan *amplitudo* medan RF yang terpolarisasi silang [6]. XPI merepresentasikan rasio logaritmik antara kekuatan sinyal yang searah dengan polarisasi antenna (*co-polarized*) dan kekuatan sinyal yang memiliki arah polarisasi berbeda (*cross-polarized*).

T. Link Margin

Toleransi tambahan dalam perancangan untuk memastikan daya terima mencukupi ini, dikenal sebagai *link margin*, yaitu selisih antara daya terima yang dirancang dan batas minimum daya yang masih dapat diterima.

U. Low Earth Orbit (LEO)

Satelit *Low Earth Orbit* (LEO) adalah orbit terendah yang digunakan untuk satelit komunikasi, dengan ketinggian antara 200 hingga 1.500 km dari permukaan Bumi dan periode orbit yang sangat singkat, yaitu sekitar 1,5 hingga 2 jam. Karakteristik ini menghasilkan latensi (penundaan propagasi) yang sangat rendah, hanya beberapa milidetik, menjadikannya ideal untuk layanan sensitif waktu seperti telepon dan internet [4].

V. Medium Earth Orbit (MEO)

Satelit *Medium Earth Orbit* (MEO) berada pada ketinggian menengah, antara 7.000 hingga 12.000 km (atau 8.000-18.000 km) dengan periode orbit yang lebih panjang, yaitu 5 hingga 10 jam. Latensi pada MEO berada di kisaran puluhan milidetik, lebih tinggi dari LEO tetapi jauh lebih rendah dari GEO [4].

W. Geostationary Earth Orbit (GEO)

Satelit *Geostationary Earth Orbit* (GEO) berada pada ketinggian tetap sekitar 35.786 km di atas ekuator, dengan periode orbit tepat 24 jam. Keunikan GEO adalah satelit tampak diam di satu posisi di langit bagi pengamat di Bumi, memungkinkan penggunaan antenna tetap [4].

X. Atmospheric Gases dan Ionospheric Attenuation

Gelombang radio yang merambat melalui atmosfer bumi akan mengalami penurunan level sinyal akibat komponen gas yang terdapat di jalur transmisi. Penurunan sinyal dapat bersifat ringan atau berat, tergantung pada frekuensi, suhu, tekanan, dan konsentrasi uap air [9].

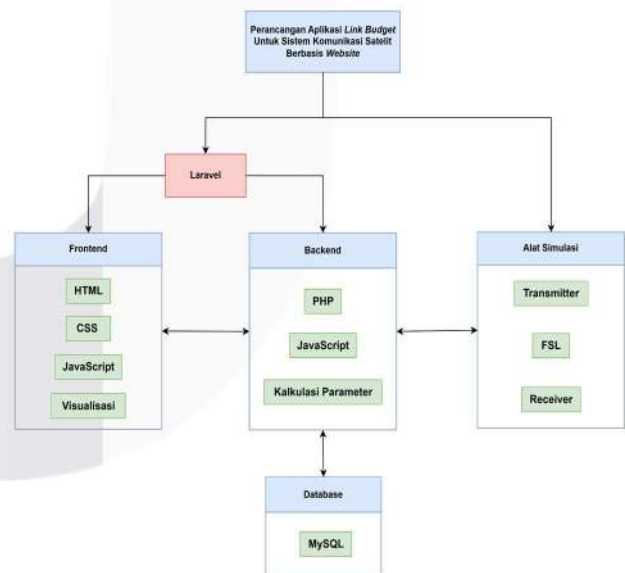
menggunakan PHP dan JavaScript, lalu diintegrasikan dengan database MySQL dalam platform SkyLinkCal. Setelah implementasi selesai, sistem diuji melalui verifikasi hasil perhitungan terhadap metode manual dan *software* AMSAT IARU Excel 2016, evaluasi pengalaman pengguna menggunakan *System Usability Scale* (SUS), serta pengujian performa di perangkat *mobile* dan *desktop*. Selain itu, simulasi atenuasi dilakukan menggunakan perangkat attenuator untuk menguji akurasi nilai *path loss*.

A. Desain Sistem

Perhitungan *link budget* berbasis *website* sangat fleksibel untuk diakses dari berbagai tempat dan perangkat *mobile* dan *desktop* selama terkoneksi dengan internet. *Website* ini mampu memberikan *feedback* apabila hasil perhitungan *link budget* kurang sesuai atau tidak optimal, sistem akan memberikan rekomendasi melalui fitur UI/UX yang dirancang secara interaktif. Pada perhitungan *link budget* memungkinkan menampilkan visualisasi hasil perhitungan dalam bentuk gambar, dilengkapi dengan fitur instruksi di setiap menu.

B. Detail Implementasi

Website perhitungan *link budget* untuk sistem komunikasi satelit ini mencakup beberapa fitur yang dapat memudahkan pengguna dalam melakukan perhitungan *link budget* satelit. Fitur tersebut diantaranya yaitu, fitur perhitungan dari setiap parameter-parameter satelit, fitur *pop-up* untuk melihat deskripsi dari hasil perhitungan setiap parameter, fitur *history* yang berguna untuk menyimpan data hasil *output* dan *output* perhitungan yang dilakukan oleh *user*, serta fitur visualisasi untuk menampilkan visualisasi dari hasil perhitungan berupa orbit satelit dengan *ground track*.



GAMBAR 1
DIAGRAM DETIL IMPLEMENTASI PERANCANGAN
PERHITUNGAN *LINK BUDGET*

III. METODE

Penelitian ini diawali dengan identifikasi kebutuhan perhitungan *link budget* pada sistem komunikasi satelit, dilanjutkan dengan perancangan antarmuka *website* yang memuat input parameter seperti *transmit power*, *frequency*, *antenna gain*, dan *path loss*. Aplikasi dikembangkan

Selain itu *website* ini mencakup *front end*, *back-end*, animasi, *database*, dan alat simulasi. Pada bagian *front-end website* ini menyediakan tampilan yang interaktif dan *user friendly*. *Back-end* berfungsi untuk menangani perhitungan *link budget* satelit. *Database* berfungsi untuk menyimpan data pengguna dan *history* perhitungan (riwayat perhitungan) dari *website* dengan menggunakan MySQL serta Heidi yang

berfungsi mengatur *database*. Selain itu, terdapat juga alat berupa *attenuator* yang digunakan untuk mensimulasikan hilangnya sinyal ketika proses pengiriman sinyal dari *ground station* menuju *spacecraft*. Pada bagian animasi, *website* akan menampilkan visualisasi gambar 3D bergerak berupa orbit dan *ground track* yang didapatkan dari hasil perhitungan kalkulator.

C. Tampilan pada *Website* perhitungan SkyLinkCal



GAMBAR 2
TAMPILAN *WEBSITE* PERHITUNGAN PADA *DESKTOP* DAN *MOBILE*

Dalam pengoperasian *website* SkyLinkCalculator, langkah-langkah yang diperlukan agar memastikan sistem beroperasi dengan optimal. Setiap langkah dirancang untuk memberikan pengalaman pengguna yang interaktif serta efisiensi waktu dalam melakukan perhitungan *link budget* satelit menggunakan *website* SkyLinkCalculator. Berikut langkah-langkah yang perlu diikuti untuk mengoperasikan *website* SkyLinkCalculator dengan benar:

a. Akses *Website* SkyLinkCalculator

Pengguna dapat langsung menggunakan aplikasi SkyLinkCalculator berbasis *website* dengan langsung mengakses link *website* tanpa perlu melakukan registrasi dan *login* terlebih dahulu. Registrasi dan *login* dapat dilakukan ketika ingin mengakses *history* perhitungan dan bersifat opsional. Tampilan pertama yang akan muncul yaitu *Home Page* dengan beberapa fitur unggulan di dalamnya, yaitu kalkulator parameter, riwayat perhitungan, serta informasi *contact* yang disediakan untuk memberikan *feedback* terhadap *website* SkyLinkCalculator. Adapun menu *About Us* yang berisikan informasi-informasi mengenai dosen pembimbing dan tim peneliti.

b. Proses Perhitungan Parameter *Link budget* Satelit

Pengguna dapat memulai perhitungan *link budget* satelit dengan menekan tombol “Hitung Sekarang” di halaman utama atau tombol “Calculate” pada navigasi *website*. Perhitungan dimulai dari menu orbit, di mana pengguna memilih jenis orbit (LEO, MEO, atau GEO) dan memasukkan parameter seperti Apogee, Perigee, Argument of Perigee, R.A.A.N, *True Anomaly*, *Inclination*, dan *Elevation Angle*. Sistem secara otomatis menghitung nilai seperti *Slant Range*, *Eccentricity*, *Mean Orbit Radius*, dan lainnya. Selanjutnya, pada menu frekuensi, pengguna memasukkan *uplink* dan *downlink frequency* (MHz), dan sistem menghitung *wavelength* dan *path loss*.

Perhitungan berlanjut ke menu *transmitter*, di mana pengguna memasukkan *Transmit Power* (Watt), *Line Lengths*, *Cable/Waveguide Type*, *Losses*, dan *Filter Insertion*

Losses. Output berupa *Transmit Power* (dBW/dBm), *Total Line Losses*, dan *Power Delivered to Antenna*. Pada menu *receiver*, pengguna mengisi parameter seperti *Cable Loss*, *Line Lengths*, *Bandpass Filter Losses*, *LNA Gain* and *Temperature*, serta *Receiver Front-End Temperature*. Sistem menghitung *Transmission Line Coefficient*, *GLNA*, *Total System Noise Temperature* (T_s), dan *Total Losses*.

Selanjutnya, pengguna menghitung *Antenna Gain* untuk *uplink* dan *downlink*, memasukkan *Gain* (dBi), *Beamwidth*, dan *Polarization*. Perhitungan *Antenna Pointing Loss* dan *Polarization Loss* dilakukan dengan memasukkan *Gain Antenna*, *Pointing Error* (θ), *Axial Ratio*, dan *Polarization Angle*. Pada menu *Atmospheric and Ionospheric Losses*, pengguna memasukkan *Elevation Angle* dan *Frequency*, dan sistem menghitung *losses* secara otomatis. Akhirnya, pada menu *Uplink & Downlink Budget*, pengguna memasukkan parameter *Ground Station* dan *Spacecraft* termasuk *EIRP*, *Path Loss*, *Antenna Gain*, *SNR*, *Noise Temperature*, dan *Bandwidth*. Hasil akhir mencakup *Isotropic Signal Level*, *SNR*, dan *Link Margin*. Semua data dirangkum di menu *System Summary* dan dapat disimpan melalui fitur *login* untuk diakses ulang di menu *History* atau digunakan pada menu *Simulasi Alat* untuk menghitung daya yang diterima berdasarkan nilai *input power* dan *total loss*.

Setelah seluruh parameter *link budget* dihitung, pengguna dapat mengakses fitur *History* Perhitungan untuk meninjau riwayat kalkulasi lengkap beserta visualisasi orbit satelit berdasarkan input seperti *orbit type*, *Slant Range*, dan *Ground Station location*. Untuk melihat *history* perhitungan pengguna harus *register* dan *login* terlebih dahulu. Melalui opsi “Lihat Visualisasi”, sistem menampilkan lintasan satelit secara interaktif. Selanjutnya, pada menu *Simulasi Alat*, pengguna memasukkan nilai *Input Power* (dBm) dan sistem secara otomatis memproses nilai *uplink/downlink* frekuensi dan total *path loss* dari perhitungan sebelumnya untuk menghasilkan *Receive Power* (*Rx Output*).

D. Pengujian Parameter *Link Budget*

Dalam metode pengukuran ini *website* SkyLinkCal dilakukan pengujian dengan cara membandingkan nilai dari *website* SkyLinkCal dengan Excel AMSAT IARU 2016 dan perhitungan manual untuk perhitungannya. Pada pengujian parameter *link budget* diuji dengan memasukkan nilai ke beberapa persamaan berikut:

1. *Figure Of Merit*

Figure of merit dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{G}{T} = G_{ant} - L_{line} - 10 \log_{10}(T_{noise}) \quad (1)$$

dimana, G/T merupakan *Figure of merit*, G_{ant} merupakan *Gain*, T merupakan Suhu (Kelvin), dan L_{line} merupakan total *loss* pada jalur transmisi.

2. Panjang Gelombang

Panjang gelombang dihitung dengan persamaan berikut:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2)$$

dimana, c merupakan kecepatan cahaya di ruang hampa yang nilainya 3×10^8 (m/s) dan f merupakan frekuensi (Hz).

3. Power Deliver

Power Deliver dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_{delivered} = P_{transmitter (dBW)} - L_{total\ line\ losses} \quad (3)$$

dimana, $P_{transmitter}$ daya keluaran *transmitter* dalam dBW, $L_{total\ line\ losses}$ total kehilangan daya pada jalur transmisi dalam dB.

4. Noise Power

Noise power dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_n = 10\log_{10}(k) + 10\log_{10}(T_{noise}) + 10\log_{10}(B)(dB) \quad (4)$$

dimana, N merupakan *Noise Power*, k merupakan Konstanta Boltzman (1.38×10^{-23} Joule/Kelvin), T merupakan Suhu (Kelvin), B merupakan *Bandwidth* (dB).

5. EIRP

EIRP dihitung dengan persamaan berikut:

$$EIRP = P_{tx\ dBW} - L_{line} + G_{antenna} \quad (5)$$

dimana, P_{tx} merupakan *Power Transmitter*, $G_{antenna}$ merupakan *Gain* antena paa *Transmitter*, L_{line} merupakan *Total Transmission Line Losses*.

6. S/N

S/N dihitung dengan persamaan berikut:

$$SNR = P_{rec} - P_n, \quad (6)$$

dimana, P_{rec} merupakan *Signal Power*, P_n merupakan *Receiver Noise Power*.

7. Path Loss

Path Loss dihitung dengan persamaan berikut:

$$L = 22 + 20 \log_{10} \left(\frac{d \times 1000}{\lambda} \right), \quad (7)$$

dimana, L merupakan *free space basic transmission loss/path loss* (dB), d merupakan Jarak Antara Pemancar dan Penerima (meter) dan λ merupakan Panjang Gelombang (meter).

8. Noise System Temperature

Noise System Temperature dihitung dengan persamaan berikut:

Noise System Temperature pada uplink:

$$T_s = (T_a \times \alpha) + (T_o \times (1 - \alpha)) + T_{LNA} + \left(\frac{T_{2NdStage}}{G_{LNA}} \right) (K) \quad (8)$$

Noise System Temperature pada downlink:

$$T_s = (T_a \times \alpha) + (T_o \times (1 - \alpha)) + T_{LNA} + \left(\frac{T_{ComRec}}{\frac{G_{LNA}}{L_D}} \right) (K) \quad (9)$$

dimana, T_s merupakan *Noise System Temperature*, T_o merupakan Suhu Fisik (290 K), α merupakan redaman dinyatakan Sebagai Rasio Daya (dB), G_{LNA} merupakan *gain* pada LNA, $T_{ComReceiver}$ merupakan suhu *noise front end* /penerima komunikasi, L_D cable run dari *output* LNA, T_{LNA} merupakan suhu pada LNA, $T_{2NdStage}$ merupakan *Noise Temperature* pada *Mixer*, T_a merupakan suhu pada antenna (K).

9. Eccentricity

Eccentricity dihitung dengan persamaan berikut:

$$e = \frac{(r_a - r_p)}{(r_a + r_p)} \quad (10)$$

dimana, e merupakan Ukuran seberapa lonjong atau tidak bundar sebuah orbit *elips*, r_a merupakan titik terjauh satelit dari pusat bumi (km), r_p merupakan titik terdekat satelit dari pusat bumi (km).

10. Mean Orbit Altitude

Mean orbit altitude dihitung dengan persamaan berikut:

$$Altitude_{mean} = \frac{Apogee + Perigee}{2} \quad (11)$$

dimana, *Apogee* adalah titik terjauh dari bumi (km), *Perigee* adalah titik terdekat dari bumi (km).

11. Mean Orbit Radius

Mean orbit radius dihitung dengan persamaan berikut:

$$Orbit\ Radius_{mean} = Altitude_{mean} + R_e, \quad (12)$$

dimana, $Altitude_{mean}$ merupakan rata-rata jarak antara satelit dan permukaan bumi dalam km, R_e merupakan radius bumi yaitu 6378,14 km.

12. Slant Range

Slant range dihitung dengan persamaan berikut:

$$d = R_e \sqrt{\left(\frac{r}{R_e} \right)^2 - \cos^2(E)} - R_e \sin(E), \quad (13)$$

dimana, r merupakan jarak inti bumi ke satelit ($h+R_e$) dalam (km), E adalah sudut elevasi dari stasiun bumi ke satelit dalam derajat.

13. Pointing Loss

Pointing loss dihitung dengan persamaan berikut:

$$Approx_{PL} = -10 \times \log_{10} \left(3282,81 \times \left(\frac{\sin(roll\ off)^2}{(roll\ off)^2} \right) \right) \quad (14)$$

dimana, *roll off* merupakan *antenna roll-off*.

14. Antenna Roll Off

Antenna roll off dihitung dengan persamaan berikut:

$$A_{RO} = 2 \times (Estimated\ Pointing\ Error \times \frac{79,76}{Beamwidth}) \quad (15)$$

dimana, *estimated pointing error* merupakan estimasi atau perkiraan sudut kesalahan dari arah penempatan antenna yang ideal, *beamwidth* merupakan lebar sudut utama dari pola radiasi antenna.

15. Polarization Loss

Polarization loss dihitung dengan persamaan berikut:

$$L_p = 0,5 \times \left(1 + \frac{(1 - r_1^2)(1 - r_2^2) \cos(2\theta) + 4r_1r_2}{(1 + r_1^2)(1 + r_2^2)} \right) \quad (16)$$

dimana, L_p merupakan *polarization loss*, r_1 merupakan axial ratio untuk antenna 1, r_2 merupakan axial ratio untuk antenna 2, θ merupakan sudut antara sudut kemiringan *elips* polarisasi antenna dan sudut kemiringan *elips* polarisasi gelombang datang dan keduanya dianggap horizontal di permukaan bumi.

16. Cross Polarization Loss

Cross polarization loss dihitung dengan persamaan berikut:

$$XPI(dB) = 20 \log \left(\frac{\alpha_c}{b_x} \right) (dB) \quad (17)$$

dimana, α_c merupakan *polarization loss*, b_x merupakan *cross polarization power*.

17. Link Margin

Link margin dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Link Margin} = SNR - SNR_{\text{required}} \quad (18)$$

dimana, SNR merupakan *sytem to noise ratio* pada *receiver*, sedangkan SNR_{required} merupakan *sytem to noise ratio* yang diperlukan pada sistem analog/digital.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Skenario Pertama

Pengujian dilakukan dengan melakukan dua tahapan pengujian. Tahap pengujian pertama yaitu membandingkan perhitungan setiap parameter yang terdapat pada *website* SkyLinkCal dengan *software* perhitungan serupa yaitu AMSAT IARU Excel versi 2016 dan juga dibandingkan dengan perhitungan secara manual. Tahap pengujian ke dua yaitu membandingkan visualisasi untuk melihat keakuratan dari setiap parameter yang ada dengan *software* lain yaitu GMAT NASA.

1. Pengujian Tahap Pertama

Pada tahapan awal pengujian skenario ini, dilakukan analisis dengan membandingkan hasil perhitungan setiap parameter dari *website* SkyLinkCal dengan hasil perhitungan menggunakan *software* AMSAT IARU Excel versi 2016 dan perhitungan manual. Pengujian dilakukan dengan memastikan seluruh nilai input pada ketiga metode disamakan, sehingga hasil perbandingan bersifat objektif dan terukur. Langkah ini bertujuan untuk menilai tingkat akurasi dan kesesuaian hasil kalkulasi SkyLinkCal terhadap standar perhitungan yang telah ada, serta mengidentifikasi kemungkinan deviasi signifikan yang dapat menjadi dasar penyempurnaan sistem. Perhitungan mencakup beberapa parameter utama beserta formula yang digunakan untuk memperoleh hasil akhir

TABEL 1
HASIL PERBANDINGAN PARAMETER JENIS ORBIT PADA SATELIT LEO

Parameter yang dihitung	Satelit LEO		
	Parameter Jenis Orbit		
	Perhitungan Website	Perhitungan AMSAT	Perhitungan Manual
<i>Eccentricity</i>	0.1	0.120351	0.12
<i>Mean Orbit Altitude</i>	1100.0	1100.0	1100.00
<i>Mean Orbit Radius</i>	7478.1	7478.14	7478.14
<i>Slant Range (km)</i>	3387.5	3387.6	3387.57

TABEL 2
HASIL PERBANDINGAN PARAMETER FREKUENSI PADA SATELIT LEO

Parameter yang dihitung	Satelit LEO		
	Parameter Frekuensi		
	Perhitungan Website	Perhitungan AMSAT	Perhitungan Manual
<i>Uplink</i>			
<i>Wavelength (λ)</i>	0.7	0.666	0.67
<i>Path loss</i>	156.1	156.1	156.07
<i>Downlink</i>			
<i>Wavelength (λ)</i>	2.2	2.204	2.20
<i>Path loss</i>	14.7	145.7	145.749

TABEL 3
HASIL PERBANDINGAN PARAMETER TRANSMITTER' PADA SATELIT LEO

Parameter yang dihitung	Satelit LEO		
	Parameter Transmitter		
	Perhitungan Website	Perhitungan AMSAT	Perhitungan Manual
<i>Uplink</i>			
<i>Transmitter Power (dBW)</i>	10.0	10.00	10.0
<i>Transmitter Power (dBm)</i>	40.0	40.00	40.0
<i>Total Line Length (Line A+B+C)</i>	26.30	26.3	26.3
<i>Total Cable Wave Guide Loss (dB)</i>	1.3	1.315	1.315
<i>Total Connector Loss (dB)</i>	0.3	0.3	0.3
<i>Total Line Losses (dB)</i>	3.6	3.62	3.615
<i>Total Power Deliver to Antenna (dBW)</i>	6.4	6.39	6.385
<i>Downlink</i>			
<i>Transmitter Power (dBW)</i>	3.0	3.0	3.0
<i>Transmitter Power (dBm)</i>	33.0	33.01	33.01
<i>Total Line Length (Line A+B+C)</i>	0.45	0.45	0.45
<i>Total Cable Loss/Wave Guide Loss (dB)</i>	0.261	0.261	0.261
<i>Total Connector Loss (dB)</i>	0.2	0.2	0.2
<i>Total Line Losses (dB)</i>	2.201	2.201	2.201
<i>Total RF Power Deliver to Antenna (dBW)</i>	0.8	0.81	0.81

TABEL 5
HASIL PERBANDINGAN PARAMETER *RECEIVER* PADA SATELIT LEO

Parameter yang dihitung	Satelit LEO		
	Parameter Receiver		
	Perhitungan Website	Perhitungan AMSAT	Perhitungan Manual
<i>Uplink</i>			
LA	0.08	0.08	0.08
LB	0.04	0.04	0.04
LC	0.04	0.04	0.04
Total In Line Connector	0.3	0.3	0.30
Total In-Line Losses from Antenna to LNA	1.96	1.96	1.96
Transmission Line Coefficient (α)	0.637	0.68	1
GLNA	63.1	63.1	63.09
System Noise Temperature (T_s)	261.0	261.0	261.03
<i>Downlink</i>			
LA	0.23	0.23	0.23
LB	0.03	0.028	0.03
LC	0.03	0.028	0.03
Total In Line Connector	0.2	0.2	0.2
Total In-Line Losses from Antenna to LNA	1.99	1.99	1.99
Transmission Line Coefficient (α)	0.632	0.633	0.6324
GLNA	63.10	63.1	63.09
Total Cable/Waveguide D Loss	2.3	2.3	2.3
System Noise Temperature (T_s)	509.6	510	509.633

TABEL 4
HASIL PERBANDINGAN PARAMETER ANTENNA POINTING LOSS PADA SATELIT LEO

Parameter yang dihitung	Satelit LEO		
	Parameter Antenna Pointing Loss		
	Perhitungan Website	Perhitungan AMSAT	Perhitungan Manual
<i>Uplink Ground Station</i>			
Antenna Roll-Off	33.2	33.23	33.23
Approx. Antenna Pointing Loss (dB)	0.5	0.49	0.49
<i>Downlink Ground Station</i>			
Antenna Roll-Off	33.2	33.23	33.23
Approx. Antenna Pointing Loss (dB)	0.5	0.49	0.49
Approx. Antenna Pointing Loss (dB)	0.5	0.49	0.49

TABEL 6
HASIL PERBANDINGAN PARAMETER ANTENNA POLARIZATION LOSS PADA SATELIT LEO

Parameter yang dihitung	Satelit LEO		
	Parameter Antenna Polarization Loss		
	Perhitungan Website	Perhitungan AMSAT	Perhitungan Manual
<i>Uplink</i>			
Axial ratio (Ant. #1)	1.1	1.12	1.12
Axial ratio (Ant. #2)	1.2	1.20	1.20
Polarization Angle θ between antennas (Radians)	1.6	1.570	1.570
Polarization Loss	1	0.978	1
Polarization Loss Result (dB)	0.1	0.10	0.09
Cross Pol. Power Fraction	0.02	0.022	0
Cross Pol. Power Fraction (dB)	-16.6	-16.57	-16.57
Cross Polarization Isolation (dB)	16.7	16.66	16.67
<i>Downlink</i>			
Axial ratio (Ant. #1)	1.1	1.12	1.12
Axial ratio (Ant. #2)	1.2	1.20	1.20
Polarization Angle θ between antennas (Radians)	1.6	1.570	1.570
Polarization Loss	1	0.978	1
Polarization Loss Result (dB)	0.1	0.10	0.09
Cross Pol. Power Fraction	0.02	0.022	0
Cross Pol. Power Fraction (dB)	-16.6	-16.57	-16.57
Cross Polarization Isolation (dB)	16.7	16.66	16.67

TABEL 7
HASIL PERBANDINGAN PARAMETER *UPLINK BUDGET & DOWNLINK BUDGET* PADA SATELIT LEO

Parameter yang dihitung	Satelit LEO		
	Parameter Uplink budget & Downlink budget		
	Perhitungan Website	Perhitungan AMSAT	Perhitungan Manual
<i>Uplink</i>			
Ground Station EIRP	24.9	24.9	24.9
Isotropic Signal Level at Spacecraft (dBW)	-134.4	-134.4	-134.37
Spacecraft Figure of Merit (G/T) (dB/K)	-23.7	-23.7	-23.72
Signal Power at Spacecraft LNA Output	-134.0	-133.99	-133.9
Spacecraft Receiver Noise Power ($P_n = kTB$) (dBW)	-167.4	-167.4	-167.44
Signal-to-Noise Power Ratio at G.S. Rcvr (dB)	33.5	33.15	33.54
System Link Margin (dB)	19.1	19.1	19.14
<i>Downlink</i>			
Spacecraft EIRP	3.2	3.209	3.19
Isotropic Signal Level at Ground Station (dBW)	-145.491	-145.519	-145.51
Ground Station Figure of Merit (G/T) (dB/K)	-10.6	-10.56	-10.56
Signal Power at Ground Station LNA Output	-129.5	-130	-129.5
Ground Station Receiver Noise Power ($P_n = kTB$) (dBW)	-174.54	-174.54	-174.54
Signal-to-Noise Power Ratio at G.S. Rcvr (dB)	45.03	45.036	45.04
System Link Margin (dB)	35.43	35.436	35.44

Pada skenario pertama tahap awal, dilakukan pengujian dengan membandingkan hasil perhitungan *link budget* dari *website* SkyLinkCal dengan hasil yang diperoleh melalui AMSAT IARU Excel 2016 dan perhitungan manual, menggunakan data orbit LEO sebagai acuan. Hasil menunjukkan bahwa nilai-nilai yang dihasilkan SkyLinkCal sangat konsisten dengan kedua metode lainnya, dengan perbedaan hanya muncul pada angka desimal di belakang koma akibat perbedaan pembulatan. Seluruh parameter penting seperti Slant Range, Free Space Loss, EIRP, dan Signal-to-Noise Ratio memberikan hasil akhir yang sepadan dan masih berada dalam batas toleransi teknis. Pengujian untuk orbit MEO dan GEO juga telah dilakukan dengan pendekatan yang sama, dan menunjukkan pola hasil yang serupa, di mana selisih nilai sangat kecil dan tidak memengaruhi kesesuaian hasil secara umum. Dengan demikian, orbit LEO digunakan sebagai contoh karena telah mewakili pola hasil perhitungan dari semua jenis orbit yang diuji. Hasil ini menunjukkan bahwa SkyLinkCal mampu menjalankan perhitungan *link budget* secara konsisten dan memberikan hasil yang selaras dengan metode perhitungan yang telah diakui.

2. Pengujian Tahap Kedua

Pengujian SkyLinkCal dilakukan dengan membandingkan hasil visualisasi dan perhitungan lintasan satelit dengan data dari GMAT NASA. Pengujian ini mencakup parameter seperti sudut inklinasi, apogee, perigee, dan jalur lintasan di permukaan bumi. Tujuannya adalah untuk menilai akurasi SkyLinkCal dalam merepresentasikan data orbit satelit.

TABEL 8
PERBANDINGAN POSISI AWAL DAN AKHIR SATELIT

Sistem	Posisi Awal Satelit 17.35 WIB (degree)		Posisi Akhir Satelit 18.35 WIB (degree)	
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude
SkyLinkCal	0,0079	150,2062	-52,7030	4,7517
GMAT NASA	0,214158	150,446	-44,3308	-9,95836
Selisih	0,206258	0,2398	-8,3722	14,71006

Pada hasil tabel 8 didapatkan selisih yang cukup jauh untuk *longitude* dan *latitude* posisi akhir dari satelit untuk *website* SkyLinkCal dan *software* GMAT NASA pada jam yang sama yaitu 18.35 WIB. Hal ini terjadi dikarenakan SkyLinkCal hanya memakai propagator *twobody* yang mengasumsikan bahwa hanya ada dua benda yang saling berinteraksi. Sedangkan *software* perbandingan menggunakan propagasi SGP4.

B. Skenario Kedua

Tahapan pertama, dilakukan dengan menyebar kuesioner penelitian secara *online* menggunakan Google Form dengan jumlah responden sebanyak 41 orang. Kuesioner dapat diisi oleh responden yang telah menggunakan *website* dan melakukan tinjauan terhadap semua fitur-fitur yang tersedia pada *website* perhitungan *link budget* satelit. Ketika data hasil dari jawaban setiap pertanyaan yang diajukan dalam kuesioner telah terkumpul, kemudian diolah dalam bentuk persentase dan menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS) agar dapat ditarik kesimpulan mengenai bagaimana *website* dinilai oleh para responden.

Dalam menentukan nilai skor SUS, diperlukan serangkaian tahapan perhitungan yang mengikuti protokol standar sebagai berikut:

- Nilai akhir dari setiap pertanyaan yang memiliki nomor ganjil (1, 3, 5, 7, dan 9) diperoleh melalui pengurangan angka satu terhadap nilai respon yang diberikan oleh responden.
- Untuk pertanyaan-pertanyaan yang bernomor genap (item 2, 4, 6, 8, dan 10), nilai akhir didapatkan dengan cara mengurangkan nilai respons responden dari angka lima.
- Hasil skor SUS akhir dilakukan dengan mengalikan jumlah keseluruhan nilai yang telah diolah dengan konstanta 2,5.

$$\text{Skor SUS} = ((Q1 - 1) + (5 - Q2) + (Q3 - 1) + (5 - Q4) + (Q5 - 1) + (5 - Q6) + (Q7 - 1) + (5 - Q8) + (Q9 - 1) + (5 - Q10)) \times 2.5 \quad (19)$$

Berdasarkan rumus perhitungan SUS, kuesioner dapat dihasilkan seperti pada tabel 9 di bawah ini:

TABEL 9
KALKULASI HASIL TOTAL SKOR SUS

No	Kalkulasi Hasil Total Skor SUS											Total Skor
	Responden	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	
1	R1	4	1	5	3	4	1	5	2	5	1	87.5
2	R2	5	1	4	3	5	1	5	3	5	1	87.5
3	R3	5	1	5	3	5	1	5	2	5	1	92.5
4	R4	5	1	5	3	5	1	5	2	5	1	92.5
5	R5	5	1	5	3	5	1	5	2	5	1	92.5
...
41	R41	3	1	5	2	4	2	5	2	5	2	82.5
Skor Rata-rata												82.988

TABEL 10
INTERPRETASI SUS

Skor SUS	Grade (Nilai)	Adjective Rating (Performa)	Kesimpulan
>80.3	A	Excellent	Acceptable
74-80.3	B	Good	Acceptable
68-74	C	Okay	Marginal
51-68	D	Poor	Marginal
<51	E	Awful	Not Acceptable

Berdasarkan tabel 10, skor SUS yang diperoleh SkyLinkCal sebesar 82,988 melebihi ambang batas 80,3. Skor ini menempatkan sistem pada Grade A dengan deskripsi kualitatif "Excellent" yang mencerminkan tingkat kegunaan tinggi dan pengalaman pengguna yang sangat memuaskan. Dalam hal penerimaan, skor tersebut tergolong "Acceptable", menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi atau melampaui standar kelayakan *usability*.

Tahapan kedua, yaitu menguji kinerja *website* ketika sedang digunakan atau diakses baik pada perangkat PC maupun *mobile*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan Google PageSpeed Insights [10] yang bertujuan mengetahui performa *website* perhitungan *link budget* satelit.

Pengujian versi *mobile* menunjukkan skor tertinggi pada *best practices* (96) dan SEO (91), menandakan struktur teknis dan optimasi yang baik. *Accessibility* meraih skor 87, namun masih perlu peningkatan untuk iOS. *Performance* menjadi aspek terendah dengan skor 69, akibat banyaknya gambar dan perbedaan spesifikasi perangkat. Oleh karena itu, peningkatan kecepatan dan responsivitas menjadi fokus utama, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



GAMBAR 3
PERFORMA WEBSITE UNTUK MOBILE

Pengujian versi *desktop* menunjukkan skor tertinggi pada *accessibility* (97), *best practices* (96), dan SEO (91), menandakan *website* mudah diakses, responsif, dan teroptimasi dengan baik. *Performance* mendapat skor 81, cukup baik namun masih bisa ditingkatkan untuk pengalaman yang lebih cepat. Hal tersebut didukung oleh Gambar 4 di bawah ini.



GAMBAR 4
PERFORMA WEBSITE UNTUK DESKTOP

Hasil pengujian performa *mobile* menunjukkan waktu muat yang cukup lambat, dengan *First Contentful Paint* 3,6 detik, *Largest Contentful Paint* 5,7 detik, dan *Speed Index* 4,8 detik. Meskipun *layout* stabil dan tidak ada *blocking time*, kecepatan akses masih perlu ditingkatkan untuk

meningkatkan pengalaman pengguna, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 di bawah ini.



GAMBAR 5
HASIL PENGUJIAN SETIAP METRIKS PADA MOBILE

Hasil pengujian performa *desktop* menunjukkan performa yang sangat baik, dengan *First Contentful Paint* 0,8 detik, *Largest Contentful Paint* 1,1 detik, dan *Speed Index* 1,1 detik. Meskipun *Total Blocking Time* mencapai 360 ms, secara keseluruhan *website* responsif dan stabil, dengan layout yang tidak mengalami pergeseran (*Cumulative Layout Shift* 0).



GAMBAR 6
HASIL PENGUJIAN SETIAP METRIKS PADA DESKTOP

C. Skenario Ketiga

Pengujian pada skenario ketiga bertujuan agar *board* attenuator HMC472 dapat mengatur nilai atenuasinya sesuai dengan nilai yang ada pada *website* serta validasi nilai atenuasi pada *board* attenuator HMC472. Dalam pengujian dibutuhkan alat tambahan yang berfungsi sebagai *controller* untuk mengatur nilai atenuasi pada *board* attenuator serta sebagai penghubung antara *website* dan *board* attenuator. Pada pengujian ini, *controller* yang digunakan adalah *board* Arduino UNO R4 Wi-Fi yang menggunakan MCU RA4M1 dan modul ESP32-S3.

Tahapan pertama dalam skenario ini adalah untuk menguji apakah *board* attenuator dapat mengubah nilai atenuasi sesuai dengan nilai yang ada pada *website*. Hal tersebut sesuai pada Gambar 7 dan Gambar 8 di bawah ini.



GAMBAR 7
NILAI PATH LOSS UNTUK FREKUENSI UPLINK 3300 MHz & FREKUENSI DOWNLINK 3100 MHz



GAMBAR 8
BUKTI BOARD ATENUATOR TERKONEKSI WEBSITE

Nilai *path loss uplink* dan *downlink* yang dihitung melalui *website* masing-masing sebesar 168,6 dB dan 168 dB. Dengan attenuator tetap 150 dB, maka atenuasi yang diatur pada *board* adalah 18,6 dB dan 18 dB, kemudian dibulatkan menjadi 18,5 dB untuk *uplink* dan 18 dB untuk *downlink*. Pengujian juga dilakukan pada frekuensi berbeda untuk memperoleh variasi *path loss*, dan pada percobaan kedua, nilai atenuasi yang diatur tetap sesuai dengan hasil perhitungan. Nilai atenuasi pada *board* untuk *uplink* dan *downlink* juga sama, seperti ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10

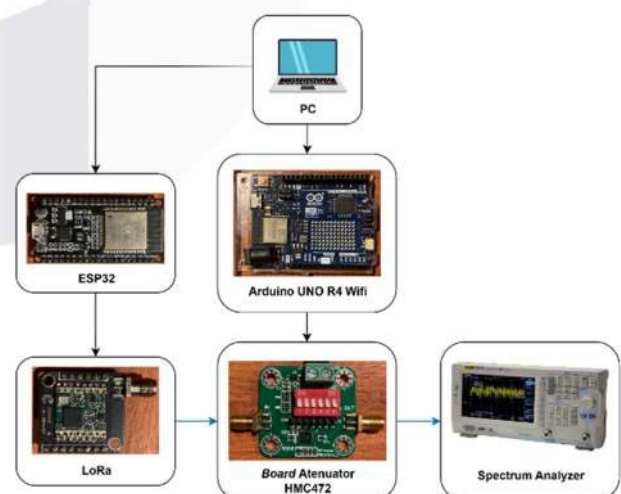


GAMBAR 9
NILAI PATH LOSS UNTUK FREKUENSI UPLINK 923 MHz & FREKUENSI DOWNLINK 925 MHz



GAMBAR 10
BUKTI BOARD ATENUATOR TERKONEKSI WEBSITE

Pada tahapan kedua, pengujian dilakukan untuk memvalidasi semua nilai atenuasi pada *board* attenuator. Pengujian *board* attenuator dilakukan pada frekuensi 923 MHz. Dalam pengujian ini, *transmitter* yang digunakan adalah *board* RFM95 LoRa yang dihubungkan dengan ESP32. Alat yang digunakan pada sisi *receiver* adalah *spectrum analyzer*.



GAMBAR 11
SKENARIO PENGUJIAN BOARD ATENUATOR

TABEL 11
PENGUJIAN BOARD ATENUATOR

Percobaan	Pengaturan Nilai Atenuasi						Nilai Atenuasi (dB)	Nilai Diterima (dBm)
	V6 (0.5 dB)	V5 (1 dB)	V4 (2 dB)	V3 (4 dB)	V2 (8 dB)	V1 (16 dB)		
1	1	1	1	1	1	1	0	6,59
2	0	1	1	1	1	1	0,5	6,01
3	1	0	1	1	1	1	1	5,71
4	0	0	1	1	1	1	1,5	5,05
5	1	1	0	1	1	1	2	4,69
6	0	1	0	1	1	1	2,5	4,2
7	1	0	0	1	1	1	3	3,58
8	0	0	0	1	1	1	3,5	3,25
9	1	1	1	0	1	1	4	2,68
10	0	1	1	0	1	1	4,5	2,09
11	1	0	1	0	1	1	5	1,73
12	0	0	1	0	1	1	5,5	1,33
13	1	1	0	0	1	1	6	0,73
14	0	1	0	0	1	1	6,5	0,85
15	1	0	0	0	1	1	7	0,12

Pengaturan atenuasi menggunakan 6 bit digital dengan step 0,5 dB, di mana V6 merupakan *Least Significant Bit* (LSB). Daya yang diterima di *receiver* tidak hanya hasil pengurangan antara *output power* dan atenuasi. Saat atenuasi diset 0 dB, output +10 dBm dari *transmitter* hanya terdeteksi sebesar 6,59 dBm di *spectrum analyzer*, menunjukkan adanya tambahan *loss* sebesar 3,41 dB. *Loss* ini kemungkinan berasal dari *insertion loss board* atenuator (~1,8 dB untuk frekuensi di bawah 1,5 GHz), serta dari kabel dan konektor. Dengan demikian, daya yang diterima dipengaruhi oleh nilai atenuasi, *insertion loss* dan *loss* lainnya sehingga tidak sepenuhnya konsisten.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan aplikasi berbasis *website* bernama SkyLinkCal yang dapat digunakan sebagai alat bantu dalam perhitungan *link budget* untuk sistem komunikasi satelit, dengan cakupan orbit LEO, MEO, dan GEO. Aplikasi ini terbukti mampu menyelesaikan kompleksitas kalkulasi teknis dengan hasil yang konsisten terhadap perhitungan manual maupun *software* AMSAT IARU Excel, dengan selisih yang tidak signifikan hanya pada digit desimal akhir. Parameter-parameter utama seperti *slant range*, SNR, dan *link margin* dihitung berdasarkan regulasi yang berlaku, sehingga hasilnya valid dan dapat diandalkan. Di sisi lain, dari aspek pengalaman pengguna hasil evaluasi melalui *System Usability Scale* (SUS) menunjukkan skor 82,988 yang dikategorikan sebagai “*Excellent*”, didukung pula oleh mayoritas responden yang menyatakan bahwa aplikasi ini mudah digunakan. Visualisasi orbit dua dan tiga dimensi yang ditampilkan berhasil memberikan pemahaman yang interaktif terhadap dinamika satelit dan validasinya telah menunjukkan kesesuaian dengan simulasi dari *software* GMAT milik NASA.

Secara umum, pengujian sistem ini menunjukkan bahwa SkyLinkCal mampu menjawab tantangan dalam kalkulasi dan visualisasi *link budget* secara tepat dan efisien, meskipun terdapat keterbatasan dalam aspek simulasi *hardware*, khususnya pada nilai atenuasi maksimum yang belum mencukupi dalam skenario uji tertentu. Kendala ini masih dapat diatasi melalui pengembangan *hardware* tambahan di masa depan. Dengan demikian, aplikasi ini layak digunakan dan memiliki potensi untuk terus dikembangkan lebih lanjut sebagai *platform* edukatif maupun profesional dalam bidang sistem komunikasi satelit.

REFERENSI

- [1] D. Yuniarti, “Studi Perkembangan dan Kondisi Satelit Indonesia (Diah Yuniarti) Studi Perkembangan dan Kondisi Satelit Indonesia The Study of Development and Condition of Indonesian Satellites.”
- [2] M. Akhtaruzzaman, S. M. S. Bari, S. A. Hossain, and Md. M. Rahman, “Link Budget Analysis in Designing a Web-application Tool for Military X-Band Satellite Communication,” *MIST INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY*, vol. 8, pp. 17–33, Jul. 2020, doi: 10.47981/j.mijst.08(01)2020.174(17-33).
- [3] Mathworks, “What Is Satellite Communications?, Sattelite Communication Toolbox.” Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/satcom/gs/what-is-satellite-communications.html>
- [4] “HANDBOOK ON SATELLITE COMMUNICATIONS (HSC) (Edition 3).”
- [5] Dennis. Roddy, *Satellite communications*. McGraw-Hill, 2011.
- [6] “SATELLITE COMMUNICATIONS SYSTEMS Sixth Edition.”
- [7] L. J. Ippolito, “Satellite Communications Systems Engineering Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance.”
- [8] I. Radiocommunication Bureau, “RECOMMENDATION ITU-R S.1328-5 (07/2024) Satellite system characteristics to be considered in frequency sharing analyses within the fixed-satellite service,” 2024. [Online]. Available: <https://www.itu.int/publ/R-REC/en>
- [9] L. J. Ippolito, *Radiowave Propagation in Satellite Communications*. Springer Netherlands, 1986. doi: 10.1007/978-94-011-7027-7.
- [10] Google Developers, “PageSpeed Insights.” Accessed: Jul. 17, 2025. [Online]. Available: <https://pagespeed.web.dev/>