

Volume 2, No. 1, Juni 2013

ISSN : 2301-4652

Jurnal Ilmiah

SESTRUM

Sistem - kEndali - Tenaga - elektRonika - telekomUnikasi - koMputer



Jurusan Teknik Elektro
Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

DEWAN REDAKSI**Pengarah**

Dekan Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Penanggung Jawab

Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Suhendar, S.Pd., M.T.

Pemimpin Umum

Dr. Alimuddin, S.T., M.M., M.T.

Pemimpin Redaksi

Anggoro Suryo Pramudyo, M.Kom.

Mitra Bestari

Prof. Dr. Ir. Kudang Boro Seminar, M.Sc. (IPB)

Prof. Dr. Salama Manjang, M.T. (UNHAS)

Prof. Dr.Eng. Wahyu Widada, M.Sc. (LAPAN)

Prof. Dr.Ing. Fahmi Amhar (BAKOSURTANAL)

Dr. Eng. Ir. Zulfajri Basri Hasanudin, M.Eng. (Dewan Riset Nasional)

Penyunting

Wahyuni Martiningsih, Ir., M.T.

Muhammad Iman Santoso, S.T., M.Sc.

Hartono, S.T., M.T.

Supriyanto, S.T., M.Sc.

Romi Wiryadinata, S.T., M.T.

Rocky Alfan, S.T., M.Sc.

Muhammad Sadikin, S.T., M.T.

Irma Saraswati, S.Si., M.Si.

Yus Rama Denny, S.Si., M.Si.

Kesekretariatan

H. Andri Suherman, S.Si., M.Si.

Ri Munarto, Ir., M.Eng.

Siswo Wardoyo, S.T., M.Eng.

Heri Haryanto, S.T., M.T.

Herudin, S.T., M.T.

Yeni Apriyeni, A.Md.

Tata Letak & Desain

Rian Fahrizal, S.T., M.Eng.

Endi Permata, S.T., M.T.

Didik Aribowo, S.T., M.T.

Muhammad Otong, S.T., M.T.

DATA BIBLIOGRAFI

SETRUM merupakan jurnal ilmiah yang diterbitkan oleh Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa (UNTIRTA). SETRUM adalah singkatan dari “Sistem – kEndali – Tenaga – elektRonika – telekomUnikasi - koMputer” yang merupakan 5 Bidang Keahlian yang ada di Jurusan Teknik UNTIRTA. SETRUM diterbitkan setiap bulan Juni dan Desember setiap tahunnya dan terbit pertama kali pada bulan Juni 2012. SETRUM memuat 8 judul penelitian pada tiap terbitannya yang disajikan dalam Bahasa Indonesia dilengkapi dengan abstrak dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris.

DAFTAR ISI

Sistem Pendinginan Generator PT Indonesia Power UBP Suralaya Menggunakan Hidrogen	1-5
Didik Aribowo, Amalia Rahmawaty	
Studi Pemanfaatan Energi Matahari di Pulau Panjang Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif	6-15
Romi Wiryadinata, Ali Imron S., Ri Munarto	
Analisis Pengaruh Temperatur dan kadar Garam Terhadap Hambatan Jenis Tanah	16-21
Aris Sunawar	
Uji Kemampu-Bakaran Pembungkus Kabel NYM Berstandart SNI Dengan Differencial Scanning Calorimetric	22-24
Himawan Hadi Sutrisno, Riza Wirawan, Triyono	
Perancangan Model Simulasi Sistem Kontrol pH pada pengolahan limbah di Reject Treatment Plant PT. KRAKATAU STEEL Dengan Metode Fuzzy Logic	25-29
Oktavia Djiah Pratiwi, Alimuddin, Ri Munarto	
Analisis Arus dan Tegangan Transien Akibat Pelepasan Beban Pada Sisi Primer Transformator Unit 5, Unit 6 Dan Unit 7 Suralaya	30-41
Angga Adi Prayitno, Suhendar, Herudin	
Estimasi Kanal Akustik Bawah Air Untuk Perairan Dangkal Menggunakan Metode Least Square (LS) dan Minimum Mean Square Error (MMSE)	42-48
Mardawia M. Parenreng, Wirawan, Tri Budi Santoso	
Studi Pemanfaatan Arus Laut Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif di Wilayah Selat Sunda	49-57
Budi Supian, Suhendar, Rian Fahrizal	

Sistem Pendinginan Generator PT Indonesia Power UBP Suralaya Menggunakan Hidrogen

Didik Aribowo¹, Amalia Rahmawaty²

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Jl. Jenderal Sudirman Km. 3 Cilegon-Banten 42435

¹aribowo82@yahoo.co.id, ²amaliarrrr@gmail.com

Abstrak — Pembangkit listrik, dalam hal ini Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), generator merupakan salah satu komponen yang sangat penting di mana generator memiliki fungsi mengkonversi energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. Akibat arus yang mengalir melewati konduktor di dalam generator panas terjadi, agar generator tetap dapat bekerja dengan baik dibutuhkan suatu sistem pendinginan untuk menghilangkan panas tersebut. Sistem pendinginan generator menggunakan gas hidrogen (H_2) sebagai medium jauh lebih efektif dibandingkan mendinginkan generator menggunakan udara, karena H_2 memiliki konduktivitas thermal dan koefisien transfer panas yang jauh lebih tinggi dibanding udara. Kelemahan H_2 bersifat eksplosif apabila tercampur dengan udara, maka dari itu dibutuhkan suatu sistem yang handal untuk mencegah H_2 bocor ketika bersirkulasi di dalam rumah generator, yaitu sea oil system. Sistem ini berfungsi sebagai perapat hidrogen sekaligus pelumas shaft.

Kata Kunci : PLTU, Generator, Sistem Pendinginan, Hidrogen

Abstract — The power plant, in this case the steam power plant (power plant), the generator is one very important component which has a function generator converts the mechanical energy generated by the turbine into electrical energy. Due to the current flowing through a conductor in a heat generator, so that the generator can still work well we need a cooling system to remove the heat. Generator cooling system using hydrogen gas (H_2) as the medium is much more effective than using air to cool generators, because H_2 has a thermal conductivity and heat transfer coefficient is much higher than the air. H_2 weakness is eksplosif when mixed with air, and therefore needed a robust system to prevent leaking H_2 when circulating in the house generator, namely sea oil system. This system serves as well as lubricants shaft seals hydrogen.

Keywords : Power Plant, Generators, Cooling Systems, Hydrogen

I. PENDAHULUAN

Dalam kehidupan manusia sehari-hari tidak bisa lepas dari kebutuhan akan listrik. Energi listrik tersebut dihasilkan oleh pusat-pusat pembangkit listrik. Pada proses pembangkitan tenaga listrik tersebut dibutuhkan suatu alat untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik, yang dikenal dengan sebutan generator. Untuk menghasilkan energi listrik yang handal, generator tersebut harus bekerja sesuai dengan kapasitas dan kemampuannya.

Generator dapat menghasilkan tenaga listrik ketika medan magnet yang ada pada generator dieksitasi. Akibat arus yang mengalir pada konduktor, panas terjadi. Generator memiliki banyak konduktor dan arus yang mengalir melewati konduktor, menciptakan banyak panas. Jika panas itu tidak “dihilangkan” maka dapat menyebabkan kumparan di generator menjadi rusak (isolasi melesup sehingga dapat terjadi *short*).

Maka dari itu dibutuhkan suatu sistem pendingin untuk “menghilangkan” panas pada generator tersebut. Mesin pendingin hidrogen mulai diproduksi dan digunakan secara besar-besaran sejak tahun 1950. Hidrogen memiliki karakteristik dimana karakteristik

tersebut akan menguntungkan apabila hidrogen digunakan sebagai medium pendingin dibandingkan mendinginkan menggunakan udara sebagai medium.

Selain memiliki karakteristik yang menguntungkan hidrogen juga memiliki sifat eksplosif jika tercampur udara dengan perbandingan hidrogen sampai dengan 76%. Maka dari itu dibutuhkan suatu sistem untuk mencegah hidrogen yang ada dalam *housing* generator bercampur dengan udara, yang dikenal dengan *seal oil system*.

Tujuan yang hendak dicapai dalam pelaksanaan kerja praktek ini adalah :

1. Mempelajari sistem pendinginan yang ada pada generator, khususnya sistem pendinginan yang menggunakan hidrogen sebagai medium.
2. Mempelajari karakteristik hidrogen, serta kelebihan dan kekurangannya sebagai medium pendingin.
3. Mengetahui secara ringkas sistem seal oil sebagai pelumas dan perapat hidrogen.

Batasan masalah dalam pelaksanaan kerja praktek ini adalah :

1. Pembahasan berfokus pada pendinginan generator menggunakan gas hidrogen (H_2), karakteristik, siklus dan cara pengisian hidrogen.

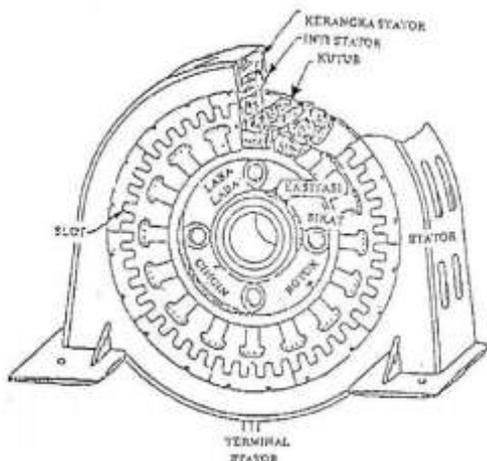
2. Sistem seal oil hanya akan dibahas secara singkat mengenai fungsinya sebagai perapat hidrogen dan *backup system* operasinya.

II. DASAR TEORI

2.1 Konstruksi Generator Sinkron

Generator terdiri dari dua bagian yang paling utama, yaitu:

1. Bagian yang diam (stator):
 - a. Inti stator berupa cincin laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (eddy current losses), pada inti ini terdapat beberapa slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya.
 - b. Belitan stator terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot dan ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan
 - c. untuk mendapatkan tegangan induksi.
 - d. Alur stator merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan.
 - e. Rumah stator merupakan bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder.



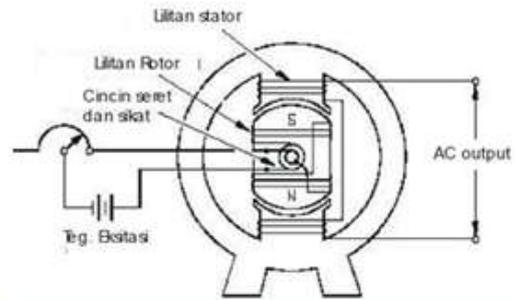
Gambar 1. Konstruksi Generator Sinkron

2. Bagian yang bergerak (rotor).

Rotor adalah bagian generator yang bergerak atau berputar, antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara (*air gap*). Rotor terdiri dari dua bagian umum:

- a. Inti kutub,
- b. Kumparan medan.

Bagian inti kutub memiliki poros dan inti rotor yang memiliki fungsi sebagai jalan atau jalur fluks magnet yang dibangkitkan oleh kumparan medan. Kumparan medan juga memiliki dua bagian, yaitu bagian penghantar sebagai jalur untuk arus pemacuan dan bagian yang diisolasi. Isolasi pada bagian ini harus benar-benar baik dalam hal kekuatan mekanisnya, ketahanannya akan suhu yang tinggi dan ketahanannya terhadap gaya sentrifugal yang besar. Konstruksi rotor untuk generator yang memiliki nilai putaran relatif tinggi biasanya menggunakan konstruksi rotor dengan kutub silindris (*cylindrica poles*) dan jumlah kutubnya relatif sedikit (2, 4, 6). Konstruksi ini dirancang tahan terhadap gaya yang lebih besar akibat putaran yang tinggi.



Gambar 2. Konstruksi Rotor Silindris

2.2 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Adapun prinsip kerja generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut:

1. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan fluks yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.
2. Penggerak mula (*prime mover*) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya.
3. Perputaran tersebut sekaligus akan memutar medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan medan. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar sehingga pada kumparan jangkar yang terletak di stator akan dihasilkan fluks magnetik yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu. Adanya perubahan fluks magnetik yang melingkupi suatu kumparan akan menimbulkan ggl induksi pada ujung-ujung kumparan tersebut, hal tersebut sesuai dengan persamaan:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$E_{\text{eff}} = Cn\phi_m \quad (2)$$

2.3 Sistem Pendingin Generator

Generator berfungsi merubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. Medan magnet yang melalui inti stator dan juga arus listrik yang melalui kumparan stator dan rotor generator akan menimbulkan panas. Agar kerusakan akibat panas pada isolasi dapat dicegah, maka panas tersebut harus dihilangkan. Untuk itu diperlukan media pendingin generator.

1. Sistem Pendinginan Generator Menggunakan Udara Langsung

Untuk mendinginkan temperatur (suhu) pada belitan stator dan rotor digunakan udara dari luar yang ditarik oleh *fan* rotor melalui *filter*, kemudian dihisap melalui celah-celah (lubang udara) baru ke atmosfer, begitu seterusnya.

Kelebihan generator jenis ini:

- a. Sistem pemeliharannya sangat mudah karena generator jenis ini lebih sederhana.
- b. Biaya pemeliharaan murah.
- c. Risiko kebakaran kecil.

Kekurangan generator jenis ini:

- a. Kondisi belitan rotor dan stator sangat kotor karena menggunakan udara langsung yang membawa berbagai jenis debu dan kotoran.
- b. Proses *heat transfer* temperatur berlangsung lambat karena menggunakan udara langsung.
- c. Kelembaban udara tinggi karena penggunaan udara langsung menyebabkan kelembaban udara tidak dapat diatur, sehingga dapat membahayakan komponen generator tersebut.
- d. *Life time* generator lebih pendek.

2. Sistem Pendinginan Generator Menggunakan Udara Tetap

Pada generator jenis ini, mendinginkan temperatur belitan stator dan rotor menggunakan udara tetap yang berada di dalam generator. Udara tersebut ditarik oleh *fan* rotor dan dihembuskan ke celah-celah belitan stator dan rotor, sehingga menimbulkan sirkulasi udara secara terus-menerus melalui alat pendingin udara.

Kelebihan generator jenis ini:

- a. Sistem pemeliharaannya mudah.
- b. Biaya pemeliharaannya murah.
- c. Risiko terjadi kebakaran relatif kecil.
- d. Relatif bersih jika dibandingkan dengan generator yang menggunakan udara langsung.

Kekurangan generator jenis ini:

- a. *Heat transfer* temperatur lebih lambat karena menggunakan udara dan proses pendinginannya juga lambat.
- b. Kelembaban udara tinggi karena generator jenis ini tidak bisa mengatur kelembaban udara di dalam generator.
- c. *Life time* generator lebih pendek.

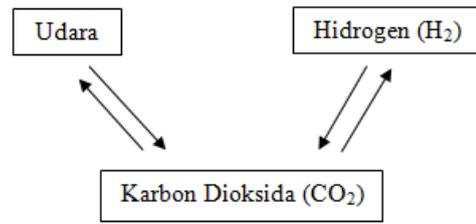
III. SISTEM PENDINGIN HIDROGEN

3.1 Sistem Pendingin Hidrogen

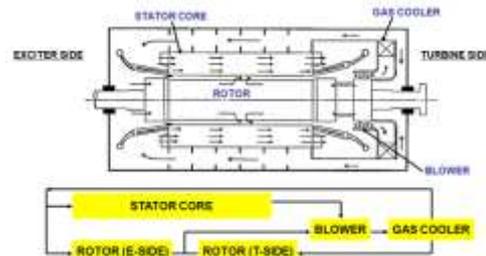
Cara lain untuk mendinginkan generator adalah dengan mensirkulasikan gas hidrogen (H_2) di dalam rumah generator dan di sekitar rotor. H_2 tujuh sampai sepuluh kali lipat lebih baik dalam menyerap dan mentransfer panas dibandingkan dengan udara. Artinya untuk ukuran generator yang sama, lebih banyak arus yang dapat dialirkan pada kumparan stator dan rotor jika didinginkan menggunakan H_2 .

H_2 bersifat eksplosif jika tercampur dengan udara dengan perbandingan 4-76%. Pada saat *overhaul* atau pada saat-saat tertentu ketika *housing* generator harus dibuka, H_2 yang berada dalam generator tidak boleh tercampur dengan udara langsung. Maka dari itu dibutuhkan suatu medium untuk memisahkan H_2 dan udara. Digunakan karbon dioksida atau CO_2 untuk membersihkan generator sebelum dimasuki baik oleh H_2 maupun udara.

Di dalam generator terdapat *blower* yang berfungsi mengarahkan H_2 ke bagian-bagian generator yang perlu didinginkan. Untuk kumparan stator, gas hidrogen masuk dari arah *exciter* dan keluar dari sisi turbin. Untuk kumparan rotor, gas masuk dari kedua ujung kumparan dan keluar dari tengah kumparan.



Gambar 3. Alur Pengisian Gas



Gambar 4. Cooling Gas Flow

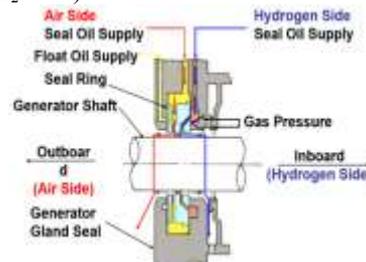
Temperatur gas hidrogen sebelum menyerap panas adalah sekitar $45^{\circ}C$, kemudian gas diarahkan oleh *blower* ke *gas cooler* yang berfungsi mendinginkan gas yang membawa panas generator. Gas didinginkan menggunakan air tawar yang memiliki temperatur $35^{\circ}C$ yang dialirkan pada pipa-pipa di dalam *gas cooler*.

Kenaikan kelembaban didalam generator akan mengalami kerugian maka dari itu apabila kemurnian H_2 jatuh dibawah 90%, H_2 diatur agar bersirkulasi melalui *gas dryer* yang berfungsi menjaga kelembaban gas. *Dryer* terhubung pada *blower* dan mengandung 12kg *activated alumina* sebagai penyerap kelembaban.

3.2 Seal Oil System

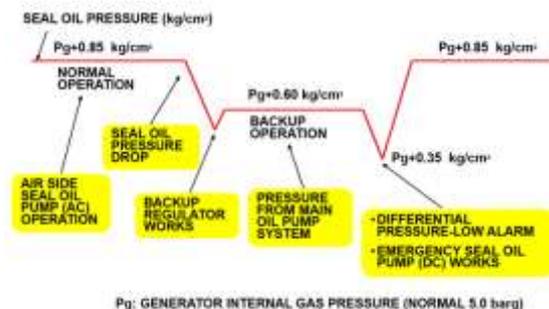
Rotor pada generator dikopel dengan poros turbin dan berputar bersama-sama dengan kecepatan yang sama, dan ujung lain rotor masuk ke *exciter house* untuk proses eksitasi. Maka dari itu pada kedua sisi di *housing* generator terdapat celah tempat poros yang menghubungkan *housing* generator, *exciter* dan turbin berputar. Agar gas hidrogen (H_2) yang berada dalam *housing* generator tidak bocor keluar maka dibutuhkan sesuatu untuk menjaga hidrogen pada celah yang ada pada sisi *housing*.

Seal Oil System merupakan suatu sistem alat bantu dalam generator yang berfungsi sebagai pelumas *seal ring* sekaligus perapat hidrogen. Sistem Seal Oil ini ditopang oleh dua sisi tekanan, yakni sisi udara (*Air Side*) dan sisi hidrogen (H_2 Side).



Gambar 5. Konstruksi Gland Seals

Tekanan minyak pada sistem seal oil dijaga lebih besar daripada tekanan gas hidrogen yang ada di dalam generator, sebesar $P_g+0,85 \text{ kg/cm}^2$, dimana P_g adalah tekanan di dalam generator sebesar 4 kg/cm^2 . Untuk memastikan tidak ada kebocoran hidrogen dibutuhkan sistem seal oil yang handal dan bekerja terus menerus. Pada sistem seal oil disini terdapat *backup operation* untuk menjaga seandainya tekanan seal oil pada sisi udara menurun menjadi lebih kecil dibandingkan sisi H_2 atau jika unit mati mendadak.



Gambar 6. Seal Oil Backup System

Terdapat tiga tahap operasi pada sistem seal oil, yaitu: *normal operation*, *backup operation* dan *emergency operation*.

Pada operasi normal seal oil dipompa dari *main oil tank* menggunakan motor AC yang mendapat suplai dari UST (*Unit Service Transformer*), tekanan diatur agar memenuhi standar yaitu $P_g+0,85 \text{ kg/cm}^2$ oleh *differential pressure regulator*.

Jika motor AC yang memompa seal oil berhenti, hal itu akan menyebabkan tekanan seal oil turun menjadi $P_g+0,6 \text{ kg/cm}^2$. Pada saat itu minyak akan disuplai dari turbin. Ini merupakan *backup operation* pada seal oil.

Jika kondisi tidak memungkinkan untuk mensuplai minyak dari turbin ke sistem seal oil maka tekanan akan jatuh sampai $P_g+0,35 \text{ kg/cm}^2$ yang mana merupakan batas minimum perbedaan tekanan antara hidrogen dan seal oil. Alarm akan menyala, dan *emergency motor DC* yang mendapat suplai tegangan dari baterai akan bekerja dan memompa minyak ke sistem seal oil sampai tekanan kembali pada $P_g+0,85 \text{ kg/cm}^2$.

IV. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa, maka dapat diambil beberapa kesimpulan, antara lain :

1. Generator menghasilkan panas pada konduktor yang diakibatkan arus yang mengalir. Panas harus “dihilangkan” agar generator bisa tetap bekerja secara efisien. Maka itu dibutuhkan suatu sistem pendingin generator yang handal diantara sistem pendingin yang lainnya, yaitu sistem pendingin generator menggunakan hidrogen.
2. H_2 memiliki karakteristik sebagai berikut:

Characteristic	Air	Hydrogen
Density	1.00	0.07
Thermal Conductivity	1.00	7.00
Heat Transfer Coefficient	1.00	1.25

Explosive	No	Yes
Oxidizing Agent	Yes	No

Sehingga memungkinkan generator yang menggunakan hidrogen sebagai medium pendingin memiliki kelebihan, yaitu:

- Heat transfer temperatur cepat.
- Generator menjadi lebih bersih.
- Life time generator menjadi lebih panjang.

Dan kekurangannya adalah:

- a. Pemeliharaan yang sulit.
 - b. Biaya pemeliharaan tinggi.
 - c. Hidrogen bersifat eksplosif jika bercampur dengan udara.
3. Dibutuhkan suatu sistem yang handal untuk mencegah hidrogen keluar dari rumah generator, yang dikenal dengan *seal oil system* memungkinkan hidrogen tetap tinggal di dalam rumah generator dengan cara memberikan tekanan yang telah diatur pada kedua sisi rumah, dimana poros generator berada.

4.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan oleh penulis diantaranya :

1. Karena generator merupakan alat yang sangat penting dalam sebuah sistem pembangkitan tenaga listrik maka sistem-sistem yang menunjang seperti sistem proteksi dan sistem pendingin harus dibuat sangat handal dan efektif.
2. Antara karyawan dan peserta PKL sebaiknya menjaga hubungan baik dan saling melengkapi ilmu pengetahuan satu sama lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mitsubishi. 1984. Suralaya Steam Power Plant Units 1 & 2 Maintenance Manual Volume TM 11 Generator.
- [2] Mitsubishi. 1984. Suralaya Steam Power Plant Units 1 & 2 Design Manual Volume TD 03 Generator & Ancillary (1).
- [3] Diktat Pusat Pelatihan dan Pendidikan PT. PLN (Persero), Pendingin Generator.
- [4] Diktat Pusat Pelatihan dan Pendidikan PT. PLN (Persero), Perapat Generator.
- [5] Lemberg, Alex. 2012. Oil Ingress in Medium GE Generators. GE Energy: Power Generation Services.
- [6] <http://www.control.com/thread/1267097548>
- [7] <http://saungpinkyku.blogspot.com/2011/12/sistem-bahan-bakar-pltu-rembang.html>
- [8] <http://tapakpakulangit.wordpress.com/2009/11/19/siklus-pltu-pembangkit-listrik-tenaga-uap/>
- [9] <http://blogs.itb.ac.id/el2244k0112211029ardinathasanjayaputra/>

Biodata Penulis

1. Didik Aribowo, ST.,MT., dilahirkan di Jambi pada 15 Februari 1982. Menamatkan studi S-1 di Jurusan Teknik Elektro bidang konsentrasi Non-Power di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Studi S-2 mengambil peminatan telekomunikasi multimedia

Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi sepuluh
November Surabaya. Email : aribowo82@yahoo.co.id

2. Nama : Amalia Rahmawaty
TTL : Serang, 27 Maret 1992
NPM : 3332100301
Jurusan : Teknik Elektro
Konsentrasi : Power
Email : mocc_fame@yahoo.com

Studi Pemanfaatan Energi Matahari di Pulau Panjang Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif

Romi Wiryadinata¹, Ali Imron S², Ri Munarto³

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon, Indonesia

¹romi@wiryadinata.web.id, ²ali.imrons@yahoo.com, ³ri_munarto@yahoo.com

Abstrak – Pembangkit tenaga listrik di Pulau Panjang dipasok oleh tenaga diesel dengan 12 jam waktu operasi, sehingga dibutuhkan tambahan pasokan energi terbarukan untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sebuah sistem surya sebagai pembangkit listrik alternatif pada pembangkit listrik tenaga hybrid PLTS-PLTD. Sistem PLTS digunakan untuk mengurangi batas waktu diesel bekerja agar diperoleh kinerja yang optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem surya dapat menghasilkan energi dari 153,89 kWp, 164684kWh/tahun pasokan energi, kualitas energi 94,73%, keandalan sistem 79,79%, dan kerugian sistem 33,66%. Dalam skema PLTH diperoleh kontribusi dari PLTS-PLTD sebesar 33% sampai 67%, BPP PLTH sebesar \$ 0,64/kWh dan dapat mengurangi emisi karbon sebesar 85,93%.

Kata kunci : Energi terbarukan, PLTS, PLTD, PLTH

Abstract – Panjang Island power supply has supplied by diesel power with 12 hours of operating time, so it takes an extra supply of renewable energy to improve the reliability of the electrical system. This research is aimed to design a solar system as an alternative electricity generator at a hybrid power plant of PLTS-PLTD. PLTS system is utilized to reduce the working time limit diesel to obtain optimum working. The results showed that the solar system can generates an energy of 153.89 kWp, 164684kWh/year of energy supply, 94.73% energy quality, 79.79% of the system reliability, and 33.66% of system losses. In the PLTH scheme obtained contributions from PLTS-PLTD by 33% until 67%, BPP PLTH of \$ 0.64/kWh and can reduce carbon emissions by 85.93%.

Keywords : Renewable Energy, PLTS, PLTD, PLTH

I. PENDAHULUAN

Kelistrikan di Pulau Panjang sampai saat ini disuplai oleh PLTD dengan waktu operasi 12 jam, agar keandalan kelistrikan di Pulau Panjang meningkat dan dapat teraliri listrik selama 24 jam maka dibutuhkan suplai pembangkit alternatif terbarukan. Peningkatan keandalan kelistrikan di Pulau Panjang diperlukan untuk menunjang perkembangan ekonomi, sosial dan budaya di Pulau Panjang. Potensi pengembangan PLTS di Indonesia sangat menjanjikan dilihat dari letak geografis Indonesia yang berada pada garis khatulistiwa. Pulau Panjang memiliki potensi energi listrik tenaga surya sebesar 4,61kW/m²/hari (BMKG, 2011). Besarnya potensi ini dapat dimanfaatkan untuk skema pembangkit listrik hibrida PLTS-PLTD di Pulau Panjang. Pembangkit alternatif terbarukan yang cocok dengan keadaan geografis dan potensi Pulau Panjang adalah PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya).

Skema pembangkit listrik hibrida diperlukan untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan di Pulau Panjang yaitu dengan cara mengurangi waktu operasi PLTD sehingga dapat dapat mengurangi inefisiensi biaya bahan bakar serta merancang sistem PLTS untuk meningkatkan produksi listrik di Pulau Panjang.

II. LANDASAN TEORI

A. Energi Matahari

Matahari memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi disebut *insolation* (*incoming solar radiation*) yang mengalami penyerapan (*absorpsi*), pemantulan, hamburan, dan pemancaran kembali atau *reradiasi*. Radiasi tersebut hanya sekitar 50% yang dapat diserap oleh bumi [1]. Matahari sebenarnya mempunyai posisi yang tetap dalam sistem tata surya, namun terlihat bergerak melintasi langit ketika diamati dari permukaan bumi. Pergerakan matahari ini terlihat nyata sebagai pengaruh dari rotasi bumi. Sebagai konsekuensi pergerakan ini, sudut sinar matahari jatuh secara langsung ke koordinat pengamat berubah secara kontinu. Posisi matahari dapat diketahui dengan pengetahuan pengamat mengenai garis lintang (*latitude*) dan garis bujur (*longitude*), disamping waktu dan tanggal pengamatan. Perbedaan garis lintang dan bujur suatu daerah akan mempengaruhi potensi energi matahari di daerah tersebut, oleh karena itu untuk mendapatkan energi matahari yang optimal ada dua hal yang harus dipertimbangkan, yaitu sudut elevasi dan sudut *azimuth* [6].

B. PLTS

1. Panel Surya

Sel surya terdiri dari sambungan bahan semi-konduktor bertipe *p* dan *n* (*p-n junction semiconductor*) yang jika terkena sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron, aliran elektron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik. Semi-konduktor jenis *n* merupakan semi-konduktor yang memiliki kelebihan elektron sehingga kelebihan muatan negatif (*n*= negatif), sedangkan semi-konduktor jenis *p* memiliki kelebihan *hole* sehingga kelebihan muatan positif (*p*= positif) [3].Sejumlah modul umumnya terdiri dari 36 sel surya atau 33 sel dan 72 sel. Modul-modul ini kemudian dirangkai menjadi panel surya dan jika panel surya ini dihubungkan secara baris dan kolom disebut dengan *array*.Pengoperasian maksimum panel surya sangat bergantung pada temperatur, *insolation*, kecepatan angin, keadaan atmosfer dan peletakan panel surya [10].

Kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada PV sel akan melemahkan tegangan *open circuit* (V_{oc}). Setiap kenaikan temperatur sel surya 1°C dari 25°C akan berkurang sekitar 0,5% pada total tenaga yang dihasilkan. Besarnya daya yang berkurang pada saat temperatur di sekitar panel surya mengalami kenaikan $t^{\circ}C$ dari temperatur standarnya dapat dihitung menggunakan (Pers. 1) berikut [12]:

$$P_{saatselisiht^{\circ}C} = [(0,5\%/^{\circ}C) \times P_{MPP} \times t^{\circ}C] \quad (1)$$

Daya keluaran maksimum panel surya pada saat temperaturnya naik menjadi $t^{\circ}C$ dari temperatur standarnya diperhitungkan dengan (Pers. 2) berikut[12]:

$$P_{MPPsaatselisiht^{\circ}C} = P_{MPP} - P_{saatselisiht^{\circ}C} \quad (2)$$

Pemasangan panel surya secara tetap sering dilakukan karena paling mudah dalam pelaksanaan dan biaya sedikit. Sudut kemiringan (*tilt angle*) pada suatu lokasi berdasarkan sudut *altitude* matahari pada suatu lokasi dalam suatu waktu dapat dicari dengan (Pers. 3 dan 4) berikut ini [10]:

$$\beta_N = 90^{\circ} - L + /-\delta \quad (3)$$

$$Tilt = 90^{\circ} - \beta_N \quad (4)$$

Besarnya *fix tilt angle* umumnya terletak diantara *tilt angle* maksimum saat *winter solstice* ($\delta = +23^{\circ}$) dan *summer solstice* ($\delta = -23^{\circ}$).*Fix tilt angle* dapat diperkirakan berdasarkan nilai rata-rata *tilt angle* pada saat *winter solstice* dan *summer solstice*, yaitu (Pers. 5) sebagai berikut[10]:

$$fixtiltangel = \frac{[tiltangel(wintersoltice) + tiltangel(summersoltice)]}{2} \quad (5)$$

Berdasarkan pemaparan faktor-faktor yang mempengaruhi energi yang dibangkitkan panel surya, besarnya kapasitas panel surya yang dibutuhkan dalam suatu perencanaan sistem PLTS dapat dihitung menggunakan (Pers. 6) [12]:

$$P(Wp) = \frac{E_L}{PGF} \quad (6)$$

dan nilai *PGF* diperoleh dari (Pers. 7) :

$$PGF = CE \times AvrgSolar \quad (7)$$

Selanjutnya berdasarkan besarnya kebutuhan daya panel yang akan dibangkitkan (P_{Wp}), maka banyaknya panel surya yang dibutuhkan dapat dihitung dengan (Pers. 8) [12]:

$$\sum panelsurya = \frac{P_{Wp}}{P_{MPP}} \quad (8)$$

2. Baterai

Baterai adalah komponen PLTS yang berfungsi menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya pada siang hari, untuk kemudian dipergunakan pada malam hari dan pada saat cuaca mendung. Baterai yang dipergunakan pada PLTS mengalami proses siklus pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*), tergantung ada atau tidaknya sinar matahari.Kapasitas baterai dalam suatu perencanaan PLTS dipengaruhi pula oleh faktor DOD dan TCF.Kapasitas baterai dalam suatu perencanaan PLTS dipengaruhi pula faktor *autonomy*, yaitu keadaan baterai dapat menyuplai beban secara menyeluruh ketika tidak ada energi yang masuk dari panel surya [12]. Besarnya kapasitas total baterai (Ah) yang dibutuhkan dalam suatu sistem PLTS dapat dihitung dengan menggunakan (Pers. 9):

$$Baterai (Ah) = I = \frac{E_L}{(\%MaxDOD) \times (TCF) \times V_{baterai}} \times AD \quad (9)$$

TCF (*Temperature Correction Factor*) adalah perbandingan antara daya keluaran maksimum panel surya pada saat temperatur di sekitar panel surya naik menjadi $t^{\circ}C$ dari temperatur standarnya dengan daya keluaran maksimum panel surya. Besarnya TCF dapat dihitung menggunakan (Pers. 10):

$$TCF = \frac{P_{MPPsaatselisiht^{\circ}C}}{P_{MPP}} \quad (10)$$

3. Inverter

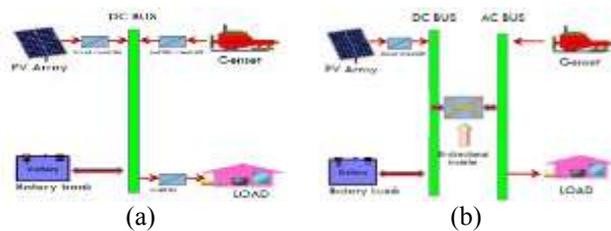
Inverter adalah peralatan elektronik yang berfungsi mengubah energi DC menjadi energi AC. Energi yang dihasilkan panel surya adalah arus DC, oleh karena itu pada sistem PLTS dibutuhkan *inverter* untuk mengubah energi dari panel dan baterai tersebut agar dapat menyuplai kebutuhan energi AC. Pemilihan *inverter* yang tepat untuk aplikasi tertentu, tergantung pada kebutuhan beban dan juga apakah *inverter* akan menjadi bagian dari sistem yang menuju jaringan listrik atau sistem yang berdiri sendiri [15]. Perhitungan kapasitas *inverter* disesuaikan dengan beban puncak yang harus disuplai serta dihitung dengan menambahkan faktor *future margin*, *error margin* dan *capacity factor* seperti pada (Pers. 11):

$$P = \frac{EL_{BP} \times FM \times EM}{CF} \quad (11)$$

C. PLTH

Hybrid system adalah penggabungan dua atau lebih sumber energi. Salah satu contohnya adalah *solar electric system* dengan sumber energi lain (seperti generator diesel, pembangkit listrik tenaga angin). *Hybrid system* dipilih dalam rangka menyediakan sumber energi yang handal dan tidak bergantung dengan energi fosil [7].

Hybrid system terbagi lagi menjadi sistem serial dan paralel seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem PLTH, (a) Serial (b) Paralel

Prinsip kerja dari PLTH sistem serial adalah semua pembangkit daya mensuplai daya DC ke dalam baterai. Setiap komponen harus dilengkapi dengan *charge controller* sendiri untuk menjamin operasi kerja yang handal, selain itu generator dan *inverter* harus didisain agar dapat melayani beban puncak. Pada PLTH yang menggunakan sistem paralel, beban dapat disuplai baik dari genset maupun dari *inverter* secara paralel. BDI (*Bidirectional inverter*) digunakan untuk menjembatani antara baterai dan sumber AC, BDI dapat mengisi baterai dari genset maupun dari sumber energi terbarukan [7].

D. Aspek Biaya

1. Biaya Siklus Hidup (Life Cycle Cost)

Biaya siklus hidup suatu sistem adalah semua biaya yang dikeluarkan oleh suatu sistem, selama kehidupannya. Biaya siklus hidup (LCC) pada sistem PLTS ditentukan oleh nilai sekarang dari biaya total sistem PLTS yang terdiri dari biaya investasi awal, biaya jangka panjang untuk pemeliharaan dan operasional serta biaya penggantian. Biaya siklus hidup (LCC) dapat dihitung menggunakan (Pers.12) [12]:

$$LCC = C + M_{PW} + R_{PW} \quad (12)$$

Nilai sekarang biaya tahunan yang akan dikeluarkan beberapa waktu mendatang (selama umur proyek) dengan jumlah pengeluaran yang tetap, dihitung dengan (Pers. 13)[12]:

$$M_{PW} = A \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \right] \quad (13)$$

2. Faktor Diskonto

Faktor diskonto (*Discount Factor*) adalah faktor yang digunakan untuk mengkonversi penerimaan-penerimaan di masa mendatang menjadi nilai sekarang, sehingga dapat dibandingkan dengan pengeluaran pada masa sekarang. (Pers. 14) faktor diskonto adalah sebagai berikut [12]:

$$DF = \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (14)$$

3. Biaya Energi

Biaya energi merupakan perbandingan antara biaya total per tahun dari sistem dengan energi yang dihasilkan selama periode yang sama. Berdasarkan sisi ekonomi, biaya energi PLTS berbeda dari biaya energi untuk pembangkit konvensional. Biaya energi (*Cost Of Energy*) PLTS dapat dihitung menggunakan (Pers. 15)[12]:

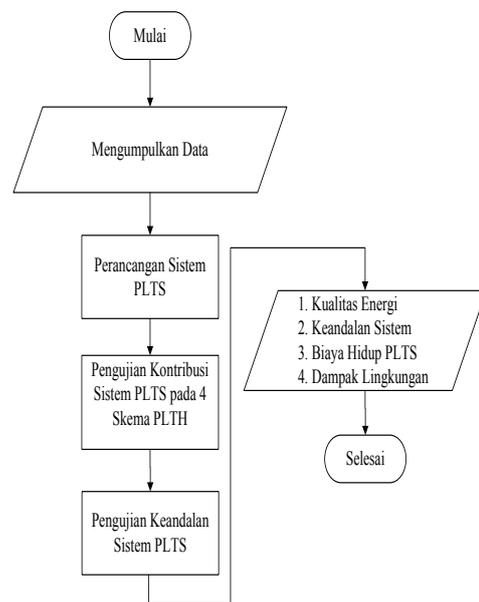
$$COE = \frac{LCC \times CRF}{AkWh} \quad (15)$$

Adapun faktor pemulihan modal dapat dihitung menggunakan (Pers. 16)[12]:

$$CRF = \frac{i(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (16)$$

III. METODOLOGI PENELITIAN

Perancangan sistem PLTS yang dibuat pada penelitian ini digunakan pada skema sistem pembangkit hibrida sel surya dan disel. Secara sederhana, proses studi kasus pemanfaatan energi matahari sebagai pembangkit listrik alternatif dapat dijelaskan melalui diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Perencanaan Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perancangan Sistem PLTS

1. Estimasi beban

Perhitungan beban yang akan disuplai PLTS dilakukan dengan cara menambahkan perkiraan pemakaian energi listrik selama 12 jam pada rentang waktu 06.00 sampai 18.00 dengan pemakaian aktual energi listrik di Pulau Panjang. Perkiraan pemakaian energi listrik pada rentang waktu 06.00 sampai 18.00 diperoleh dari rata-rata pemakaian energi listrik aktual 12 jam, dengan total pemakaian aktual 12 jam sebesar 306,74kW maka diperoleh rata-rata pemakaian energi listrik aktual selama 12 jam adalah sebesar 23,60kW. Besarnya beban yang akan disuplai PLTS berdasarkan hasil perhitungan didapat beban selama 24 jam sebesar 566,34kW.

2. Kapasitas inverter

Perhitungan kapasitas *inverter* disesuaikan dengan beban puncak yang harus disuplai serta dihitung dengan menambahkan faktor *future margin*, *error margin* dan *capacity factor*. Berdasarkan beban puncak bernilai

30,16kW, maka untuk dapat memenuhi kebutuhan beban puncak, kapasitas minimum *inverter* yang digunakan dapat dihitung sebagai berikut:

$$P = \frac{30,16 \times 1,1 \times 1,1}{0,9} = 40,55kW$$

Berdasarkan *rating* minimum *inverter* yang dibutuhkan yaitu 40,55kW serta *rating* terdekat yang tersedia dipasaran, maka dipilih *inverter* 45kW. *Inverter* 45kW ini memiliki *rated voltage input* sebesar 360V, oleh karena itu sistem PLTS yang akan dikembangkan menggunakan *rating* tegangan sistem sebesar 360V.

3. Kapasitas dan jumlah baterai

Kapasitas baterai dihitung berdasarkan acuan total beban yang akan disuplai. Diketahui dari hasil perhitungan, pemakaian energi listrik (E_L) 24 jam di Pulau Panjang sebesar 566,34kWh/hari. Saat siang hari, sebagian beban tidak perlu terlalu lama disimpan dalam baterai karena besarnya energi yang dihasilkan PLTS pada siang hari akan mencapai nilai maksimum sehingga energi dari panel surya dapat langsung disalurkan ke beban, berdasarkan pertimbangan tersebut maka kapasitas baterai akan dihitung untuk kebutuhan energi pada malam hari saja yaitu sebesar 306,74kWh/hari. Besarnya kapasitas baterai (Pers. 9) yang diperlukan dapat dihitung sebagai berikut:

$$(I) = \frac{E_L}{(\%MaxDOD) \times (TCF) \times V_{baterai}} \times AD$$

$$= \frac{306,74kWh/hari}{(0,8) \times (0,96) \times (360)} \times 3 = 3328,34Ah$$

Berdasarkan kebutuhan *ampere hour* dalam satu hari, dibutuhkan baterai dengan kapasitas baterai yang cukup besar dan tegangan nominal yang besar pula untuk dapat memenuhi kebutuhan energi, maka baterai yang digunakan pada penelitian ini memiliki kapasitas 1156Ah dengan tegangan nominal baterai 6V. Agar dapat memenuhi kebutuhan 3328,34Ah/hari dan sesuai *rating* tegangan pada sistem 360V maka jumlah baterai yang diperlukan PLTS adalah sebanyak 180 baterai. Adapun rangkaian baterai membentuk 3 rangkaian (*string*) yang terhubung paralel dengan 1 rangkaian terdiri dari 60 baterai yang terhubung secara seri.

4. Kapasitas dan jumlah panel surya

Daya yang dibangkitkan PLTS (P_{wp}) disesuaikan dengan kebutuhan beban yang akan disuplai serta dipengaruhi oleh faktor pembangkitan panel surya (PGF). Faktor pembangkitan panel surya (PGF) dari hasil perhitungan menggunakan persamaan (7) dengan nilai referensi CE (*Collection Efficiency*) panel surya pada *software* HOMER sebesar 84% dan nilai rata-rata intensitas matahari di Pulau Panjang sebesar 5,079kWh/hari (NASA). Apabila nilai CE dan rata-rata intensitas matahari di Pulau Panjang disubstitusikan (Pers. 7) diperoleh nilai PGF sebesar:

$$PGF = 0,84 \times 4,61kWh/hari = 3,87kWh/hari$$

Berdasarkan nilai PGF (Pers. 6) sebesar 4,27kWh/hari dan pemakaian energi listrik (E_L) selama selama 24 jam

sebesar 566,34kWh/hari maka kapasitas pembangkitkan panel surya (P_{wp}) (Pers. 8) sebesar:

$$P_{wp\ 24} = \frac{566,34}{3,87} = 146,34kWp$$

$$\sum \text{panelsurya} = \frac{146,34kW}{150W} = 975,6 \approx 976$$

976 panel surya tersebut akan dibentuk menjadi rangkaian panel atau *array* yang disesuaikan dengan *rating* tegangan sistem sebesar 360V dan kapasitas pembangkitan. Agar *rating* tegangan sistem sebesar 360V dapat terpenuhi maka pada 1 *string* rangkaian panel surya dibutuhkan panel surya yang dipasang seri sebanyak:

$$\sum \text{rangkaianseridalam satustring} = \frac{360V}{34,5V}$$

$$= 10,43 \approx 11$$

sehingga rangkaian *string* yang terbentuk sebanyak:

$$\sum \text{rangkaianstring} = \frac{976}{11} = 88,73 \approx 89$$

Jumlah panel surya yang digunakan berdasarkan hasil perhitungan pada rangkaian seri dan paralel menjadi sebanyak 979 buah, dengan 89 rangkaian (*string*) yang terhubung paralel dengan 1 rangkaian terdiri dari 11 panel yang terhubung secara seri. Banyaknya panel yang dirangkai paralel akan menguatkan arus dan banyaknya panel yang terhubung seri akan menguatkan tegangan sehingga besarnya energi yang dihasilkan oleh rangkaian *array* tersebut menjadi:

$$V_{MPParray} = 34,5V \times 11 = 379,5V$$

$$I_{MPParray} = 4,35A \times 89 = 387,15A$$

$$P_{MPParray} = 379,5V \times 387,15A = 153,89kW$$

5. Peletakan panel surya

Penentuan besarnya *tilt angel* pada penelitian ini dilakukan dengan 2 cara, yaitu simulasi dan perhitungan. Hasil simulasi menggunakan SolarCell Module Lucas Nuelle Tech. Training System menunjukkan bahwa posisi sudut *tilt angel* 10° merupakan posisi sudut yang paling optimal.

Secara perhitungan, besarnya *tilt angle* didasarkan pada dua orientasi, yaitu orientasi sudut panel (utara-selatan) dan (timur-barat). Posisi geografis Pulau Panjang terletak pada belahan bumi selatan, maka acuan *solar altitude* pada kutub utara bumi dan *tilt angle* diorientasikan menghadap utara (LU). Tabel 1 memperlihatkan besarnya *declinasi*, *solar altitude* dan *tilt angel* selama berdasarkan penelitian saat periode *solice* dan *equinox*.

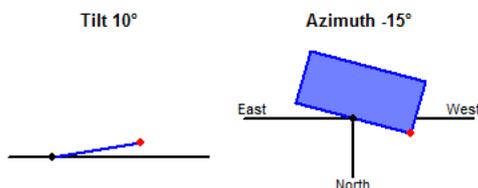
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa *solar altitude* tahunan di Pulau Panjang bervariasi secara periodik mulai pada ketinggian 107,5° (acuan utara bumi) pada saat *winter solstice*, lalu bergerak turun sampai 84° saat *vernal equinox*. Pada saat *summer solstice*, *solar altitude* berada pada ketinggian 60,5° dan mulai bergerak naik sampai 84° saat *autumnal equinox* dan proses ini kembali berulang secara periodik. Menggunakan (Pers. 5) diperoleh *fix tilt angle* untuk wilayah Pulau Panjang sebesar:

$$\text{fixtiltangel} = \frac{[-17,5^\circ LU + 29,5^\circ LU]}{2} = 6^\circ LU$$

Tabel 1. *Tilt Angle* di Pulau Panjang Selama Periode *Solice* dan *Equinox*

	<i>Winter Solstice</i>	<i>Equinox</i>	<i>Summer Solstice</i>
<i>Declination</i> (δ)	+23.5°	0°	-23.5°
<i>Solar altitude</i> (β_N)	107,5°	84°	60,5°
<i>Tilt angel</i> (α)	-17,5° LU	6° LU	29,5° LU

Berdasarkan alasan teknis serta hasil simulasi dan perhitungan, maka besar sudut elevasi panel pada perancangan ini adalah 10°LU, sedangkan orientasi sudut *azimuth* panel pada penelitian ini menggunakan hasil penelitian sebelumnya. Berdasarkan hasil penelitian mengenai *solar tracker* didapatkan sudut *azimuth* optimal untuk studi kasus wilayah Serang dan Cilegon sebesar -15° dari barat. Ilustrasi orientasi panel surya dapat dilihat pada Gambar3 [6].



Gambar 3. Ilustrasi Orientasi Panel Surya

B. Pengujian Kontribusi PLTS

Sistem PLTS yang telah dirancang disimulasikan pada sistem PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida) menggunakan *software* HOMER. Simulasi dilakukan dengan 2 skema utama yaitu skema PLTD dan PLTH. Skema PLTH yang digunakan pada penelitian ini adalah PLTS dengan PLTD. Simulasi dilakukan untuk mencari nilai kontribusi PLTS terhadap PLTH.

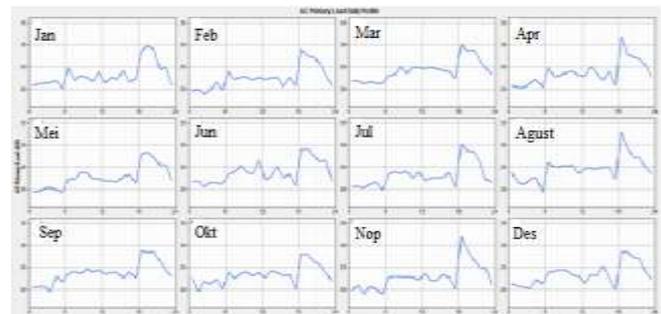
1. Skema PLTD

Skema PLTD merupakan kondisi awal yang dibuat sebagai pembandingan untuk skema PLTH. Hal yang dibandingkan adalah penggunaan bahan bakar, kelebihan energi dan emisi yang dihasilkan. Skema ini terdiri dari satu unit PLTD 248kW. Waktu operasi PLTD diatur 24 jam untuk memenuhi kebutuhan energi selama 24 jam. Hasil simulasi skema PLTD dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Simulasi pada Skema PLTD

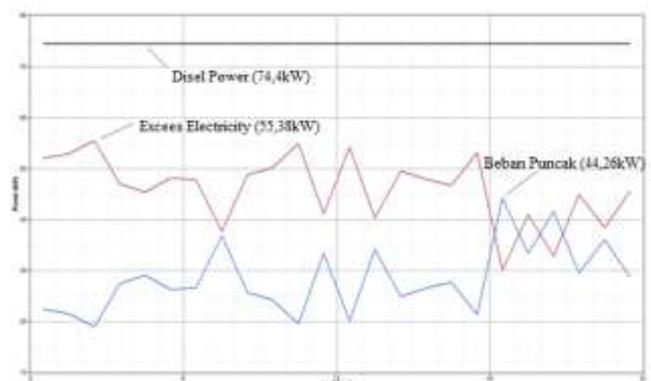
Parameter	Skema PLTD
Kontribusi Energi (%)	
PLTD	100
PLTS	-
Bahan Bakar (L/tahun)	
Diesel 248kW	272.755
Waktu Operasi (jam/tahun)	
PLTD	8.760
PLTS	-
Total Produksi (kWh/tahun)	
PLTD	651.732
PLTS	-
Excess Electricity (kWh/tahun)	446.614

Pada Tabel 2 terlihat bahwa total BBM yang dikonsumsi oleh sistem ini selama 1 tahun adalah 272.755 liter untuk waktu operasi 8.760jam/tahun. Besarnya produksi energi yang dihasilkan dalam satu tahun sebesar 651.732kWh/tahun. Pemakaian energi rata-rata harian untuk tiap bulan dalam satu tahun dapat dilihat pada Gambar4.



Gambar 4. Hasil Pemakaian Energi Listrik dalam Satu Tahun

Pada Gambar 4 diperoleh urutan nilai pemakaian energi tertinggi sampai terendah dalam satu tahun yaitu bulan Agustus, Maret, Juni, September, April, Desember, Oktober, Juli, Januari, Nopember, Mei dan Februari masing-masing sebesar 591,834kWh/hari, 579,45kWh/hari, 570,92kWh/hari, 569,63kWh/hari, 566,40kWh/hari, 561,63kWh/hari, 559,14kWh/hari, 556,24kWh/hari, 555,50kWh/hari, 547,70kWh/hari, 544,27kWh/hari dan 539,30kWh/hari. Besarnya produksi energi dan pemakaian energi listrik akan mempengaruhi kondisi ketersediaan listrik tiap harinya dan untuk mengetahui kemampuan skema PLTD dalam menyuplai kebutuhan listrik, maka diambil sampel hasil simulasi mengenai kondisi ketersediaan listrik pada bulan Agustus. Kondisi ketersediaan listrik pada bulan Agustus dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kondisi Ketersediaan Listrik PLTD

Pada Gambar 5 terlihat bahwa PLTD beroperasi sepanjang hari dengan keluaran daya 74,4kW sedangkan kebutuhan beban puncak terjadi pada pukul 18.30 yaitu sebesar 44,26kW. Produksi energi yang dihasilkan PLTD sangat berlebih dibandingkan pemakaian energi, sehingga terjadi *excess electricity*. *Excess electricity* adalah selisih total produksi energi listrik selama satu tahun yang dihasilkan pembangkit listrik dan total beban yang

disuplai. Pada Gambar5, *excess electricity* terjadi sepanjang hari dengan nilai maksimum hingga mencapai 55,38kW. Berdasarkan Tabel3, *excess electricity* yang terjadi pada skema PLTD sepanjang tahun 2012 adalah sebesar 68,5% atau 446.614kWh/tahun. *Excess electricity* sebesar 68,5% sangatlah besar, sehingga dianggap sebagai pemborosan energi karena kelebihan energi ini tidak dapat dimanfaatkan atau disimpan pada skema PLTD.

2. Skema PLTH

Skema PLTH yang disimulasikan terdiri dari dua pembangkit, yaitu PLTS berkapasitas 153,89kWp dan PLTD dengan kapasitas mesin 248kW. Berdasarkan hasil perhitungan, sistem PLTS terdiri dari 979 panel surya 150W, 180 baterai berkapaitas 1156Ah dan *inverter* dengan kapasitas 45kW. Skema PLTH akan diberi pembebanan 24 jam dengan besarnya kebutuhan energi dalam satu hari. Pada simulasi skema PLTH dibuat lagi 4 kondisi waktu penyalaan generator disel dengan kapasitas PLTS dan PLTD yang tetap sama, hal ini dilakukan untuk meminimalkan operasi kerja PLTD dan mencari kontribusi PLTS yang optimal (50% sampai 70%). Empat kondisi penyalaan generator disel dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Operasi Penyalaan Generator PLTD

Jenis Simulasi	Waktu forced on	Waktu forced off	Waktu optimized
Kondisi 1	24 jam	-	-
Kondisi 2	18.00 s/d 06.00	06.00 s/d 18.00	-
Kondisi 3	18.00 s/d 24.00	24.00 s/d 18.00	-
Kondisi 4	18.00 s/d 20.00	01.00 s/d 18.00	20.00 s/d 01.00

Kondisi 1 adalah kondisi mesin disel beroperasi 24 jam. Kondisi 2 adalah kondisi mesin disel beroperasi 12 jam. Kondisi 3 adalah kondisi mesin disel beroperasi 6 jam dan Kondisi 4 adalah kondisi pengoptimalan waktu mesin disel beroperasi. Pada kondisi 4 mesin disel tidak selamanya beroperasi 8 jam setiap harinya namun menyesuaikan kapasitas energi yang dibutuhkan sesuai periode waktu yang ditentukan. Kondisi optimasi 8 jam ditentukan berdasarkan perhitungan beban minimum yang dibutuhkan serta *try and error* simulasi.

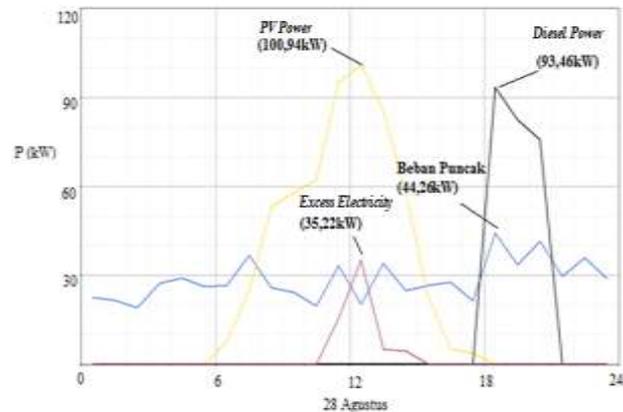
Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 5, diperoleh urutan nilai kontribusi energi PLTS tertinggi adalah kondisi optimasi 8 jam sebesar 67%. Kriteria yang ingin didapatkan dari hasil simulasi skema PLTH adalah kondisi yang memiliki nilai kontribusi PLTS terbesar dan nilai *excess electricity* yang kecil. Peningkatan kontribusi PLTS pada simulasi ini terjadi karena waktu operasi mesin disel dibuat terus berkurang sampai batas minimum energi yang dibutuhkan, dengan berkurangnya waktu operasi mesin disel maka konsumsi BBM juga akan berkurang.

Total produksi listrik yang dihasilkan oleh skema PLTH optimasi 8 jam adalah 285056kWh/tahun dengan kontribusi PLTD sebesar 33% atau 93.514kWh/tahun sedangkan kontribusi PLTS sebesar 67% atau

191.542kWh/tahun. Besarnya produksi energi listrik serta kondisi suplai listrik PLTH dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel5. Hasil Simulasi PLTHpada 4 Kondisi Operasi Disel

Parameter	Disel 24 jam	Disel 12 jam	Disel 6 jam	Optimasi 8 jam
Kontribusi Energi (%)				
PLTD	77	63	46	33
PLTS	23	37	54	67
Bahan Bakar (L/thn)				
PLTD	272.76	136.55	68.83	38.37
Waktu Operasi (jam/thn)				
PLTD	8.76	4.38	2.19	1.20
PLTS	4.38	4.38	4.38	4.38
Total Produksi (kWh/thn)				
PLTD	651.73	326.64	165.54	93.514
PLTS	191.54	191.54	191.54	191.54
Excess Electricity (kWh/thn)				
PLTD	638.16	298.93	120.68	40.01



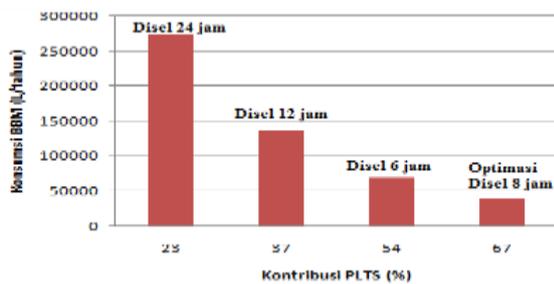
Gambar 6. Kondisi Suplai Listrik PLTH

Gambar 6 adalah kondisi suplai listrik PLTH pada tanggal 28 Agustus 2012. Pada Gambar6, PLTS beroperasi hampir 12 jam setiap hari dengan keluaran daya maksimum sebesar 100,94kW, sedangkan PLTD beroperasi pada jam 18.00 dan 21.00 dengan keluaran daya maksimum 93,46kW. Pada tanggal 28 Agustus 2012, beban puncak terjadi pada pukul 18.30 yaitu sebesar 44,26kW. Kelebihan listrik pada sistem ini hanya terjadi dari pukul 11.00 sampai 15.00 dengan daya maksimum sebesar 35,22kW. Hal ini terjadi karena energi yang dihasilkan PLTS dan ketersediaan energi baterai lebih besar dari energi yang dipakai.

Kelebihan listrik yang tidak terpakai memiliki nilai yang berfluktuasi seiring dengan total produksi listrik pada sistem PLTH. Walaupun total produksi energi dari waktu operasi disel 24 jam sampai optimasi 8 jam semakin berkurang, namun pada kondisi optimasi 8 jam masih terdapat *excess electricity* (energi berlebih) sebesar

40.011kWh/tahun atau sekitar 14%. Nilai *excess electricity* pada kondisi optimasi 8 jam merupakan yang paling kecil dari keempat kondisi simulasi. Berdasarkan pertimbangan nilai kontribusi PLTS terbesar dan nilai *excess electricity* yang kecil, maka pada penelitian ini dipilih rancangan PLTS pada skema PLTH kondisi optimasi 8 jam sebagai pembangkit alternatif di Pulau Panjang.

Hasil lainnya menunjukkan bahwa dengan berkurangnya waktu operasi mesin disel maka konsumsi BBM juga akan berkurang. Waktu operasi disel optimal 8 jam dapat menurunkan pemakaian bahan bakar sampai 85,93% atau menjadi 38.372L/tahun seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Penurunan Konsumsi BBM Disel 248kW

C. Pengujian Keandalan Sistem PLTS

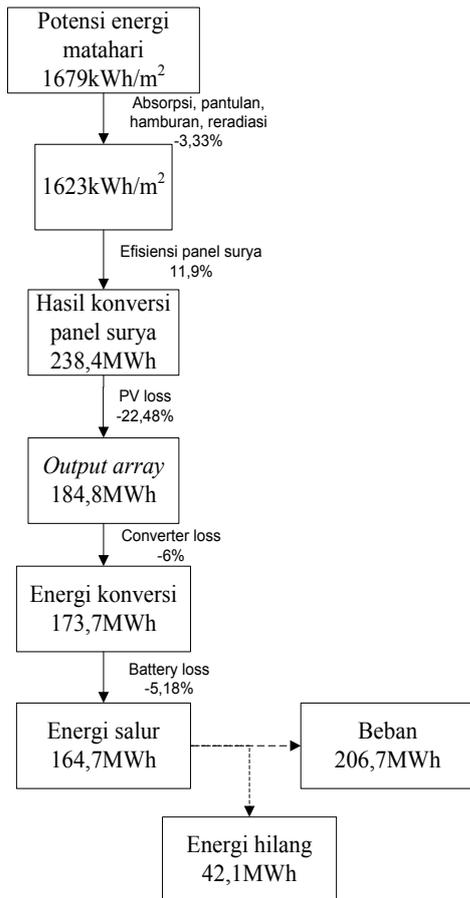
Setelah sistem PLTS yang telah dirancang disimulasikan pada sistem PLTH (Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida) menggunakan *software* HOMER dan mendapatkan nilai kontribusi PLTS yang optimal, selanjutnya sistem PLTS akan disimulasikan menggunakan *software* PVSyst untuk mengetahui diagram alir energi PLTS dan keandalan sistem yang dirancang. Simulasi yang dilakukan berdasarkan parameter komponen PLTS pada skema PLTH kondisi optimasi 8 jam. Berdasarkan parameter simulasi tersebut, didapat hasil simulasi yang ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Simulasi Sistem PLTS Menggunakan PVSyst

Bulan	Energi Konversi (kWh)	Kekurangan Energi (kWh)	Energi Suplai (kWh)	Beban (kWh)	SolFrac (%)
Jan	12651	5158	12400	17558	70,62
Feb	15061	1830	14029	15859	88
Mar	12340	5872	11686	17558	67
Apr	15208	2317	14675	16992	86,36
Mei	13101	5537	12021	17558	68,46
Jun	14299	3156	13836	16992	81
Jul	16232	2414	15144	17558	86
Agust	13963	4399	13159	17558	75
Sep	15885	1790	15202	16992	89
Okt	12853	5411	12147	17558	69
Nop	15076	2917	14075	16992	83
Des	17158	1248	16310	17558	93
Total	173827	42049	164684	206733	79,79

Pada Tabel 6 terdapat variabel hasil simulasi energi konversi, kekurangan energi, energi suplai, beban dan *solfrac*. Variabel tersebut dianalisa untuk menentukan kualitas dan keandalan sistem PLTS yang dirancang. Energi konversi merupakan energi listrik yang tersedia hasil keluaran panel surya yang dapat diteruskan ke *inverter* dengan besarnya total energi konversi hasil simulasi dalam satu tahun sebesar 173827kWh dan energi terbesar pada bulan Desember yaitu sebesar 17158kWh. Energi suplai merupakan energi siap salur hasil keluaran *inverter* dan baterai. Besarnya energi suplai dalam satu tahun sebesar 164684kWh dengan energi suplai terbesar mencapai 16310kWh. Berdasarkan perbandingan antara energi suplai dengan energi konversi diperoleh nilai kualitas energi yang dihasilkan sebesar 94,74%, sedangkan keandalan sistem PLTS yang dirancang sebesar 79,79% yang diperoleh dari perbandingan antara energi suplai dengan beban atau disebut juga *solfrac*. Besarnya energi suplai yang dihasilkan tidak sebesar energi konversi, penurunan energi tersebut sebesar 9143kWh atau 5,25% dari energi hasil konversi panel surya. Adanya penurunan energi tersebut disebabkan karena *losses* pada sistem PLTS. Besarnya *losses* energi pada sistem PLTS yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 8.

Gambar 8 merupakan diagram *losses* energi sistem PLTS yang terjadi dalam satu tahun dari mulai besarnya energi matahari yang tersedia sampai menjadi energi siap salur. Berdasarkan Gambar 8, potensi energi matahari di Pulau Panjang dalam satu tahun adalah sebesar 1679kWh/m². Besarnya energi matahari ini masih berupa radiasi energi matahari secara global. Setelah radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi atau *insolation* (*incoming solar radiation*) mengalami penyerapan (*absorpsi*), pemantulan, hamburan dan pemancaran kembali atau *reradiasi*, besarnya energi matahari yang dapat dikonversi menjadi 1623kWh/m² atau berkurang 3,33%. Potensi energi matahari sebesar 1623kWh/m² kemudian dikonversi menggunakan 979 panel surya 150W dengan efisiensi STC 11,9%. Efisiensi 11,9% diperoleh dari STC (*Standart Test Conditions*), STC dilakukan pada temperatur modul surya 25°C dan intensitas matahari 1000W/m². Energi hasil konversi panel surya sebesar 238,4MWh, namun energi tersebut bukanlah energi bersih keluaran dari *array* karena masih terdapat *losses* energi dari panel surya itu sendiri. *Losses* tersebut adalah *losses* akibat *level* intensitas matahari, temperatur, kualitas panel surya hingga *losses* akibat *wiring*. Berdasarkan Gambar 8 besarnya *losses* pada *array* ini mencapai 22,48% sehingga energi *output* dari *array* menjadi 184,8MWh. *Losses* lainnya yang terjadi adalah *losses* dari konverter dan baterai yang mencapai 11,18%, sehingga besarnya energi yang dihasilkan menjadi 164,7MWh yang kemudian akan disuplai ke beban. Besarnya kebutuhan beban pada Tabel 6 dalam tahun mencapai 206733kWh. Apabila total energi suplai dikurangi dengan kebutuhan beban, maka diperoleh kekurangan energi karena *losses* sebesar 42049kWh atau 20,34% dari total kebutuhan beban dalam satu tahun. Besarnya energi yang belum terpenuhi ini dapat diatasi dengan ketersediaan energi dari PLTD yang ada di Pulau Panjang.



Gambar 8. Diagram Losses Sistem PLTS

D. Penurunan Emisi PLTD

Kondisi awal kelistrikan di Pulau Panjang disuplai oleh PLTD dengan jam operasi 12 jam. Sepanjang pengoperasian PLTD tersebut, terdapat emisi yang dihasilkan oleh PLTD. Apabila diasumsikan PLTD beroperasi 24 jam untuk memenuhi kebutuhan listrik, maka tingkat emisi ini akan meningkat pula dan mempengaruhi keadaan lingkungan sekitar menjadi kurang sehat. Berdasarkan simulasi skema PLTD dan PLTH pada software HOMER, diperoleh penurunan tingkat emisi PLTD karena meningkatnya kontribusi PLTS. Perbandingan nilai kontribusi PLTS dengan tingkat emisi yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Kontribusi PLTS dengan Emisi PLTD

Kondisi	Kontribusi PLTS	Emisi (kg/tahun)					
		CO ₂	CO	HC	PM	SO _x	NO _x
PLTD	0	718254	1773	196	134	1442	15820
PLTH ₁	22	718254	1773	196	134	1442	15820
PLTH ₂	36	359584	888	98,3	66,9	722	7920
PLTH ₃	53	181243	447	49,6	33,6	364	3992
PLTH ₄	69	101046	249	27,6	17,1	203	2226

Berdasarkan Tabel 7, ketika disain PLTD disimulasi dan dioptimasi dengan nilai disain PLTD berbagai

macam kondisi, maka didapatkan tingkat emisi CO₂ dan NO_x semakin menurun seiring dengan menurunnya pemakaian bahan bakar pada PLTD. Seperti terlihat pada Tabel 7, nilai emisi CO₂ tertinggi terjadi ketika kontribusi energi terbarukan 0% dengan nilai emisi CO₂ adalah 718254kg/tahun. Nilai emisi CO₂ menjadi 101046kg/tahun ketika kontribusi energi terbarukan 67% berkurang sebanyak 85,93% atau 617208kg/tahun. Hal yang sama juga terjadi emisi NO_x, ketika kontribusi energi terbarukan 0% nilai emisi NO_x adalah 15820kg/tahun. Nilai emisi NO_x menjadi 2226kg/tahun ketika kontribusi energi terbarukan 67% berkurang sebanyak 85,93% atau 13594kg/tahun.

E. Analisis Biaya Energi PLTS

Biaya investasi awal untuk PLTS yang akan dikembangkan di Pulau Panjang sebesar US\$858809 mencakup seperti biaya untuk komponen PLTS serta biaya instalasi PLTS. Biaya untuk komponen PLTS ini terdiri dari biaya untuk pembelian panel surya, baterai dan inverter. Adapun besar biaya pemeliharaan dan operasional (M) per tahun untuk PLTS yang akan dikembangkan adalah sebagai berikut:

$$M = 1\% \times Totalbiayainvestasi$$

$$= 1\% \times 858805 = 8588,05 US\$$$

Besarnya nilai sekarang (present value) untuk biaya pemeliharaan dan operasional (M_{PW}) PLTS selama umur proyek 25 tahun dengan tingkat diskonto 10,5% dihitung dengan (Pers. 11) sebagai berikut:

$$M_{PW} = 8588,05 \left[\frac{(1 + 0,1004)^{25} - 1}{0,1004(1 + 0,1004)^{25}} \right]$$

$$= 8588,05 \left[\frac{9,934}{1,098} \right] = 77699,17 US\$$$

Berdasarkan biaya investasi awal (C), perhitungan M_{PW} dan biaya penggantian baterai dan inverter, maka biaya siklus hidup (LCC) untuk PLTS yang akan dikembangkan selama umur proyek 25 tahun adalah sebagai berikut (Pers 12):

$$LCC PLTS = 858805,05 + 77669,17 + 137665$$

$$= \$ 1074169,17$$

Faktor pemulihan modal untuk mengkonversikan semua arus kas biaya siklus hidup (LCC) menjadi serangkaian biaya tahunan, diperhitungkan dengan (Pers. 16) sebagai berikut:

$$LCC = \frac{0,1004(I + 0,1004)^{25}}{(I + 0,1004)^{25} - 1}$$

$$= \frac{1,098}{9,934} = 0,110$$

Berdasarkan hasil perhitungan LCC, CRF dan kWh produksi tahunan maka besar biaya energi (COE) untuk PLTS yang akan dikembangkan di Pulau Panjang adalah sebagai berikut (Pers 15):

$$COE PLTS = \frac{1074169,17 \times 0,110}{164684} = \$ 0,72/kWh$$

Sedangkan besarnya COE untuk sistem PLTH dapat dihitung dengan menambahkan nilai LCC PLTD (Mpw, Rpw dan biaya bahan bakar disel) pada LCC PLTH, sehingga dengan nilai M_{pw} , R_{pw} dan *Fuel* disel sebesar \$122244, \$20201, \$440570 serta total produksi energi PLTH dalam satu tahun sebesar 285056kWh diperoleh nilai COE PLTH sebesar:

$$LCC_{PLTH} = 1074169,17 + 583015 = \$ 1657184,14$$

$$COE_{PLTH} = \frac{1657184,14 \times 0,110}{285056} = \$ 0,64/kWh$$

Harga minyak dunia yang cenderung meningkat tentu akan mempengaruhi biaya bahan bakar minyak (biaya variabel) dalam perhitungan BPP energi listrik di Pulau Panjang. Apabila harga bahan bakar solar industri mengalami peningkatan harga, rata-rata sebesar 18,4% per tahun (sesuai dengan rata-rata kenaikan harga minyak dunia), maka akan terjadi kenaikan harga biaya per kWh PLTD tiap tahunnya. Perkiraan biaya per kWh PLTD sampai tahun 2025 ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Biaya per kWh PLTD dengan Acuan Kenaikan Harga BBM 18,4%/tahun

Tahun	Harga Solar (\$)	Biaya per kWh PLTD (\$)
2012	0,95	0,38
2013	1,12	0,44
2014	1,33	0,51
2015	1,58	0,58
2016	1,87	0,68
2017	2,21	0,79
2018	2,62	0,92
2019	3,10	1,07
2020	3,67	1,25
2021	4,34	1,47
2022	5,14	1,73
2023	6,09	2,03
2024	7,21	2,39
2025	8,54	2,81

Berdasarkan Tabel 8, biaya per kWh PLTS pada empat tahun pertama masih di atas biaya per kWh PLTD, namun pada tahun 2016, biaya per kWh PLTS lebih murah dari biaya per kWh PLTD. Apabila harga BPP pada Tabel 8 dibandingkan dengan BPP dari PLTH (berdasarkan penurunan harga panel surya) yang besarnya relatif konstan sebesar \$0,64/kWh, maka dapat dinyatakan bahwa biaya energi PLTS menjadi lebih murah dari BPP energi listrik PLTD di Pulau Panjang dalam lima tahun mendatang. Memiliki biaya energi yang mendekati bahkan lebih murah dari PLTD dan puncak dari krisis energi yang diprediksi terjadi pada tahun 2025 semakin membuat biaya per kWh PLTD jauh di atas biaya per kWh PLTS, tentu akan membuat PLTS yang ketersediaan sumber energinya tak terbatas dan penggunaannya dapat membantu mengurangi polusi

lingkungan lebih menguntungkan untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit alternatif tambahan di Pulau Panjang.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Penelitian studi pemanfaatan energi matahari di Pulau Panjang ini menghasilkan beberapa kesimpulan di antaranya:

1. Telah dirancang sistem PLTS pada skema pembangkit hibrida PLTD-PLTS dengan kapasitas inverter 45kW, baterai 3328,34Ah, pembangkitan panel surya sebesar 153,89kWp dan orientasi panel surya pada 10°LU dengan sudut *azimuth* -15°.
2. Hasil pengujian 4 skema waktu penyalaan mesin disel pada PLTH didapatkan nilai kontribusi optimal PLTS sebesar 67% dan kontribusi PLTD 33%.
3. Hasil pengujian menunjukkan besarnya energi suplai yang dihasilkan panel surya adalah sebesar 164684kWh/tahun dengan kualitas energi sebesar 94,73%, keandalan sistem sebesar 79,79% dan *losses* sistem 33,66%. Pada aspek ekonomis, biaya energi per kWh yang dibutuhkan PLTH setelah lima tahun akan lebih murah dari PLTD dengan BPP sebesar \$0,64/kWh dan dari aspek lingkungan pengembangan PLTS membuat emisi karbon menurun 85,93% dari kondisi operasi disel 24 jam. Berdasarkan pertimbangan teknis, ekonomis dan lingkungan pengembangan PLTS di Pulau Panjang tentu akan membuat PLTS lebih menguntungkan untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit alternatif tambahan di Pulau Panjang untuk jangka usia hidup PLTS selama 25 tahun.

B. Saran

Masih terdapat kekurangan dalam penelitian ini sehingga perlu pengembangan agar menjadi lebih baik lagi. Terdapat beberapa saran diantaranya:

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai potensi pembangkit alternatif lainnya yang dapat dimanfaatkan di wilayah Serang dan Cilegon.
2. Sebagai studi lebih lanjut, perlu dilakukan analisa sinkronisasi energi antar pembangkit pada sistem PLTH.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Astu P dan D. Nursuhud. (2008). *Mesin Konversi Energi Edisi II*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- [2] Astuti. (2010). *Optimasi Pembangkitan Energi Listrik Hibrida Surya-Angin-Diesel di Desa Pulo Panjang Banten Menggunakan Algoritma Genetik*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [3] Dwistya A, N. (2010). *Aplikasi Sel Surya Sebagai Energi Terbarukan Pembangkit Listrik Pada Solar Home System*. Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Padjadjaran.
- [4] Fischbach, J. (2008). *Interactive Lucas Nuele Labsoft Renewable Energy Sources-Design and Operating of Photovoltaic Systems Course number*

- SO2800-3A Version 1.0*. German : Lucas Nuele GmbH.
- [5] Gilbert, M. Masters. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems Chapter 7 and Chapter 9*. Stanford University: A Jhon Wiley & Sons Inc Publication.
- [6] Hardiansyah. (2012). *Perancangan Dual Axis Solar Tracker*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [7] Herlina. (2009). *Analisis Dampak Lingkungan dan Biaya Pembangkitan Listrik Pembangkit Listrik Tenaga Hibrida di Pulau Sebesi Lampung Selatan*. Tesis Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- [8] Santhiarsa, I Gusti N. N. dan I Gusti B. W. K. (2008). *Kajian Energi Surya Untuk Pembangkit Tenaga Listrik*. Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana.
- [9] Kunaifi. (2010). *Program Homer Untuk Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Hibrida Di Propinsi Riau*. Seminar Nasional Informatika 2010 UPN.
- [10] Mintorogo, D. (2000). *Strategi Aplikasi Sel Surya (Photovoltaic Cells) pada Perumahan dan Bangunan Komersial*. Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Sipil Universitas Kristen Petra Surabaya.
- [11] S. Kumara, N. (2010). *Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Skala Rumah Tangga Urban dan Ketersediaanya di Indonesia*. Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana,.
- [12] Santiari, I Dewa A. S. (2011). *Studi Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sebagai Catu Daya Tambahan Pada Industri Perhotelan Di Nusa Lembongan Bali*. Tesis Jurusan Teknik Elektro Universitas Udayana.
- [13] Shrestha G.B. dan Goel L. (1998). *A Study On Optimal Sizing Of Stand-Alone Photovoltaic Stations*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 4.
- [14] Sulasno, Ir. (1990). *Pusat Pembangkit Tenaga Listrik*. Semarang: Percetakan SW.
- [15] Zamroni, M. (2012). *Kajian Sistem Penyediaan Energi Listrik Hybrid Sel PV –Diesel Di Pulau Sebira Kepulauan Seribu*. Jurnal Sarjana Teknologi Bandung bidang Teknik Elektro dan Informatika Vol. 1, No. 1.

Analisis Pengaruh Temperatur dan Kadar Garam Terhadap Hambatan Jenis Tanah

Aris Sunawar

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta

Jl. Rawamangun muka jakarta timur

Telepon : (021 4700918, 08156054972)

E-mail: arissunawar@unj.ac.id

Abstrak — Suatu syarat sistem pentanahan yang baik adalah mempunyai nilai hambatan pentanahan yang kecil, sehingga mampu menyalurkan arus berlebih langsung kedalam tanah. Faktor yang membuat hambatan jenis tanah besar adalah jenis tanah dan lokasi tanah tersebut. Hambatan tanah berasal dari hambatan jenis tanah, sedangkan faktor yang mempengaruhi hambatan jenis tanah adalah faktor suhu, kelembaban dan bahan kimiawi yang terkandung dalam tanah tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh garam dan suhu terhadap nilai hambatan jenis tanah. Dengan melakukan pengujian hambatan di tanah pada kondisi suhu yang dikondisikan serta penambahan garam. Dalam pengujian diperoleh nilai hambatan jenis tanah dapat menurun yang artinya nilai tersebut dapat berubah oleh kondisi kelembaban dan suhu tanah, serta penambahan garam. Perlakuan dengan menambahkan air dapat memperkecil nilai resistivitasnya sampai dengan 75% dari 323,164 ohm menjadi 77,622 ohm sedangkan penambahan garam mencapai 48% dari semula 51,425 ohm menjadi 8,707 ohm.

Kata Kunci : pentanahan, hambatan tanah

Abstract — A good grounding system requirement is to have a small grounding resistance value , so as to channel the excess flow directly into the ground . Factors that make a great soil resistivity is the soil type and location of the land. Barriers soil resistivity derived from the soil, while the factors affecting soil resistivity factor is temperature, humidity and chemicals contained in the ground. This study aims to determine how much influence of salt and temperature on soil resistivity values. By doing testing obstacles on the ground in a conditioned temperature conditions as well as the addition of salt. In testing soil resistivity values obtained can be decreased, which means the value can be changed by soil moisture and temperature conditions, as well as the addition of salt. Treatment with the addition of water can reduce the resistivity values up to 75 % of the 323.164 77.622 ohm ohm be adding salt while achieving 48 % of the original 51.425 8.707 ohm ohm become .

Keywords : earth , soil barriers

I. PENDAHULUAN

Pembumihan atau pentanahan adalah sistem proteksi yang sangat penting dalam instalasi listrik, karena berfungsi membuang arus berlebih kedalam tanah, sehingga dapat mengamankan manusia.

Sistem pentanahan diharapkan memiliki nilai tahanan tanah yang sekecil mungkin, karena dengan hambatan yang kecil dapat mengalirkan arus berlebih langsung ke tanah. Faktor yang mempengaruhi besar atau kecilnya tahanan pentanahan di suatu tempat adalah tahanan dari elektroda pentanahan, tahanan elektroda pentanahan dengan kontak tanah disekelilingnya dan tahanan jenis tanah.

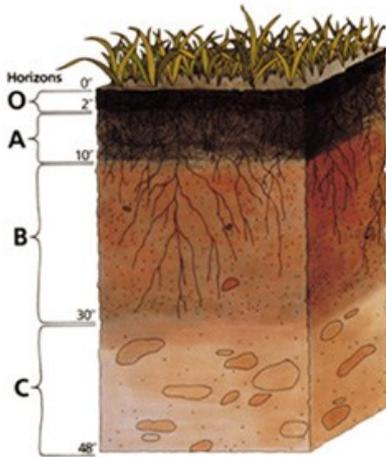
Masing-masing tanah memiliki karakteristik tahanan tanah yang berbeda dikarenakan tanah terdiri dari beberapa lapisan dan masing-masing dari lapisan tersebut berbeda kedalamannya dan strukturnya, komposisi dan campuran tanah yang tidak seragam. Tahanan jenis tanah pada tanah yang sama seperti tanah atau tanah berpasir dan berbatu saja cenderung memiliki nilai yang seragam,

faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi besaran tahanan jenis tanah adalah faktor suhu tanah, kelembaban tanah dan berapa besar bahan campuran kimiawi yang terkandung dalam tanah tersebut.

1.1 Profil Tanah

Tanah sendiri terbentuk dari beberapa lapisan, mulai dari lapisan atas yang terdiri dari lapisan yang lembut dan subur sampai ke lapisan bawah yang paling dasar terdiri dari bebatuan.

Berikut gambar 1 adalah gambar lapisan tanah pada tingkat atas sampai kurang lebih pada kedalaman 40 meter^[1]. Lapisan-lapisan tersebut dimulai dari lapisan atas yaitu lapisan O atau lapisan organik, yang terdiri dari komposisi tanah lembut dan humus, lapisan A merupakan lapisan selanjutnya yang terdiri dari tanah liat atau tanah lempung. Lapisan selanjutnya adalah lapisan B, dimana pada lapisan ini terdapat mineral dan pasir, sedangkan lapisan C lebih kompleks karena selain terdiri dari lapisan tanah juga sudah mendekati struktur bebatuan padat.

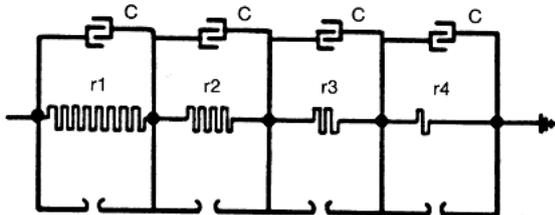


Gambar 1. lapisan tanah secara umum

Untuk simulasi pengujian dibuat supaya mendekati struktur tanah secara keseluruhan. Pada bagian pengujian hanya berisi tanah saja, untuk mencari nilai hambatan jenis tanah.

1.2 Karakteristik tanah

Tahanan pentanahan dari suatu elektrode dapat dipengaruhi oleh tiga hal, yaitu tahanan dari elektrode batang pentanahan, tahanan kontak antara elektrode pentanahan dengan tanah, serta tahanan dari tanah. Tahanan elektrode pentanahan dan tahanan kontak bergantung dari jenis elektrode pentanahannya, sedangkan tahanan tanah bergantung dari jenis tanah.^[1]



Gambar 2. Model tanah

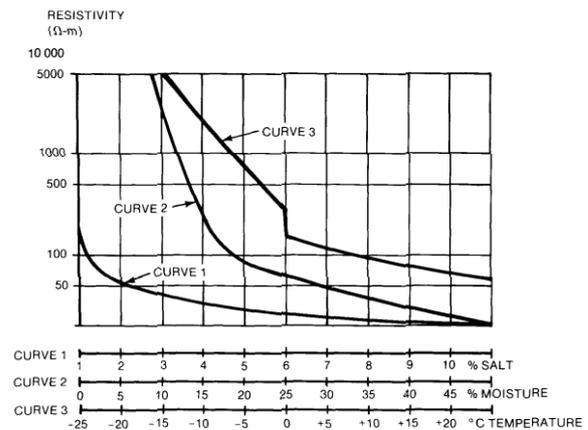
Karakter elektrode pentanahan yang ditanam di tanah bisa dianalisa oleh rangkaian di gambar 2^[3]. Dapat dilihat, kebanyakan tanah bertingkatlah laku baik sebagai penghantar dari hambatan R, maupun sebagai dielectric.

Efek lonjakan arus. Tahanan jenis tanah di sekitar elektrode pentanahan dapat terpengaruh oleh arus mengalir dari elektrode ke dalam tanah sekitarnya. Sifat termal dan kelembaban tanah akan memutuskan jika arus yang diberi besarnya dan lamanya akan menyebabkan pengeringan yang besar dan kemudian mengurangi efektifitas tahanan jenis tanah. Nilai konservatif kerapatan arus, yang diberikan oleh Armstrong, harus tidak melebihi 200 A/m² per detik.

Efek dari kelembaban dan campuran kimia. Konduksi listrik di tanah pada hakekatnya bersifat elektrolit. Untuk sebab ini tahanan jenis tanah kebanyakan tanah naik dengan tiba-tiba setiap kali kelembaban menunjukkan kurang dari 15% dari berat tanah. Banyaknya air lebih lanjut bergantung pada ukuran tanah, kepadatan, dan keanekaragaman ukuran butiran tanah. Tetapi, pada gambar 3, kurva 2, tahanan jenis sedikit terpengaruh

begitu kelembaban melebihi 22%. Efek suhu pada hambatan jenis tanah hampir tak berarti untuk suhu diatas titik beku. Di 0°C, air di tanah mulai membeku dan tahanan jenis bertambah secara sepat. Kurva 3 menunjukkan variasi untuk tanah liat yang berisi 15,2% kelembaban oleh berat.

Susunan dan banyaknya garam dapat larut, asam, atau alkali yang terdapat di tanah sangat mungkin mempengaruhi tahanan jenisnya. Kurva 1 gambar 3 menjelaskan efek khas garam (sodiumklorida) pada tahanan jenis tanah yang mengandung kelembaban 30% dari berat. Untuk menentukan tahanan jenis tanah sebenarnya, tes seperti yang yang digambarkan di ANSI/IEEE Std 81-1983 sebaiknya dilakukan langsung di tempat.



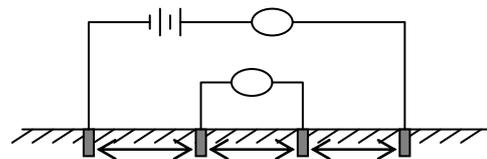
Gambar 3. Efek kelembaban, temperatur dan garam padatan jenis tanah

II. METODE PENGUKURAN

Untuk menentukan tahanan jenis tanah biasanya dilakukan dengan cara^[5] :

2. Metode empat titik (*four electrode methode*)
3. Metode tiga titik (*three-point methode*).

2.1 Metoda Empat Titik



Gambar 4. Pengukuran tahanan jenis tanah dengan Metode 4 titik

Metoda pengukuran yang dipergunakan adalah metoda empat titik seperti gambar 4. Bila arus I masuk ke dalam tanah melalui salah satu elektrode dan kembali ke elektrode yang lain sehingga pengaruh diameter konduktor dapat diabaikan. Arus masuk ke tanah mengalir secara radial dari elektrode, misalkan arah arus dalam tanah dari elektrode 3 ke elektrode 4 berbentuk permukaan bola dengan jari-jari r , luas permukaan tersebut adalah $2\pi r^2$, dan rapat arus adalah :

$$J = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \tag{1}$$

dimana :

- J = kerapatan arus [A/m^2]
- r = jari-jari [m]
- I = arus yang mengalir dalam tanah [A]

Dapat diperoleh tahanan jenis tanah pada elektroda 3 dan 4 jika diketahui tahananannya

$$\rho = R_{34} (2\pi a) \tag{2}$$

dimana :

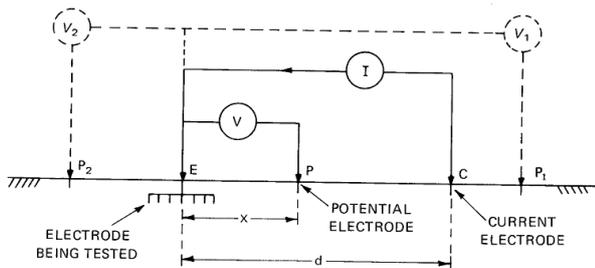
- a = jarak antara elektroda [m]
- R_{34} = tahanan antara elektroda 3 dan 4 [Ω]
- ρ = tahanan jenis tanah [$\Omega \cdot m$]

2.2 Metode Tiga Titik

Metode ini memerlukan penggunaan sebanyak dua elektroda tes dengan tahanan dari elektroda tes ditunjuk R2 dan R3 dan dengan elektroda untuk diukur yaitu R1. Hambatan antara masing-masing pasang elektroda diukur dan diberikan nama R12, R13, dan R23, di mana $r_{12} = r_1 + r_2$ dan seterusnya. Maka diperoleh persamaan

$$r_1 = \frac{(r_{12}) - (r_{23}) + (r_{13})}{2} \tag{3}$$

Oleh karena itu, dengan mengukur hambatan seri masing-masing pasang elektroda pentanahan dan mensubstitusikan nilai hambatan di persamaan, nilai R1 dapat diperoleh. Jika kedua elektroda tes memiliki hambatan yang lebih tinggi daripada elektroda yang sedang diuji, kesalahan pengukuran individual akan sangat besar di hasil akhir. Untuk pengukuran, elektroda harus di suatu jarak dari satu sama lain; atau keganjilan mungkin timbul di perhitungan, seperti nol atau hambatan negatif^[6].



Gambar 5. Pengukuran tahanan jenis tanah dengan Metode 3 titik

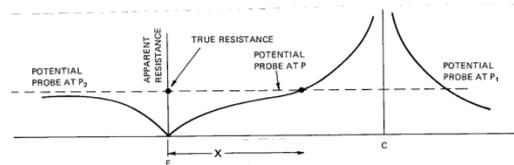
Sedangkan untuk menghitung ρ pada metode 3 titik digunakan rumus

$$\rho_a = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1} \tag{4}$$

Dimana

- ρ_a = hambatan jenis tanah
- L = kedalaman elektroda pentanahan
- d = diameter elektroda
- R = tahanan terukur

Arus I yang melewati elektroda uji E dan elektroda arus C, menghasilkan variasi potensial di permukaan tanah. Potensial profile disepanjang C, P, E, arahnya dapat dilihat di gambar. Potensial diukur dengan elektroda yang diuji E, yang diasumsikan di potensial nol. Metode turunnya potensial terdiri dari menggambar rasio $V/I = R$ sebagai fungsi jarak spasi x . Elektroda potensial dipindahkan jauh dari tanah yang sedang diuji dalam setiap langkah. Nilai tahanan didapatkan di masing-masing langkah. Iai hambatan ini digambarkan sebagai fungsi jarak, dan nilai ohm di yang garis lengkung ini yang direncanakan muncul untuk diambil sebagai hambatan nilai tanah di area pengujian.



Gambar 6. Nilai hambatan nyata untuk jarak X lapisan tanah

2.3 Faktor Pengukuran

Banyak faktor yang tidak menentu muncul dalam penghitungan tahanan pentanahan. Sebagai contoh, tahanan tanah dapat bervariasi berbanding terbalik dengan temperatur tanah, namun tahanan tanah berbanding lurus dengan kelembabannya dan dapat bervariasi dengan kedalamannya.

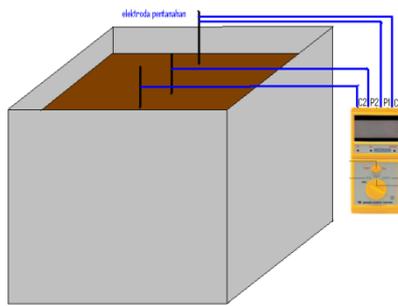
Salah satu cara yang pasti dalam menentukan tahanan adalah dengan melakukan pengukuran pada kondisi real sistem. Pengukuran juga hendaknya dilakukan dengan mengukur masing-masing elektroda yang ada. Dan pada kedalaman yang konstan.

Nilai tahanan jenis tanah (ρ) sangat tergantung pada tahanan tanah (R) dan jarak antara elektroda-elektroda yang digunakan pada waktu pengukuran. Pengukuran perlu dilakukan pada beberapa tempat yang berbeda guna memperoleh nilai rata-ratanya. Perbedaan tahanan jenis tanah akibat iklim biasanya terbatas sampai kedalaman beberapa meter dari permukaan tanah, selanjutnya pada bagian yang lebih dalam secara praktis akan konstan.

2.4 Objek Pengujian

Pengujian pada penelitian ini dilakukan pada sebidang tanah lempung dengan volume $1 m^3$, dan sebidang tanah dengan campuran pasir dan batu pada kedalaman 30 cm dari permukaan tanah. Pengujian dilakukan pada kedua bak pengujian, dimana pada bak pertama berisi tanah yang dilakukan pengujian pada variasi kondisi kelembaban, suhu dan dengan campuran garam.

Untuk variasi pengujian maka dilakukan pengambilan sampel pada posisi mendatar, menyamping 45° ke kiri dan ke kanan, pengujian juga dilakukan dengan memindahkan posisi elektroda pengukuran sejauh 15 cm, 20 cm, 25 cm, 30 cm dan 35 cm dari elektroda pentanahan, sehingga diperoleh hasil pengujian yang rata pada setiap posisi tanah.



Gambar 7. Rangkaian Pengujian Tahanan Tanah

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prinsip pengukuran tahanan pentanahan sama dengan cara pengukuran tahanan pada sistem elektronik yang lain. Metode ini menggunakan rumus dasar hambatan (R) yaitu tegangan (V) dibagi dengan arus (I). Dengan memberikan nilai tegangan konstan 0,2 Volt dari alat ukur dan arus berkisar dari 0,1 mA sampai dengan 10 mA maka akan diperoleh suatu nilai hambatan.

Hasil pengukuran hambatan akan di masukkan ke rumus dari persamaan (4) $\rho_a = \frac{2\pi LR}{\ln(\frac{8L}{d})-1}$ maka akan diperoleh nilai hambatan jenis pentanahan pada sistem tanah dan campuran. Dengan mengganti nilai kedalaman elektroda pentanahan L sesuai dengan pengujian yaitu sebesar 0,5m dan diameter elektroda pentanahan d sebesar 0,01m, dan nilai R diperoleh dari pengukuran, maka akan diperoleh persamaan

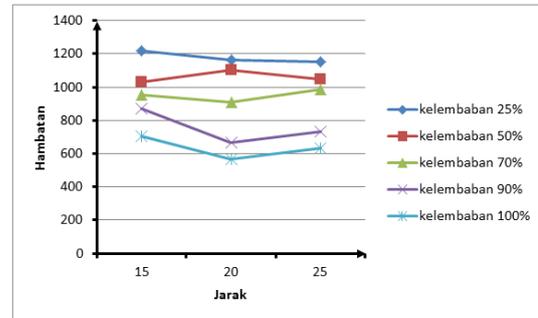
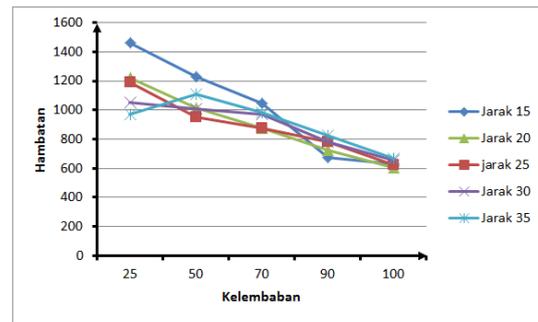
$$\rho_{tanah} = \frac{3,14 R}{4,991} \quad (5)$$

3.1 Pengujian kelembaban

Berdasarkan hasil pengujian, menggunakan rumus (4) untuk kelembaban 25% diperoleh hasil nilai rata-rata hambatan tanah adalah sebesar 1179,87 ohm maka nilai hambatan jenisnya adalah sebesar 742,294 ohm-m.

Tabel 1. Hasil perhitungan tahanan jenis tanah terhadap kelembaban

Kelembaban	ρ tanah (ohm-m)
25%	742,294
50%	667,968
70%	597,507
90%	475,666
100%	399,331
Rata-rata	576,553



Gambar 8. Pengaruh kelembaban dan jarak terhadap hambatan tanah

Pengujian pengaruh kelembaban terhadap hambatan pada tanah memberikan hasil bahwa semakin tinggi tingkat kelembaban tanah maka hambatan tanah akan menurun, sesuai dengan sifat air yang lebih rapat dibanding udara sehingga air akan mengisi kekosongan celah-celah udara pada tanah.

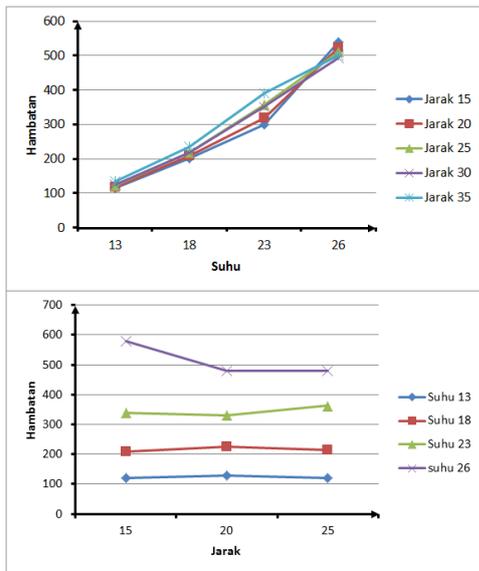
Kurva penurunan hambatan tanah menunjukkan penurunan rata-rata sebesar 46% yang hampir sama banyak pada setiap jarak, pada jarak 15 dan 35 cm terjadi perbedaan pengukuran tahanan tanah karena pada pengukuran 35cm terdapat penambahan air yang banyak mengisi celah pada tanah.

3.2 Pengujian suhu

Dari hasil pengujian pada suhu 26°C diperoleh nilai rata-rata hambatan adalah sebesar 513,667 ohm. Dengan menggunakan rumus (4) diperoleh hasil ρ tanah adalah sebesar 323,164 ohm-m

Tabel 2. Hasil perhitungan tahanan jenis tanah terhadap suhu

Suhu (°C)	ρ tanah (ohm-m)
26	323,164
23	216,086
18	136,152
13	77,622
Rata-rata	188,256



Gambar 9. Pengaruh suhu dan jarak terhadap hambatan pada tanah

Pengaruh penurunan suhu terhadap hambatan pada tanah pada dasarnya bahwa semakin rendah suhu tanah maka tahanan tanah akan naik, namun pada hasil pengujian hal tersebut berbeda dengan dimana terjadi penurunan tahanan tanah yang cukup besar pada saat terjadi penurunan suhu seperti terlihat pada gambar 9. penurunan tahanan tanah dengan penurunan suhu diperoleh sebesar rata-rata 75%.

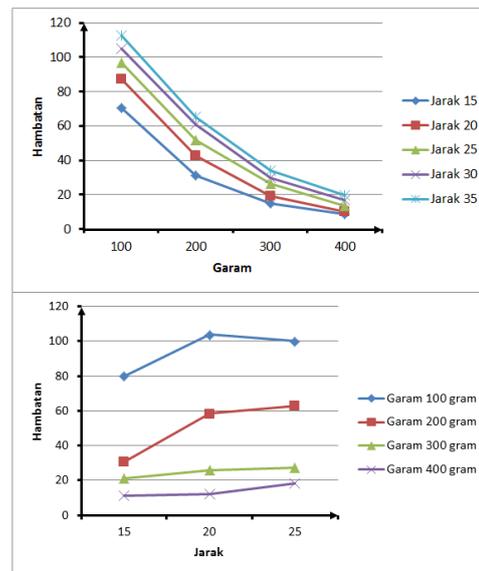
Pada kurva dapat dilihat bahwa pada suhu 26°C nilai hambatan sangat tinggi karena tanah masih kering dan belum diberikan campuran apapun, penurunan drastis terjadi pada suhu 13°C akibat dari penambahan air. Pada grafik perbandingan dengan jarak tidak terdapat perbedaan yang banyak antara jarak 15-35 cm.

3.3 Pengujian kadar garam pada tanah

Pengujian dengan penambahan garam 100 gram pada persamaan (4) diperoleh nilai rata-rata hambatan adalah sebesar 81,744 ohm Hambatan jenis adalah sebesar 51,425 ohm m

Tabel 3. Hasil perhitungan tahanan jenis tanah terhadap penambahan garam

Garam (gram)	ρ tanah (ohm-m)
100	51,425
200	25,889
300	13,949
400	8,707
Rata-rata	26,286



Gambar 10. Pengaruh berat garam dan jarak terhadap hambatan tanah

Pada pengujian ini diperoleh hasil penurunan tahanan tanah yang sangat banyak pada tanah. Hal ini karena sifat garam yang mengikat tanah sehingga komposisi tanah menjadi berubah dan lebih menjadi liat dan lengket dengan elektroda pentanahan.

Penurunan tahanan tanah terjadi sebesar rata-rata 48% dari nilai semula pada pertambahan berat garam 400 gram, namun pada penambahan jarak elektroda terjadi kenaikan tahanan tanah, hal ini disebabkan oleh sifat larutan garam yang dapat menjadi butiran garam lagi sehingga sulit menembus pori-pori tanah, jadi larutan air saja yang meresap ke dalam pori-pori tanah sehingga efek penambahan garam kurang efektif.

III. KESIMPULAN

Nilai resistivitas suatu tanah dapat dirubah menjadi kecil atau besar bila tanah tersebut diperlakukan secara khusus. Perlakuan dengan menambahkan air dapat memperkecil nilai resistivitasnya sampai dengan 75% dari 323,164 ohm menjadi 77,622 ohm sedangkan penambahan garam mencapai 48% dari semula 51,425 ohm menjadi 8,707 ohm. Besaran hambatan pentanahan sangat dipengaruhi oleh jenis tanah dan komposisi tanah pendukungnya, faktor kelembaban, suhu dan campuran bahan kimia yang terkandung didalam tanah tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Wikipedia, “soil profile” diakses tanggal 18 juni 2013 dari wikipedia.org http://en.wikipedia.org/wiki/Soil_profile

[2] IEEE std 142-1991, “IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems”, (Institute of Electrical and Electronics Engineering, 1992) , hal.126

-
- [3] IEEE std 80-1986, “*IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*”, (Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2000) , hal.71
- [4] Wikipedia, “*resistivity*” diakses tanggal 18 juni 2008 dari [wikipedia.org](http://en.wikipedia.org/wiki/Resistivity)
<http://en.wikipedia.org/wiki/Resistivity>
- [5] Agus Supardi, Toni Irawan, “*Karakteristik hambatan jenis tanah pada gedung psikologi UMS*” , Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta
- [6] IEEE std 81-1983, “*IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*”, (Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2000) , hal.20
- [7] Elektro Indonesia, “*Peraturan Umum untuk Elektrode Bumi dan Penghantar Bumi*” “diakses tanggal 18 juni 2012 dari elektro indonesia, <http://www.elektroindonesia.com/elektro/ener24b.html>

Uji Kemampu-Bakaran Pembungkus Kabel NYM Berstandar SNI Dengan *Differential Scanning Calorimetric*

Himawan Hadi Sutrisno¹, Riza Wirawan, Triyono
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta
¹himawansutrisno@yahoo.com

Abstrak — Bencana Kebakaran yang sering melanda pemukiman rawan bencana di Ibu Kota Jakarta. Hal itu menjadi pusat perhatian Pemprov DKI Jakarta akhir akhir ini. Konsleting listrik, ledakan gas serta lemahnya pengetahuan masyarakat menjadi hal yang klaim sebagai faktor penyebab kebakaran. Konsleting listrik penyebab kebakaran dapat timbul akibat adanya pemakaian kabel melebihi kapasitas daya hantar arus, sambungan yang tidak standart, dan timbulnya panas kabel yang mengakibatkan terbakarnya lapisan pembungkus kabel. Ketahanan thermal dari pembungkus kabel menjadi hal yang menarik untuk diketahui. Penelitian ini mencoba menguji kemampu bakaran dari beberapa merk kabel berjenis YNM berstandar SNI yang dipakai untuk instalasi listrik di perumahan penduduk menggunakan *Differential Scanning Calorimetric* (DSC). Hasil pengujian memperlihatkan perbedaan yang relative kecil pada karakteristik fase glass dan fase rubbery pada bahan uji.

Kata Kunci : *Glass Temperature, Differential Scanning Calorimetry*

Abstract — *Fire disasters that frequently hit the at settlements in the capital Jakarta. It was focus attention for government lately. Power surge, gas explosions, and poor people's knowledge into the claims as a factor causing fire disasters. Electrical short circuit can arise due to the usage of the cable exceeds the current-carrying capacity, the connection is not standard, and heat generation resulting in the burning of cable wrapping layer. Thermal resistance of the cable wrapping an interesting research to investigate this study that's tried to test the ability of several brands of SNI standart cable which used for electrical installations in residential. Using differential Scanning Calorimetric (DSC) the test results showed that relatively small differences in the characteristics of the glass phase and the rubbery phase of the test material.*

Key Words : *glass temperature, Differential Scanning Calorimetry*

I. PENDAHULUAN

Bencana kebakaran di daerah padat penduduk khususnya di ibu kota Jakarta akhir akhir ini sering terjadi. Berdasarkan data dari dinas pemadam kebakaran provinsi DKI Jakarta pada tahun 2012 bulan januari hingga oktober telah terjadi peristiwa kebakaran lebih dari 10 peristiwa. Bencana kebakaran ini berdampak kerugian materi yang jumlahnya tidak sedikit. Disamping itu bencana kebakaran juga memberi efek psikologis kepada para korban^[1].

Kesimpulan sementara oleh dinas pemadam kebakaran dan penyelidikan polisi, peristiwa kebakaran di daerah padat penduduk ini di picu oleh adanya konsleting listrik, kebocoran gas serta perilaku penduduk yang kurang peduli dengan bahaya kebakaran di lingkungannya.

Banyak pakar ahli tata kota memperkirakan bahwa pemasangan instalasi listrik yang tidak sesuai prosedur, beban berlebih^[2] akan memicu timbulnya korsleting ketika arus listrik pada kabel melebihi batas kemampuan kabel. Selain itu lemahnya pengawasan serta regulasi yang mengatur tentang instalasi kabel untuk perumahan harus secara simultan diperhatikan bersama.

Kecenderungan masyarakat ketika menggunakan listrik sebagai bagian dari kebutuhan hidup tidak memperhitungkan besarnya beban pada kabel yang

digunakan. Salah satu perilaku tersebut diantaranya adalah membagi bagi arus listrik dengan menggunakan stop kontak cabang, padahal apabila stop kontak ini dipaksakan menanggung beban diluar batas kemampuan maka akan menimbulkan panas^[3]. Begitu pula pada kabel sebagai penyalur arus listriknya. Perlu diperhatikan bahwa penambahan kontak pada saluran yang permanen seharusnya hanya untuk kebutuhan yang bersifat sementara bukan untuk permanen, perilaku penggunaan listrik ini berbahaya terhadap munculnya panas pada instalasi tersebut. Jika panas itu terjadi dalam waktu yang relatif lama, maka hal ini akan menyebabkan melelehnya box stop kontak serta melelehnya kabel yang mengalirkan listrik. Dimana hal ini sangat berbahaya karena melelehnya kabel dapat menimbulkan percikan bunga api pada kawat yang telah dialiri arus listrik. jika isolator tidak mampu menahan panas maka akan terjadi terbakarnya kabel.

Jika isolator pada kabel sudah terjadi panas yang mencapai titik bakar suhu isolasi kabel maka isolator terbakar tidak dapat dihindari. Sebagai contoh kabel untuk arus X Ampere dialiri arus listrik 2X ampere maka kabel tersebut menerima beban berlebih. Hal tersebut dapat timbul dalam penggunaan tanpa disadari ketika kabel tersebut dipakai untuk menyambung banyak peralatan listrik, akibatnya isolasi kabel dan peralatan menjadi panas.

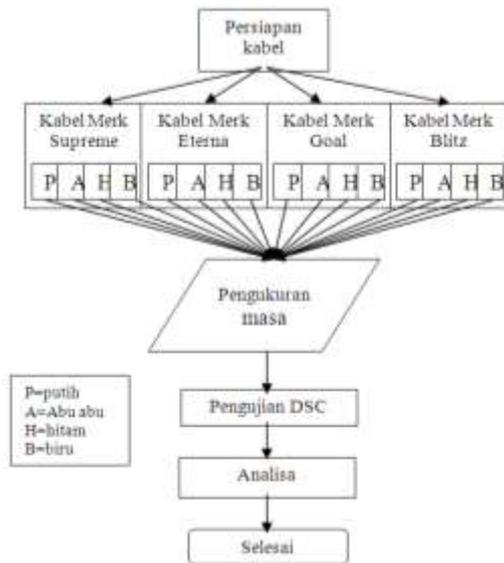
Penelitian ini akan fokus terhadap kemampu panas dari kabel NYM berstandart SNI dengan mengambil sampel dari beberapa merk ternama.

II. METODE PENELITIAN & FASILITAS YANG DIGUNAKAN

Pemilihan kabel adalah bertipe NYM dimana karakteristik kabel ini memiliki lapisan isolasi PVC (biasanya warna putih atau abu abu yang berinti 2, 3 atau 4. Kabel NYM 3 x 1.5mm memiliki lapisan isolasi dua lapis, sehingga tingkat keamanannya lebih baik dibanding jenis kabel NYA. Kabel ini dapat dipergunakan dilingkungan yang kering dan dilingkungan yang kering dan basah, namun tidak boleh ditanam.

Pemilihan contoh kabel yang berstandart SNI dengan tipe NYM dipilih 4 merk dari beberapa merk top ten di Indonesia. Setiap bahan kabel yang sudah dipisahkan berdasarkan merk dipotong disesuaikan terhadap kebutuhan specimen untuk mesin Differncial Scanning Calorimetry (DSC).

Masing masing kabel, dimana setiap kabel memiliki 4 jenis isolasi dengan warna berbeda diukur beratnya menggunakan mesin timbangan digital untuk menjaga ketelitian. Setelah mendapatkan specimen uji berdasarkan merk maka selanjutnya di uji menggunakan DSC sampai dengan suhu 400 derajat. Kurva DSC dari masing masing specimen menghasilkan karakteristik yang berbeda. Yang selanjutnya diperbanding untuk seluruh kabel guna mengetahui kemampuan bakar dai isolasi kabel ini. pengujian dengan DSC akan memperlihatkan stabilitas thermal yang terkait dengan perubahan fasa, dalam hal ini pelelehan Bahan yang meleleh pada temperatur lebih tinggi dikatakan memiliki stabilitas termal yang tinggi dan begitu pula sebaliknya.

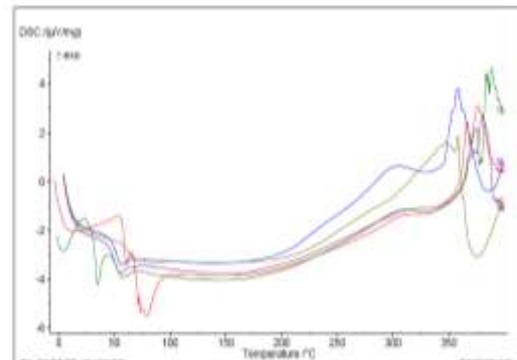


Gambar 1. Diagram alir Eksperimen

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

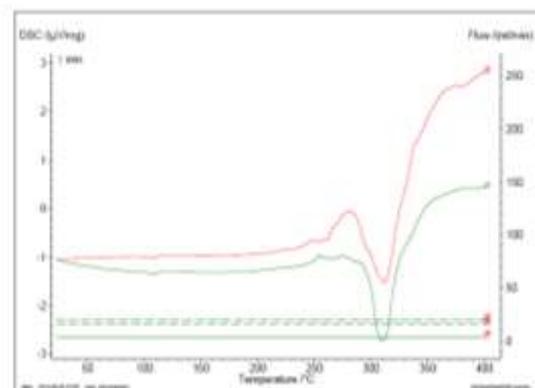
Hasil pengujian pada gambar 2. Untuk satu jenis kulit (isolasi) terluar atau isolasi kabel yang berwarna putih, pengujian dilakukan hingga suhu 400°C keseluruhan kurva memiliki karakteristik yang hampir sama. Titik

leleh (tm) masing masing merk terjadi pada kisaran suhu 375⁰ C. Meskipun terjadi perbedaan titik leleh namun perbedaan tersebut tidak signifikan. Dari hasil pengujian, lapisan terluar tidak akan terbakar apabila suhu diluar kabel di bawah atau sama dengan suhu leleh kabel. Peningkatan suhu secara tiba tiba akibat terjadi kebakaran di perumahan, lapisan luar kabel ini masih mampu melindungi kabel selama suhu di bawah titik leleh.



(biru=merk A, abu=Merk B, merah= Merk C, hijau= Merk D)

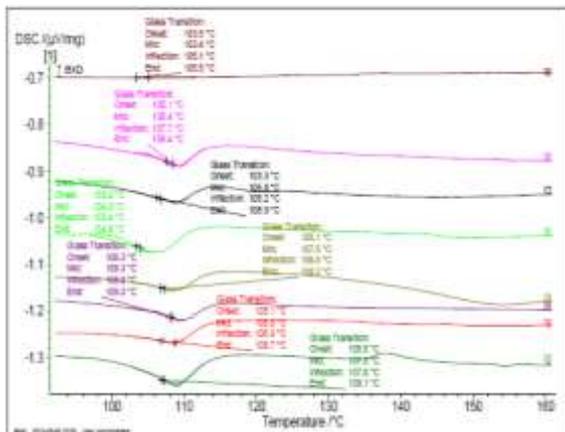
Gambar 2. Analisa DSC gabungan isolasi kabel terluar



(hijau=isolasi dalam warna biru kabel Merk A, merah=isolasi dalam warna hitam kabel Merk A)

Gambar 3. Analisa DSC pada isolasi kabel dalam

Pada gambar 3, pengujian dengan DSC dilakukan untuk satu jenis merk dengan menguji isolasi bagian terdalam atau yang membungkus langsung kawat kabel sampai dengan suhu 400⁰ C. Untuk kabel jenis NYM 3x1.5mm memiliki dua isolasi yang dibedakan dengan warna yaitu warna hitam dan warna biru. Dari analisa DSC dihasilkan bahwa karakteristik titik leleh dari kedua isolasi terdalam atau kulit yang membungkus langsung kawat memiliki persamaan karakteristik yaitu titik leleh terjadi pada suhu antara 300⁰ C sampai dengan suhu 325⁰ C . secara mendasar perbedaan titik leleh untuk kedua isolasi ini tidak terjadi secara signifikan. Gambar tersebut memiliki arti bahwa pada saat terjadi peningkatan suhu sama dengan atau lebih tinggi dari titik leleh hasil pengujian maka isolasi kabel terdalam akan terbakar.



(1&4=Merk A, 2&3=Merk B, 6&7= Merk C, 5&8= Merk D)

Gambar 4. Analisa DSC gabungan isolasi terdalam terhadap Glass Temperature.

Pada *glass temperature point* (tg) seperti yang terlihat dari hasil analisa DSC pada gambar 4. Terlihat bahwa masing masing isolator terdalam untuk ke-empat merk kabel memiliki karakteristik yang serupa yaitu terjadi diantara suhu 103 °C sampai dengan suhu 106 °C. perbedaan dari sampel kabel memiliki rentang relative rendah dalam kisaran 1 °C sampai 2 °C. Pada temperature ini terjadi perubahan fasa dari fasa *glass* ke fasa *rubbery* dimana hal tersebut mengandung arti bahwa pada suhu diatas 106 °C untuk semua jenis specimen yang telah diuji akan mengalami perubahan fasa. Perubahan fasa ini mungkin belum menjadi pusat perhatian, padahal pada fase ini kabel sudah kehilangan karakteristik kerasnya. Apabila terjadi peningkatan suhu pada kawat akibat adanya aliran listrik dengan beban yang tinggi maka isolator ini menjadi rentan dan tidak kaku lagi. Hal tersebut dapat terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Stabilitas termal bahan pada isolator terdalam

Spesimen	Temperatur(°C)
Kabel A hitam	105.5
Kabel A Biru	106.3
Kabel B hitam	105.1
Kabel B Biru	105.1
Kabel C hitam	103.2
Kabel C Biru	103.1
Kabel D hitam	105.1
Kabel D Biru	103.5

IV. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian diatas, dapat disimpulkan bahwa kabel NYM berstandar SNI lebih rentan terbakar pada isolator bagian terdalam karena pada isolator ini memiliki melting temperatur lebih rendah dibandingkan isolator bagian terluar. Peningkatan suhu kawat sampai dengan 106⁰ C akibat pemakaian atau beban berlebih serta akibat adanya arus pendek akan merubah fasa isolator kabel yang rentan untuk terbakar.

REFERENSI

1. Sunanto, B.S., Sri Suryoko, *PERAN SERTA MASYARAKAT DALAM PENCEGAHAN DAN PENCEGAHAN DAN PENANGGULANGAN KEBAKARAN LAHAN*. ewd, 2011. 1: p. 12-17.
2. Sunardiyo, S., *PENGARUH KENAIKAN SUHU PADA BAGIAN-BAGIAN KABEL BERISOLASI PVC* Teknik Elektro Vol2. No 2, 2010. 2.
3. Indra Z, I.K., *Analisis Sistem Instalasi Listrik Rumah Tinggal dan Gedung Untuk mencegah Bahaya Kebakaran*. Jurnal Ilmiah Elite Elektro 2011. 2(1): p. 4.

Perancangan Model Simulasi Sistem Kontrol pH pada pengolahan limbah di Reject Treatment Plant PT. KRAKATAU STEEL Dengan Metode Fuzzy Logic

Oktavia Djiah Pratiwi¹, Alimuddin², Ri Munarto³

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon, Indonesia

¹oktaviadjiahpratiwi@gmail.com, ³rim_munarto@yahoo.com

Abstrak – Reject Treatment Plant (RTP) CRM PT. Krakatau Steel adalah pengolahan limbah pabrik CRM yang apabila tidak dikendalikan dengan baik akan berdampak langsung kepada masyarakat sekitar pabrik. Kadar pH dari limbah tersebut dikategorikan layak di dalam daerah pH 6 sampai 9. Pengendalian pH merupakan proses titrasi antara asam dan basa yang merupakan gabungan dari model statik dan model dinamik. Model statik dibentuk dari hukum kesetimbangan elektronitas berdasarkan reaksi invarian, sedangkan model dinamik dipengaruhi oleh tempat terjadinya reaksi antara asam dan basa yaitu pada Continues Injection Pipe Mixing (CIPM). Sistem kendali menggunakan Logika Fuzzy. Berdasarkan hasil pengujian dalam daerah set point pH set point 5 sampai 10.5, keandalan sistem masih dikatakan baik sesuai batasan yang diberikan oleh pemilik plant.

Kata kunci : pengendalian pH, Continues Injection Pipe Mixing, Logika Fuzzy

Abstract – Vehicle speed estimation methods are widely applied in recent years. One of the methods that can be used is the Kalman filter. Kalman filter is an estimator that is very effective in estimating the system state dynamics involving white noise. In this study, the Kalman filter is used to estimate the variation of the speed of the vehicle. Kalman filter is designed to get input in the form of cascading images of the video recordings of the vehicle. Results of the testing showed that the minimum speed that can be estimated is 20 km / h with an error of 4.25 %. Estimation while the maximum speed is 60 km / h with an error of 0.22 %

Keywords : Estimation of speed, image, the Kalman filter.

I. PENDAHULUAN

Reject Treatment Plant (RTP) merupakan salah satu bagian dari sistem pengolahan limbah yang terdapat di Cold Rolling Mill PT. Krakatau Steel dimana sistem yang digunakan pada saat ini menggunakan pengendalian on-off. Pada sistem pengolahan limbah terdapat beberapa proses sampai akhirnya dibuang dengan syarat pH yang dimiliki limbah tersebut berkisar 6 sampai 9.[1]

Proses titrasi asam dan basa merupakan gabungan dari model statik dan model dinamik. Model statik dibentuk dari hukum kesetimbangan elektronitas berdasarkan reaksi invarian, sedangkan model dinamik dipengaruhi oleh tempat terjadinya reaksi yaitu pada Continues Injection Pipe Mixing antara asam kuat FeCl₂ dan basa kuat Ca(OH)₂.

Pengendalian digunakan Logika Fuzzy. Metode logika fuzzy ditemukan pertama kali oleh Prof. Lotfi Zadeh merupakan operasi if-then dengan menerapkan error (e) dan perubahan error atau delta error. Kendali logika fuzzy ini merupakan bagian dari proses kendali cerdas yang didasarkan atas basis data yang kaidah basis aturannya berdasarkan hasil evaluasi hubungan data masukan dan keluaran. Sistem Pengendalian Logika Fuzzy pada Reject Treatment Plant pabrik Cold Rolling Mill ini diharapkan dapat memperbaiki kinerja sistem yang ada.

Penelitian ini bertujuan untuk mendesain proses pengendalian titrasi asam-basa berdasarkan pada reaksi

invarian [11] sebagai pemodelan reaksinya untuk titrasi pada asam kuat FeCl₂ dan basa kuat Ca(OH)₂. Sedangkan tempat terjadinya reaksi digunakan Continues Injection Pipe Mixing (CIPM). Kemudian untuk sistem kendalinya Logika Fuzzy yang diharapkan menghasilkan respon yang stabil.

II. TEORI PENUNJANG

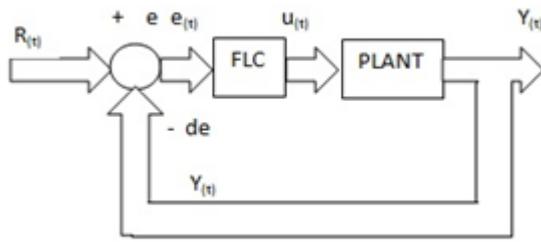
2.1. Derajat keasaman

Derajat keasaman digunakan untuk menyatakan tingkat keasamaan atau basa yang dimiliki oleh suatu zat, larutan atau benda. pH normal memiliki nilai 7 sementara bila nilai pH > 7 menunjukkan zat tersebut memiliki sifat basa sedangkan nilai pH < 7 menunjukkan keasaman. pH 0 menunjukkan derajat keasaman yang tinggi, dan pH 14 menunjukkan derajat kebasaaan tertinggi.

2.2. Kendali Logika Fuzzy

Metode logika fuzzy ditemukan pertama kali oleh Prof. Lotfi Zadeh merupakan operasi if-then dengan menerapkan error (e) dan perubahan error atau delta error. Kendali logika fuzzy ini merupakan bagian dari proses kendali cerdas yang didasarkan atas basis data yang kaidah basis aturannya berdasarkan hasil evaluasi hubungan data masukan/keluaran. Sistem kendali Fuzzy ini diharapkan dapat menyempurnakan sistem yang ada, sehingga dapat digunakan pada plant kontinyu linier maupun tak linier. Diagram blok sistem kendali lingkaran

tertutup dengan menggunakan kendali logika fuzzy seperti pa Gambar 2.1



Gambar 1. Sistem Kendali Loop tertutup dengan FLC

Parameter masukan kendali logika fuzzy berupa sinyal galat $e(t)$ yang dihasilkan dari sinyal referensi $R(t)$ sebagai setpoint dikurangi sinyal keluaran yang dikembalikan ke masukannya $Y(t)$. Sehingga persamaan matematis responnya adalah:

$$e_{(t)} = R_{(t)} - Y_{(t)} \quad (1)$$

Sinyal galat $e(t)$ ini sebagai masukan kendali fuzzy (FLC) setelah melalui proses fuzzifikasi dan defuzzifikasi yang ada didalam FLC menghasilkan keluaran $u(t)$ sebagai masukan Plant.

2.3. Dasar-dasar Pemodelan pada Plant

Pada reaksi titrasi asam basa melibatkan laju aliran dan konsentrasi fluida. Dua hukum kesetimbangan yang berpengaruh pada proses adalah hukum kesetimbangan massa dan hukum kesetimbangan komponen/konsentrasi. Hukum kesetimbangan massa, dipakai jika keadaan massa dalam suatu sistem berubah setiap waktu karena perubahan-perubahan nilai variabel yang mempengaruhinya, biasanya berupa aliran fluida yang masuk dan yang keluar system tangki. Kesetimbangan massa ini memiliki satuan Kg/s, dan dapat dirumuskan secara umum sebagai berikut:

$$\left[\frac{\text{akumulasi suatu massa dalam sistem}}{\text{waktu}} \right] = \left[\frac{\text{total massa yang keluar dari sistem}}{\text{waktu}} \right] - \left[\frac{\text{total massa yang masuk kedalam sistem}}{\text{waktu}} \right] \quad (2)$$

Hukum kesetimbangan komponen, dipakai ketika konsentrasi berubah setiap waktu pada suatu sistem,. Kesetimbangan komponen ini memiliki satuan mol/s. Persamaan hukum kesetimbangan komponen dirumuskan secara umum sebagai berikut :

$$\left[\frac{\text{akumulasi komponen dalam sistem}}{\text{waktu}} \right] = \left[\frac{\text{total komponen yang masuk dalam sitem}}{\text{waktu}} \right] - \left[\frac{\text{total komponen yang keluar dari sistem}}{\text{waktu}} \right] \pm \left[\frac{\text{total bertambah atau berkurangnya komponen karena pengaruh lainnya}}{\text{waktu}} \right]$$

2.4. Komponen Sistem Pengendali pH

Elemen-elemen sistem pengendalian pH diantaranya adalah elemen ukur berupa sensor pengukur pH larutan 0 – 14 berupa electrode gelas, pengendali Logika Fuzzy dan aktuator biasanya dipakai valve.

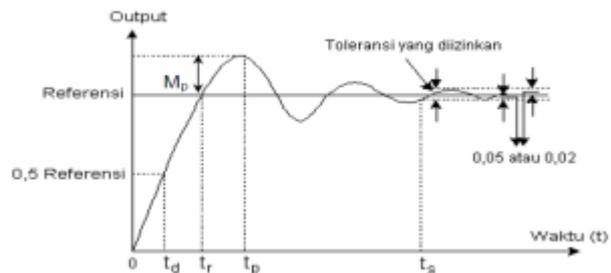
Sensor pH terdiri dari 2 elektrode, elektrode pertama untuk pengukuran dan elektrode lainnya sebagai referensi. Kedua elektrode ini dipisahkan oleh partisi yang terbuat dari gelas padat. Untk sensor pH ini, hubungan pH dengan ion hidrogen dapat dirumuskan dengan persamaan :

$$(3)$$

Perubahan konsentrasi ion hidrogen tersebut kemudian dikonversikan kedalam sinyal output listrik oleh elektrode gelas pH sensor dengan range pengukuran 0 – 14 dan sinyal keluaran 4 sampai 20 mA.

2.5. Analisa Tanggapan Transien

Karakteristik kinerja sistem kendali dinyatakan dalam bentuk tanggapan peralihan terhadap masukan tangga (step). Kurva tanggapan sistem terhadap masukan tangga dapat dilihat pada gambar 2.14



Gambar 2. Kurva Tanggapan Sistem Terhadap Masukan Tangga [2]

Karakteristik tanggapan sistemnya terdiri atas:

1. Waktu tunda, : Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan oleh respon untuk mencapai setengah nilai akhir respon yang pertama kali.
2. Waktu naik, : Waktu naik adalah waktu yang diperlukan oleh respon untuk naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95%, atau 0% sampai 100% dari harga akhirnya. Untuk sistem redaman kurang biasanya digunakan waktu naik 0% sampai 100 %.
3. Waktu puncak, : Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.
4. Waktu penetapan, : Waktu penetapan adalah waktu yang diperlukan grafik respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah disekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir (2% atau 5%).
5. Lewatan maksimum (overshoot), : lewatan maksimum adalah harga puncak maksimum dari kurva respon sistem yang diukur dari satu, jikaharga keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka digunakan persen lewatan maksimum. Nilai overshoot dihitung dalam persen lonjakan maksimum yang didefinisikan :

$$\%Mp = \frac{C(t_p) - C(\text{setpoint})}{C(\text{setpoint})} \times 100\% \quad (4)$$
6. Error steady state (Ess) adalah nilai error yang terjadi setelah mencapai seting point biasa di

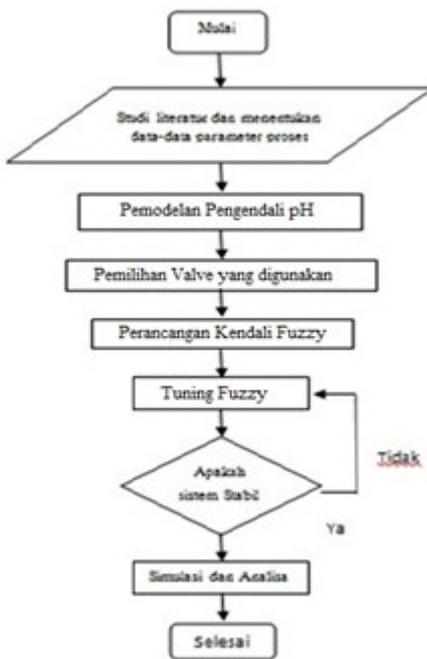
tunjukkan pada nilai osilasi stedy state ini berarti Ess dan Mp memiliki rumusan yang sama akan tetapi nilai yg berbeda pada persamaan (2.17), karena Mp adalah nilai maksimum yang pernah dicapai sedangkan Ess adalah nilai rata-rata error pada saat steady state.

$$\%Ess = \frac{C(\text{rata-rata overshoot}) - C(\text{setpoint})}{C(\text{setpoint})} \times 100\% \quad (5)$$

III. PEMODELAN SISTEM

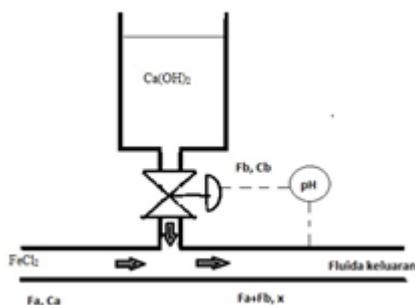
3.1. Alur Penelitian

Adapun tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dijabarkan melalui flowchart berikut :



Gambar 3. Flowchart Metodologi Penelitian

3.2. Dinamika Proses



Gambar 5. CIPM dengan dua masukan

Pada gambar 3.2 larutan basa titrasi Ca(OH)2 pada konsentrasi dan laju aliran tertentu akan menetralkan larutan limbah asam effluent FeCl2. Proses pencampuran terjadi di Continuous Injection Pipe Mixing (CIPM) menghasilkan larutan produk dengan konsentrasi tertentu. Persamaan 3.3 akan berubah menjadi :

$$x(t) = \frac{Fa.Ca}{Fa + Fb(t - \theta)} + \frac{Fb(t - \theta).Cb}{Fa + Fb(t - \theta)} \quad (6)$$

Kerangan :

Fa = Laju Aliran influent (l/s)

- Fb = Laju Aliran titrasi (l/s)
- Ca = Total Konsentrasi influent (M)
- Cb = Total Konsentrasi Larutan titrasi (M)
- x = Total konsentrasi pada keluaran
- θ = Time delay

Data operasi titrasi [FeCl2] oleh [CaOH2] perancangan sesuai tabel 1.

Tabel 1. Data Operasioal Titrasi [FeCl2] oleh [CaOH2]

No	Data Operasional	Satuan
1	Ca	0,001 M
2	Cb	0,007 M
3	Fa	4,1 Liter/detik
4	Fb	0-2.1 Liter/detik

3.3. Model Matematik Elemen Pengendali

Transmitter atau sensor pH yang digunakan adalah jenis elektrode. Sensor ini terdiri dari 2 elektrode, elektrode pertama digunakan untuk pengukuran dan elektrode lainnya sebagai referensi. Kedua elektrode ini dipisahkan oleh partisi yang terbuat dari gelas padat. Hubungan pH dengan ion hidrogen dapat dirumuskan dengan persamaan 3.16. perubahan konsentrasi ion hidrogen tersebut kemudian dikonversikan kedalam sinyal keluaran listrik oleh elektrode gelas pH sensor dengan range pengukuran pH 0 sampai 14 dan sinyal keluaran 4 sampai 20 mA. Sehingga diperoleh gain sensor / transmitter pH :

$$K_{pH} = \frac{\text{span keluaran}}{\text{span variabel terukur}}$$

$$K_{pH} = \frac{20mA - 4mA}{14 - 0} = \frac{16}{14} = \frac{8}{7}$$

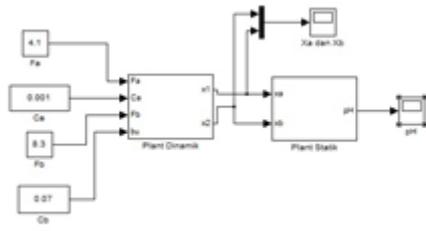
$$G_{pH} = \frac{K_{pH}}{\tau(s) + 1}$$

Diketahui bahwa keluaran dari sensor pH berupa nilai arus 4 mA sampai dengan 20 mA. Nilai ini harus dikonversi terlebih dahulu menjadi nilai tegangan. Setelah konversi dari arus menjadi tegangan kemudian sinyal ini dimasukkan ke dalam ADC (Analog to Digital Converter). Dimisalkan bahwa resolusi dari ADC ini cukup akurat dan proses konversi dari nilai arus menjadi nilai pH kembali berlangsung cepat, sehingga nilai gain dari transmitter ini adalah sama dengan 1. Dengan memberikan nilai time constant 5 detik maka fungsi alih dari transmitter adalah :

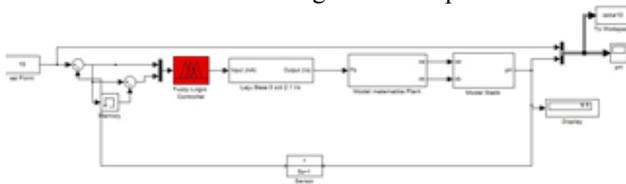
$$K_{pH} = \frac{1}{5s + 1}$$

3.4. Perancangan Sistem Lingkar Terbuka

Pemodelan sistem lingkar terbuka digunakan untuk mengetahui hasil proses titrasi tanpa adanya sistem kontrol didalamnya



Gambar 6. Diagram blok sistem lingk terbuca Pemodelan Sistem Lingk Tertutup



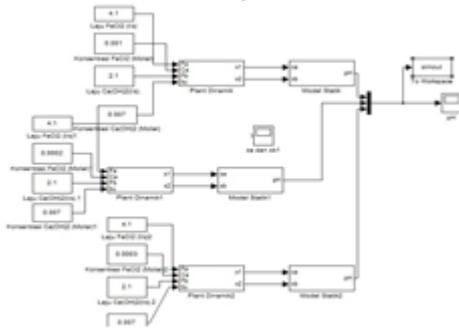
Gambar 7. Pemodelan Sistem Lingk tertutup

IV. SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Pengujian

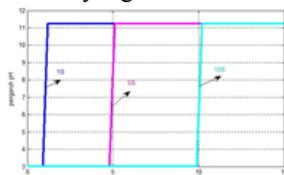
Sebelum perancangan maka di uji pengaruh dari tiap komponen.

1. Simulasi Sistem Lingk Terbuka



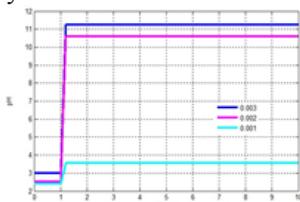
Gambar 8. Pengaruh Terhadap Perubahan Konsentrasi Ca(OH)₂

Pada simulasi sistem lingk terbuca ini dijalankan dengan data operasional yang ada.



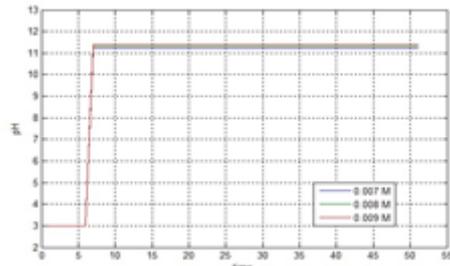
Gambar 9. Pengaruh Time Delay Terhadap Keluaran

Pengaruh waktu yaitu menunjukkan waktu permulaan terjadinya titrasi, misalkan pada saat 1 detik maka proses titrasinya terjadi pada waktu 1 detik, begitu juga untuk waktu yang lainnya.



Gambar 10. Pengaruh Konsentrasi dari FeCl₂ dengan nilai konsentrasi Ca(OH)₂ tetap Terhadap Keluaran Plant

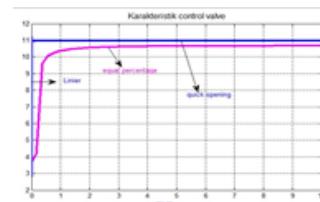
Pengaruh perubahan tingkat keasaman digunakan untuk mengetahui pengaruh perubahan molaritas effluent FeCl₂ dan keasaman basa dibuat tetap dengan waktu penetapan diset 1 detik



Gambar 11. Pengaruh Konsentrasi pada Ca(OH)₂ dan dengan nilai FeCL₂ Tetap terhadap keluaran plant

Untuk perubahan molaritas basa Ca(OH)₂ dan molaritas asam dibuat tetap didapat hasil pengujian menunjukkan tidak adanya perubahan yang signifikan pada respon keluaran pH. Dari kedua pengujian di atas, dapat disimpulkan bahwa kestabilan respon keluaran pH sangat sensitive terhadap perubahan konsentrasi atau molaritas asam, tetapi tidak berlaku sebaliknya.

Pada pengujian beberapa aktuator valve yang digunakan seperti ditunjukkan pada Gambar 11, disimpulkan respon keluaran berturut-turut dari yang paling cepat apabila digunakan valve jenis quick opening dan linier, serta jenis equal percentage.



Gambar 11. Pengaruh karakteristik Valve Terhadap Keluaran plant

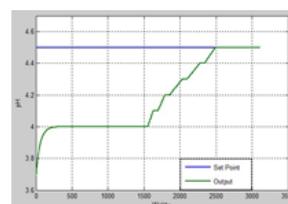
Dalam penelitian ini, digunakan actuator valve jenis linier.

2. Simulasi Closed Loop Sistem

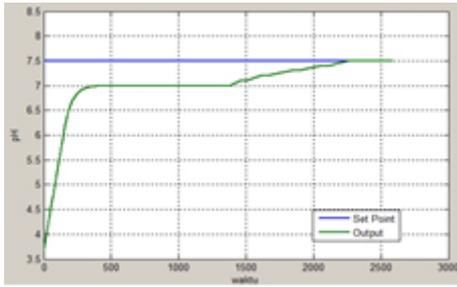


Gambar 12. Diagram blok Sistem Lingk Tertutup

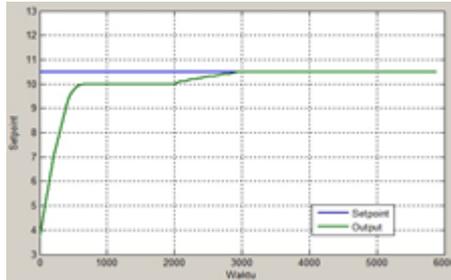
Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui keandalan sistem akibat gangguan yang diberikan pada sistem berupa perubahan set point pH dari pH 4,5 sampai 10,5.



Gambar 13. Output set point 4.5



Gambar 14. Output set point 7.5

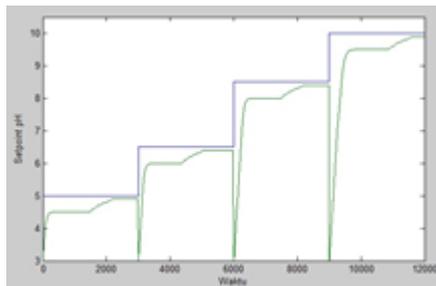


Gambar 15. Output set point 10.5

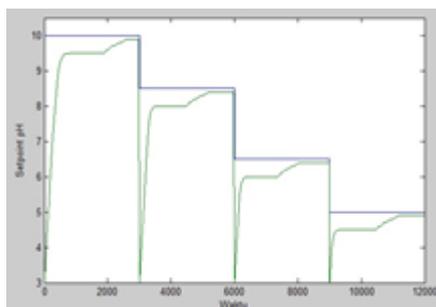
Dari hasil pengujian diketahui peningkatan nilai setting pH akan memperpanjang waktu penetapan system, sehingga akan memperlama terjadinya kestabilan. Mengingat waktu terjadinya kestabilan sistem ini masih dianggap tidak mempengaruhi operasi dari plant, maka disimpulkan bahwa sistem kendali Logika Fuzzy pengendalian pH reject treatment plant masih dapat diterima.

3. Uji Tracking Set Point

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui keandalan sistem yang digunakan terhadap gangguan yang terjadi yaitu sejauh hasil tracking apabila dilakukan gangguan kenaikan dan penurunan pH secara terus menerus



Gambar 16. Tracking Setpoint Naik (5;6.5;8.5;10.5)



Gambar 17. Tracking Setpoint Turun (5;6.5;8.5;10.5)

Dari Gambar 4.11 dan Gambar 4.12, untuk kondisi tracking naik dan turun meliputi range pH 5 sampai 10

dan kebalikannya, disimpulkan bahwa sistem dapat dikatakan andal karena mampu tracking terhadap gangguan yang terjadi yaitu perubahan setting pH dari 5 sampai 10 secara terus menerus.

V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penelitian telah berhasil melakukan pemodelan pengendalian pH pada pengolahan limbah di Reject Treatment plant pabrik Cold Rolling Mill PT.Krakatau Steel.
2. Direkomendasikan Valve yang digunakan yaitu valve jenis linier,karena valve cukup mampu memberikan respon yang cepat disamping harga yang reaktif lebih murah disbanding valve jenis quick response ataupun equal [percentage].
3. Penelitian telah berhasil menunjukkan dengan pemodelan sistem dengan logika fuzzy, sistem memiliki keandalan sesuai batasan yang diberikan oleh pemilik plant untuk pengendalian pH diantara 6 sampai 9 dengan waktu penetapan maksimal menit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SOP Reject Treatment Plant di Coil Rolling Mill PT. Krakatau Steel
- [2] Ogata, Katsuhiko, Modern Control Engineering edisi ketiga, Prentice Hall, New jersey,1997.
- [3] Kusumadewi Sri, & Purnomo Hari, Aplikasi Logika Fuzzy Untuk Pendukung Keputusan, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2002.
- [4] Kuswandi Son, Kendali Cerdas Teori dan Aplikasi Praktisnya, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2007.
- [5] Naba Agus, Belajar Cepat Fuzzy Logic Menggunakan MATLAB, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2009.
- [6] Cordova, H ; 2004; PID Self-Tuning Based On Auto Switch Algorithm To Control pH; Teknik Fisika, FTI, ITS..
- [7] Peter Yien, Jean ; 2001; Measuring, Modelling And Controlling The pH Value And The Dynamic Chemical State; Helsinsky University Of Technology.
- [8] Mukhlis ; 2010; Proses Titrasi Asam Basa; Teknik Fisika, FTI, ITS.Rashid Muhammad H, Power Electronic Handbook, Academic Press,Canada,2001
- [9] Lee,Choi; 1999; In-Line Mixer For Feedforward Control and Adaptive Feedback Control Of pH Process; Department of Chemical Engineering, Kyungpook National University.Bejo Agus, Rahasia Kemudahan Bahasa C dalam Mikrokontroler ATMega8535, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2008.
- [10] Jun Yuan,Michael Ryan, and James Power:Using Fuzzy Logic (Towards Intelligent System),Prentice Hall Internasional (UK) Limited,1994

Analisis Arus Dan Tegangan Transien Akibat Pelepasan Beban Pada Sisi Primer Transformator Unit 5, Unit 6, dan Unit 7 Suralaya

Angga Adi Prayitno, Suhendar, dan Herudin

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

Abstrak – Gejala transien adalah perwujudan dari perubahan yang mendadak karena terjadi pembukaan dan penutupan saklar atau adanya gangguan pada suatu sistem yang dapat menimbulkan kerusakan pada transformator. Saat terjadi gejala transien peralatan-peralatan mengalami gangguan yang sangat besar berupa tegangan dan arus yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan tersebut. Penelitian ini akan menghitung nilai arus dan tegangan transien yang berada pada sisi primer transformator, dengan menggunakan Electric Transient Analysis Program 7 (ETAP 7) serta pengaruhnya terhadap circuit breaker (CB). Setelah disimulasikan besarnya arus transien pada saat kondisi beban penuh puncak sebesar 59183,5 Ampere sedangkan untuk tegangan transien sebesar 12,2345 kV. Pada saat PT. Asahimas dan PT. PolyPrima off arus transien yang terjadi sebesar 57638,6 Ampere sedangkan untuk tegangan transien sebesar 12,1501 kV. Pada saat PT. Asahimas, PT. PolyPrima dan PT. Alindo off arus transien yang terjadi sebesar 57541,4 Ampere sedangkan untuk tegangan transien 12,0637 kV. Pada saat PT. Asahimas, PT. PolyPrima, PT. Alindo dan Serang off arus transien yang terjadi sebesar 57311,5 Ampere sedangkan untuk tegangan transien 12,0637 kV dan pada saat penambahan beban PT. Krakatau Posco arus transien sebesar 64334,9 Ampere sedangkan untuk tegangan transien 13,1264 kV. Dari hasil simulasi didapat hasil bahwa arus transien mengakibatkan kerusakan pada transformator khususnya pada belitannya serta dapat menurunkan kehandalan transformator. Namun, masih aman untuk circuit breaker sedangkan untuk tegangan transien masih aman untuk transformator tetapi dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan kendali elektronik.

Kata Kunci : Arus Transien, Pelepasan Beban, Sisi Primer Transformator, CB, Etap.

Abstrak – Transient phenomena are manifestations of sudden changes due to the opening and closing of the switch or a disturbance in a system that can cause damage to the transformer. Transient phenomena occur when devices experience interference in the form of a very large voltages and currents that can cause damage to the equipment. This study will calculate the value of current and voltage transients on the primary side of the transformer, using 7 Electric Transient Analysis Program (ETAP 7) and its influence on circuit breaker. After the simulated magnitude of the transient current during full load conditions while the peak at 59183.5 Ampere for voltage transients at 12.2345 kV. At the time of PT. Asahimas and PT. Polyprima off transient current that occurs at 57638.6 Ampere for voltage transients while at 12.1501 kV. At the time of PT. Asahimas, PT. Polyprima and PT. Alindo off transient current that occurs at 57541,4 Ampere for voltage transients while at 12,0637 kV. At the time of PT. Asahimas, PT. Polyprima, PT. Alindo and Serang off transient current that occurs at 57311,5 Ampere for voltage transients while at 12,0637 kV and when the addition of PT. Krakatau Posco load transient currents of 64334.9 Ampere while for transient voltage at 13.1264 kV. Results obtained from the simulation results that the transient currents resulting in damage to the transformer especially belitannya and can reduce transformer reliability. However, it is still safe for the circuit breaker while still safe for transient voltage transformer but can cause damage to the electronic control equipment.

Keywords : Transien Current, Loose Load, Primary side of the transformer, CB, Etap.

I. PENDAHULUAN

Transformator memegang peranan yang penting dalam proses penyaluran daya. Transformator berfungsi penyalur daya dari daya rendah ke daya tinggi atau sebaliknya. Pada saat operasi terkadang sistem mengalami gangguan yang mengakibatkan terhentinya penyaluran daya. Salah satu gangguan tersebut adalah gejala transien. Gejala transien adalah perwujudan dari perubahan yang

mendadak karena terjadi pembukaan dan penutupan saklar atau adanya gangguan pada suatu sistem yang dapat menimbulkan kerusakan pada peralatan.

Gejala transien yang terjadi dalam waktu yang sangat singkat, dapat mempengaruhi peralatan-peralatan yang ada disekitarnya. Saat terjadi gejala transien peralatan-peralatan mengalami tekanan yang sangat besar berupa tegangan dan arus, yang dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan tersebut.

Salah satu peralatan listrik yang terkena dampak buruk dari gejala transien adalah transformator. Gejala transien dapat terjadi akibat adanya gangguan dari dalam maupun luar. Salah satu gangguan dari dalam tersebut adalah berupa proses alih hubung (*switching*) yang terjadi akibat adanya gangguan hubung singkat yang membuat *circuit breaker* (CB) bekerja melepaskan beban. Sedangkan gangguan dari luar yakni gangguan yang berasal dari sambaran petir.

Berdasarkan hal di atas, maka akan dilakukan simulasi dan analisis arus transien pada sisi primer transformator terhadap pelepasan beban menggunakan ETAP (*Electric Transient Analysis Program*). Dimana lokasi penelitian dilakukan di PLTU Suralaya unit 5, unit 6, dan unit 7 serta wilayah kerja GITET Cilegon Baru.

II. DASAR TEORI

A. Gejala Peralihan (Transien)

Gejala peralihan atau transien merupakan perubahan nilai tegangan atau arus maupun keduanya baik sesaat maupun dalam jangka waktu tertentu (dalam orde mikro detik) dari kondisi tunaknya (*steady state*). Penyebabnya adalah dapat dari lingkungan atau faktor eksternal seperti petir, dan dapat juga akibat perlakuan terhadap sistem itu sendiri atau faktor internal seperti *switching*. Transien sudah lama digunakan dalam istilah tenaga listrik sebagai sesuatu kejadian yang sebenarnya tidak diinginkan dan sifatnya sangat cepat, namun merupakan suatu kejadian yang alami sehingga tidak dapat dicegah. Kondisi transien dapat berupa tegangan ataupun arus. Untuk transien arus lebih dikenal secara khusus sekarang ini sebagai arus *inrush* [7]. Pada rangkaian listrik, transien merupakan suatu karakteristik respon alami tegangan atau arus dari sistem yang terdiri dari komponen resistif (R), induktif (L) dan kapasitif (C).

B. Penyebab Transien pada Rangkaian Listrik

Penyebab fenomena transien adalah karena adanya perubahan parameter rangkaian, yang biasanya terjadi akibat pensaklaran, rangkaian terbuka (*open circuit*) atau hubung singkat (*short circuit*), perubahan dalam operasi sumber, dll. Transient merupakan perubahan variabel tegangan dan arus yang berlangsung saat peralihan dari satu kondisi stabil ke kondisi yang lain. Perubahan arus, tegangan selama transien tidak berlangsung seketika (*instant*) dan membutuhkan waktu, walaupun perubahan ini terjadi secara cepat dalam hitungan milidetik atau bahkan mikrodetik [7].

Perubahan yang sangat cepat ini bagaimanapun juga tidak dapat terjadi secara seketika karena proses transien dicapai melalui pertukaran energi, yang biasanya tersimpan dalam medan magnet dari induktansi dan atau medan listrik dari kapasitansi. Perubahan energi tidak

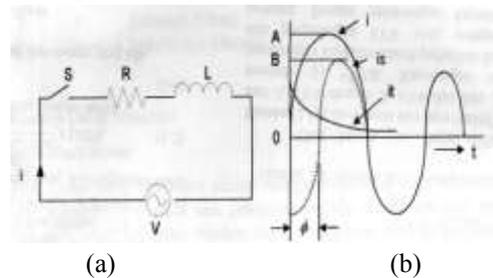
dapat terjadi secara mendadak karena akan menghasilkan daya yang tidak terbatas (daya adalah turunan dari energi, $P = dW/dt$), yang tidak mungkin terjadi dalam keadaan sesungguhnya. Semua perubahan parameter saat transien (yang disebut juga respon transien) kemudian menghilang, dan akan muncul keadaan tunak baru.

Dalam hal ini, transien dapat didefinisikan sebagai perilaku rangkaian diantara dua keadaan tunak, yaitu keadaan tunak yang lama (sebelum perubahan) dan keadaan tunak yang baru.

Penyebab terjadinya transient antara lain :

- a) *Load switching* (penyambungan dan pemutusan beban)
- b) *Switching* kapasitor
- c) *Transformer inrush current*
- d) *Recovery voltage*

Transien yang terjadi pada saat pembukaan saklar maka akan terjadi perubahan besar nya arus yang dapat dilihat pada gambar 1. [9]



Gambar 1. (a) Rangkaian Ekuivalen R-L dan (b) Bentuk Gelombang Arus Untuk Rangkaian R-L.

Pada bentuk gelombang arus untuk rangkaian R-L didapat :

- i = arus awal (Ampere)
- V = tegangan (Volt)
- R = tahanan (Ohm)
- L = induktansi (Henri)
- i_s = arus keadaan steady state (Ampere)
- i_t = arus transien (Ampere)
- t = waktu (detik)

Sehingga :

$$i_t = A e^{-\frac{R}{L}t} \tag{1}$$

Dengan :

- i_t = arus transien (Ampere)
- A = konstanta
- R = tahanan (Ohm)
- L = induktansi (Henri)

C. Pemutus Daya

Setiap sistem tenaga listrik dilengkapi dengan sistem proteksi untuk mencegah terjadinya kerusakan pada peralatan sistem dan mempertahankan kestabilan sistem ketika terjadi gangguan, sehingga kontinuitas pelayanan

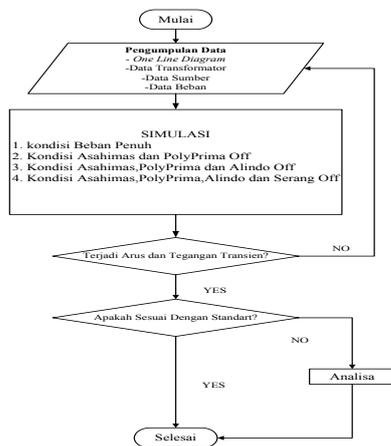
dapat dipertahankan. Salah satu komponen sistem proteksi adalah pemutus daya (*circuit breaker*).

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu pemutus daya agar dapat mempertahankan kontinuitas pelayanan :

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus daya itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampai merusak peralatan sistem, membuat sistem kehilangan kestabilan, dan merusak pemutus daya itu sendiri

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Metode Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Proses penelitian, yaitu mensimulasikan serta menganalisa sistem yang telah ada dengan menggunakan *software Electric Transient Analysis Program 7 (ETAP 7)*. Proses analisa data yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- a. Memperoleh data jaringan yang dibutuhkan untuk mengisi parameter dalam simulasi.
- b. Setelah memperoleh data trafo, kabel kemudian diolah agar sesuai dengan *form* parameter pada *software ETAP 7*.
- c. Setelah pengolahan data akan dimodelkan dalam *software ETAP 7* yang kemudian akan disimulasikan.
- d. Setelah simulasi, didapat nilai arus maupun tegangan yang terjadi saat keadaan normal beban penuh.
- e. Setelah mengetahui nilai arus dan tegangan dalam keadaan normal saat beban penuh, beri skema gangguan 3 fasa ke tanah dan setting

circuit breaker (CB) pada sisi mendekati sumber dari menutup untuk membuka sesuai waktu yang diinginkan. Setelah itu, akan didapatkan nilai arus dan tegangan transien saat terjadinya *switching*. Setelah mengetahui arus dan tegangan transien saat beban penuh dilepas, lalu bandingkan dengan arus dan tegangan pada saat normal beban penuh.

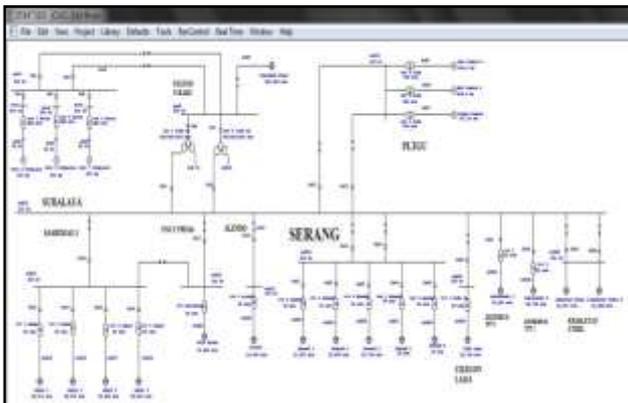
- f. Setelah mendapatkan nilai arus dan tegangan keadaan normal beban penuh maupun saat *switching* beban penuh barulah kita secara bertahap mengurangi beban. Mulai dari Asahimas dan PolyPrima di nonaktifkan. Setelah itu kita lihat besar nya arus dan tegangan saat keadaan normal maupun arus dan tegangan saat *switching*.
- g. Setelah mendapatkan nilai arus dan tegangan keadaan normal maupun *switching* saat Asahimas dan PolyPrima di nonaktifkan. kita bandingkan besarnya persentase arus dan tegangan transiennya.
- h. Setelah Asahimas dan PolyPrima dinonaktifkan. Lalu nonaktifkan beban dari Alindo. Setelah mengetahui nilai arus dan tegangan saat kondisi normal dan *switching* dengan beban Asahimas, PolyPrima dan Alindo dalam kondisi off, kita bandingkan nilai saat normal dan saat *switching* berapa besar persentase arus dan tegangan transiennya.
- i. Setelah Asahimas, PolyPrima dan Alindo di nonaktifkan. Lalu kita nonaktifkan beban dari Serang. Setelah mengetahui nilai arus dan tegangan saat kondisi normal dan *switching* dengan beban Asahimas, PolyPrima, Alindo dan Serang dalam kondisi off, kita bandingkan nilai saat normal dan saat *switching* berapa besar persentase arus dan tegangan transiennya.
- j. Setelah kita mensimulasikan keempat keadaan kita simulasikan penambahan beban dengan menambahkan Krakatau Posco kedalam single line diagram. Setelah mengetahui nilai arus dan tegangan transien yang terjadi. Setelah mensimulasikan semua keadaan barulah kita lihat manakah yang nilai persentase perbedaannya paling besar serta nilai arus dan tegangan transien yang paling besar di antara keempat kondisi yang telah disimulasikan.
- k. Setelah mengetahui nilai persentase perbedaannya yang paling besar serta nilai arus dan tegangan transien yang paling besar. Simulasikan arus pada saat *switching* yang tertinggi dengan memasukkan nilai spesifikasi *circuit breaker* yang terpasang pada gardu induk. Kemudian kita simulasikan arus transiennya,

maka kita dapat melihat apakah circuit breaker yang telah terpasang mampu menahan arus transien pada saat switching atau tidak.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan *Single Line Diagram* Sistem 500 kV & 150 kV pada Jaringan Suralaya-Cilegon Baru.

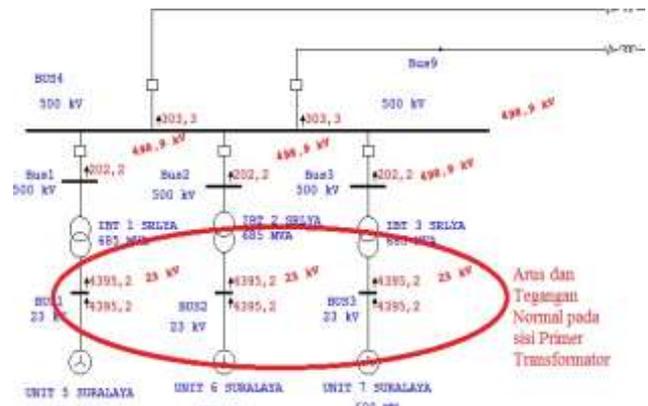
Setelah memperoleh data-data yang diperlukan, selanjutnya akan dilakukan pemodelan dengan menggunakan *software* ETAP 7. Pada simulasi kali ini akan di simulasikan dalam empat kondisi yakni saat beban penuh, saat asahimas dan polyprima off, saat kondisi asahimas,polyprima dan alindo off, dan yang terakhir saat kondisi asahimas,polyprima,alindo dan serang off. Proses simulasi ini berdasarkan beban terbesar hingga yang terkecil ,beban yang paling besar adalah asahimas yang bergabung dengan polyprima sebesar 217,554 MVA, sedangkan beban pada serang sebesar 201,083 MVA dan beban terkecil ada pada alindo sebesar 24,928 MVA. Pemodelan sistem transmisi 500 kV dan 150 kV disesuaikan dengan sistem pada jaringan Suralaya – Cilegon Baru beserta wilayah kerjanya Berikut ini gambar *single line diagram* pemodelannya dapat dilihat pada gambar 3:



Gambar 3. Pemodelan *Single Line Diagram* Sistem 500 kV & 150 kV pada Jaringan Suralaya-Cilegon Baru

B. Keadaan Normal Beban Penuh.

Pada kondisi normal dengan beban penuh, sumber menyuplai tegangan sebesar 23 kV untuk dialirkan ke general transformator untuk dirubah menjadi 500 kV . Arus yang mengalir dari generator ke transformator sebesar 4395,2 Ampere dan tegangan sebesar 23 kilo Volt pada sisi primer seperti pada gambar 4 dibawah ini:



Gambar 4. Arus dan Tegangan Normal Beban Penuh

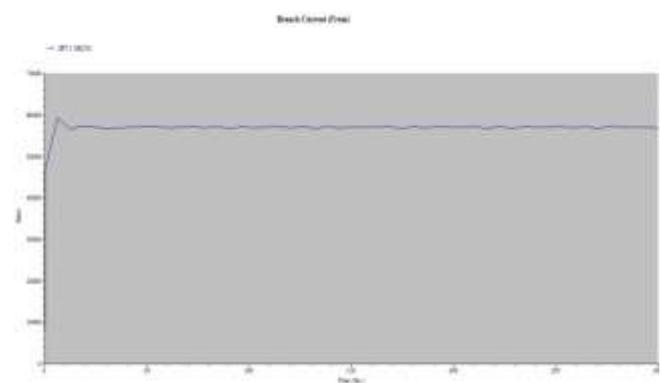
Tegangan dan arus untuk unit 5 , unit 6 dan unit 7 dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Keadaan Normal Beban Penuh

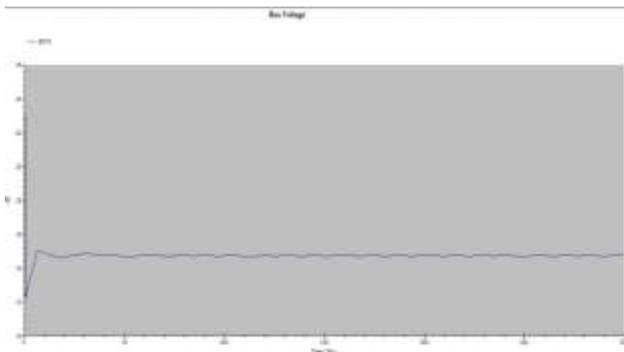
Unit	Tegangan Transformator (kV)	Arus Transformator (Ampere)
Unit 5 Suralaya	23	4395,2
Unit 6 Suralaya	23	4395,2
Unit 7 Suralaya	23	4395,2

C. Keadaan *Switching* Beban Penuh.

Pada kondisi ini kita anggap terjadi gangguan 3 fasa ke tanah sehingga CB (*circuit breaker*) 5 dalam keadaan terbuka dengan proses simulasi selama t = 300 Detik seperti pada standar SPLN. Besarnya arus transien dan tegangan transien pada sisi primer transformator *low voltage* dapat dilihat pada gambar 5 untuk arus transien dan gambar 6 untuk tegangan transien berikut ini :



Gambar 5. Grafik Simulasi Arus Transien pada Sisi Primer *Low Voltage* Transformator Unit 5, Unit 6 dan Unit 7 Beban Penuh



Gambar 6. Grafik Simulasi Tegangan Transien pada Sisi Primer Low Voltage Transformator Unit 5, Unit 6 dan Unit 7 Beban Penuh

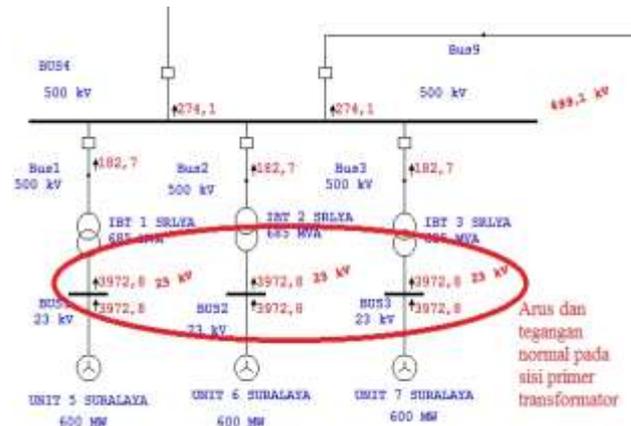
Nilai arus transien yang terjadi pada setiap unit mengalami kenaikan yang tinggi yang mula hanya berada di 4395,2 A sekarang naik hingga menembus 59183,5 A pada puncaknya dan nilai rata-rata arus transien sebesar 55012,97 A sedangkan Tegangan Transien mengalami penurunan yang signifikan yang semula 23 kV turun hingga 12,2345 kV dan nilai tegangan transien rata-rata sebesar 15,01 kV. Besarnya arus transien puncak dan tegangan transien terendah dapat dilihat pada tabel 2:

Tabel 2. Hasil Simulasi Arus Transien Puncak dan Tegangan Transien Terendah pada Sisi Primer Transformator Low Voltage Beban Penuh

Unit	Arus Transien (Ampere)	Tegangan Transien (kV)
Unit 5 Suralaya	64334,9	13,1264
Unit 6 Suralaya	64334,9	13,1264
Unit 7 Suralaya	64334,9	13,1264

D. Keadaan Normal Dengan Asahimas dan Poly Prima Off.

Keadaan normal dengan Asahimas dan Poly Prima off, sumber menyuplai tegangan sebesar 23 kV untuk dialirkan ke general transformator untuk dirubah menjadi 500 kV. Dan arus yang mengalir dari generator ke transformator sebesar 3972,8 Ampere dan tegangan sebesar 23 kilo Volt seperti pada gambar 7 dibawah ini:



Gambar 7. Tegangan dan Arus Normal Saat Asahimas dan Poly Prima Off

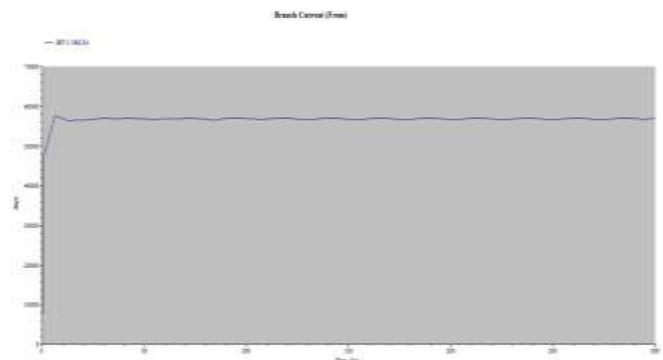
Tegangan dan arus untuk unit 5, unit 6 dan unit 7 dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut :

Tabel 3. Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Keadaan Normal Asahimas dan Poly Prima Off

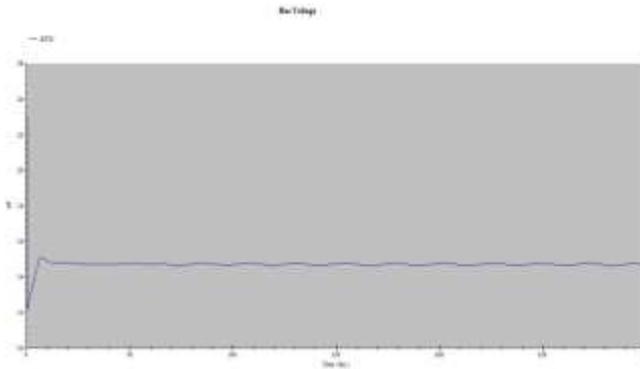
Unit	Tegangan Transformator (kV)	Arus Transformator (Ampere)
Unit 5 Suralaya	23	3972,8
Unit 6 Suralaya	23	3972,8
Unit 7 Suralaya	23	3972,8

D. Keadaan Switching Dengan Asahimas dan Poly Prima Off.

Pada kondisi ini kita anggap terjadi gangguan 3 fasa ke tanah sehingga CB (circuit breaker) 5 dalam keadaan terbuka dengan melepas beban dari Asahimas dan Poly Prima dan proses simulasi selama t = 300 Detik seperti pada standar SPLN. Besarnya arus transien dan tegangan transien pada sisi primer transformator low voltage dapat dilihat pada gambar 8 untuk arus transien dan gambar 9 untuk tegangan transien berikut ini :



Gambar 8. Grafik Simulasi Arus Transien pada Sisi Primer Low Voltage Transformator Unit 5, Unit 6 dan Unit 7 Asahimas dan Poly Prima Off



Gambar 9. Grafik Simulasi Tegangan Transien pada Sisi Primer Low Voltage Transformator Unit 5, Unit 6 dan Unit 7 Asahimas dan Poly Prima Off

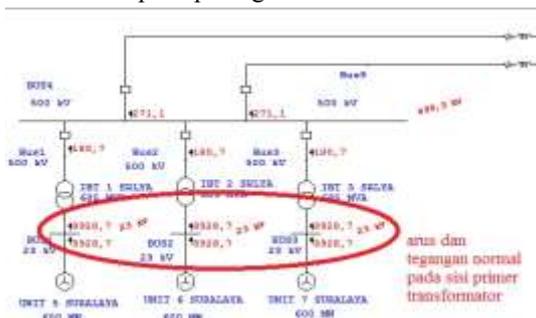
Nilai arus transien yang terjadi pada setiap unit mengalami kenaikan yang tinggi yang mula hanya berada di 3972,8 A sekarang naik hingga menembus 57638,6 A pada puncaknya dan nilai arus transien rata-rata sebesar 54781,53 A sedangkan Tegangan Transien mengalami penurunan yang signifikan yang semula 23 kV turun hingga 12,1501 kV dan nilai tegangan transien rata-rata sebesar 14,98 kV. Besarnya Arus Transien Puncak dan Tegangan Transien Terendah dapat dilihat pada tabel 4 :

Tabel 4. Hasil Simulasi Arus Transien Puncak dan Tegangan Transien Terendah pada Sisi Primer Transformator Low Voltage Asahimas dan Poly Prima Off

Unit	Arus Transien (Ampere)	Tegangan Transien (kV)
Unit 5 Suralaya	57638,6	12,1501
Unit 6 Suralaya	57638,6	12,1501
Unit 7 Suralaya	57638,6	12,1501

E. Keadaan Normal Dengan Asahimas, Poly Prima dan Alindo Off.

Keadaan normal dengan Asahimas, Poly Prima dan Alindo off , sumber menyuplai tegangan sebesar 23 kV untuk dialirkan ke general transformator untuk dirubah menjadi 500 kV . Dan arus yang mengalir dari generator ke transformator sebesar 3928,7 Ampere dan tegangan sebesar 23 kV seperti pada gambar 10 berikut ini:



Gambar 10. Tegangan dan Arus Normal Saat Asahimas, Poly Prima dan Alindo Off

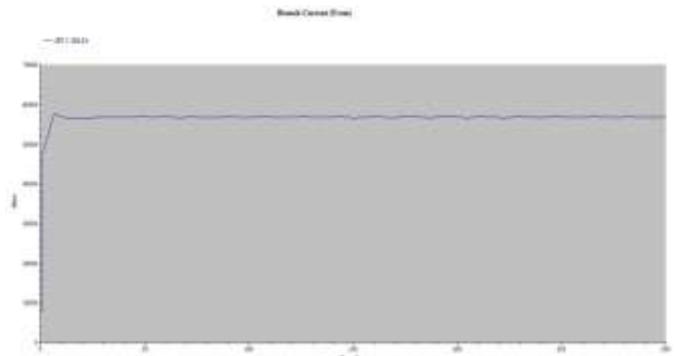
Tegangan dan arus untuk unit 5 , unit 6 dan unit 7 dapat dilihat pada Tabel 5 sebagai berikut :

Tabel 5. Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Keadaan Normal Asahimas, Poly Prima dan Alindo Off

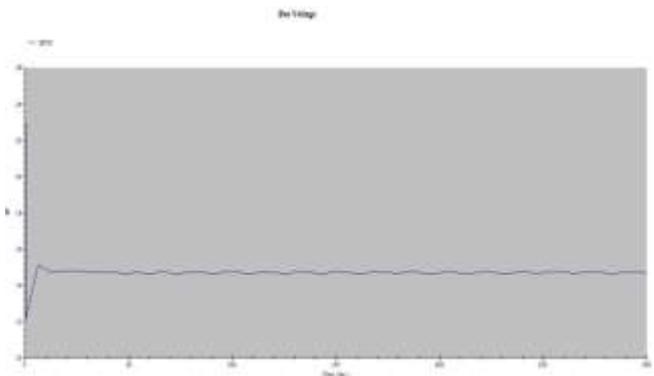
Unit	Tegangan Transformator (kV)	Arus Transformator (Ampere)
Unit 5 Suralaya	23	3928,7
Unit 6 Suralaya	23	3928,7
Unit 7 Suralaya	23	3928,7

F. Keadaan Switching Dengan Asahimas, Poly Prima dan Alindo Off.

Pada kondisi ini kita anggap terjadi gangguan 3 fasa ke tanah sehingga CB (circuit breaker) 5 dalam keadaan terbuka dengan melepas beban dari Asahimas, Poly Prima dan alindo dari jaringan transmisi. Proses simulasi selama t = 300 Detik seperti pada standar SPLN. Besarnya arus transien dan tegangan transien pada sisi primer transformator low voltage dapat dilihat pada gambar 11 untuk arus transien dan 12 untuk tegangan transien berikut ini :



Gambar 11. Grafik Simulasi Arus Transien pada Sisi Primer Low Voltage Transformator Unit 5, Unit 6 dan Unit 7 Asahimas, Poly Prima dan Alindo Off



Gambar 12. Grafik Simulasi Tegangan Transien pada Sisi Primer Low Voltage Transformator Unit 5, Unit 6 dan Unit 7 Asahimas, Poly Prima dan Alindo Off

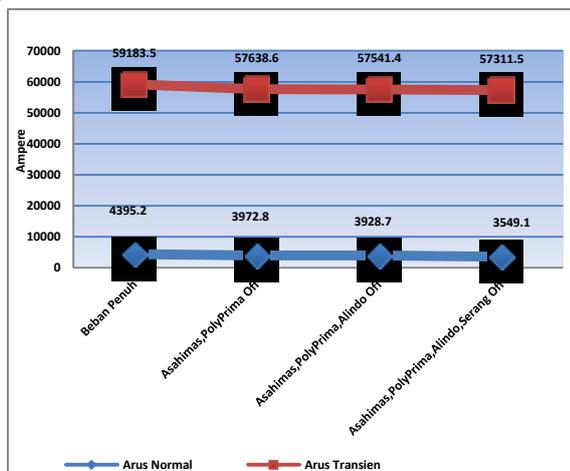
Tabel 8. Hasil Simulasi Arus Transien Puncak dan Tegangan Transien Terendah pada Sisi Primer Transformator Low Voltage Asahimas, Poly Prima, Alindo dan Serang Off

Unit	Arus Transien (Ampere)	Tegangan Transien (kV)
Unit 5 Suralaya	57311,5	12,0637
Unit 6 Suralaya	57311,5	12,0637
Unit 7 Suralaya	57311,5	12,0637

I. Analisis Hasil Simulasi

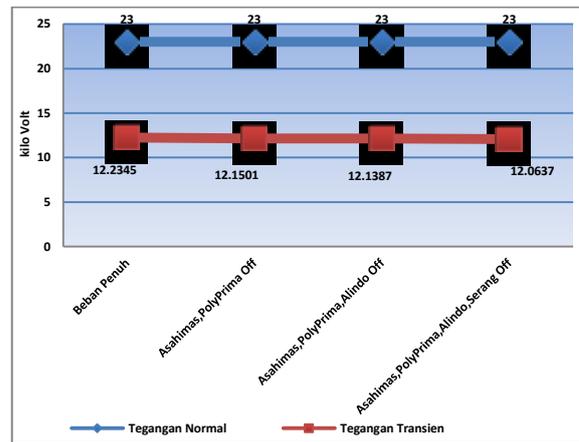
Dari ke empat hasil simulasi diatas kita telah mengetahui besar dari masing-masing kondisi baik arus transien maupun tegangan transien yang timbul. Dari hasil diatas kita ketahui bahwa besarnya arus transien saat proses alih hubung atau *switching* dari *circuit breaker* (CB) berbeda pada setiap kondisi hal ini dikarenakan adanya perbedaan beban dari setiap kondisi. Besarnya arus normal dan arus transien pada setiap kondisi dapat dilihat pada tabel 9. Sedangkan besarnya Tegangan Transien dapat dilihat pada tabel 10.

Berikut ini gambar grafik perbandingan arus normal dengan arus transien yang terjadi dapat dilihat pada gambar 16.



Gambar 16. Grafik Arus Normal dan Arus Transien

Berikut ini gambar grafik perbandingan tegangan normal dengan tegangan transien yang terjadi dapat dilihat pada gambar 17.



Gambar 17. Grafik Tegangan Normal dan Tegangan Transien

Berdasarkan data simulasi dari tabel 9 dan gambar grafik 10 diatas diperoleh besarnya arus transien berbeda-beda dari setiap kondisi. Hal ini disebabkan karena berkurangnya daya beban (MVA) dari masing-masing kondisi yang terjadi. Dari perbedaan itu mengakibatkan daya yang dihasilkan dari generator yang disalurkan ke transformator juga berbeda karena pada sistem ini daya yang dihasilkan berdasarkan besarnya beban yang harus ditanggung oleh transformator. Berdasarkan pada pernyataan diatas besarnya arus transien yang terjadi saat pelepasan beban bergantung pada beban yang di tanggung oleh transformator dan generator, semakin besar daya dari transformator semakin tinggi pula arus transien yang dapat terjadi.

Dengan kata lain daya dari generator dan transformator menyesuaikan dengan kebutuhan sehingga besarnya nilai arus yang berbeda. Besarnya arus transien yang terjadi yang begitu besar dapat mengakibatkan panas yang berlebihan bagi general transformator sebagai penanggung beban terbesar. Panas yang berlebihan ini dapat menyebabkan kegagalan kerja hingga tingkat isolasi.

Besarnya selisih antara arus dalam keadaan normal dan arus transien rata- rata sebesar 93,165 %, hasil ini menunjukkan bahwa besarnya arus transien yang terjadi sangat besar dan dapat mengakibatkan kegagalan kerja bagi transformator terutama untuk kehandalannya dalam menyuplai sistem. Dari tabel hasil simulasi diatas diketahui bahwa nilai arus transien saat proses *switching* atau proses alih hubung rata-rata didapat sebesar 55012,97 A untuk beban penuh, 54781,53 A untuk kondisi Asahimas dan Poly Prima off, 54761,51 A untuk kondisi Asahimas, Poly Prima dan Alindo off dan yang terakhir 54556,76 A untuk kondisi Asahimas, Poly Prima, Alindo dan Serang off. Setelah mengetahui besar arus transien yang terjadi, lalu bandingkan nilai yang telah kita dapat dengan standar SPLN. Namun, sebelum kita membandingkan harus diketahui lebih dahulu nilai dari In dari transformator.

Berikut ini perhitungan mencari besarnya nilai I_n transformator berdasarkan persamaan (2-1):

$$I_n = S / (V * \sqrt{3})$$

$$I_n = 685000 \text{ kVA} / (23 \text{ kV} * \sqrt{3})$$

$$I_n = 17194,997 \text{ A}$$

Setelah mengetahui besarnya nilai I_n , kita bandingkan nilai arus transien yang telah diketahui dengan garis batas SPLN (Standart Perusahaan Listrik Negara) no 64 tahun 1985 Sebesar $3 \times I_n$ selama 300 detik untuk arus transien.

$$\text{SPLN} = 3 \times 17194,997$$

$$\text{SPLN} = 51584,991 \text{ Ampere}$$

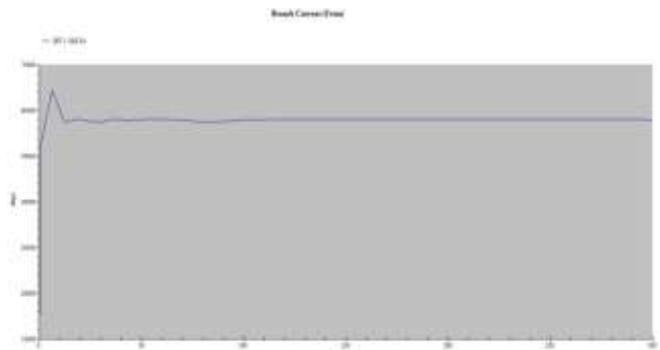
Arus transien yang terjadi saat simulasi berada diatas dari garis batas SPLN no 64 tahun 1985. Arus transien yang terjadi sebesar $\pm 3.199 \times I_n$ untuk beban penuh, $\pm 3.186 \times I_n$ untuk Asahimas dan Poly Prima off, $\pm 3.185 \times I_n$ untuk Asahimas, Poly Prima dan Alindo off, $\pm 3.173 \times I_n$ untuk kondisi Asahimas, Poly Prima, Alindo dan Serang off dari hasil yang didapat tentang pengujian untuk ketahanan transformator berada pada keadaan mengkhawatirkan. Karena dari hasil yang diperoleh menunjukkan besarnya nilai arus transien yang terjadi diatas standar yang berlaku yang jika dibiarkan semakin lama akan menyebabkan kerusakan transformator itu sendiri terutama dalam sisi kehandalan dalam memberikan suplai listrik ke beban. Sedangkan untuk tegangan transien yang terjadi pada sisi primer atau pada posisi *low voltage* mengalami penurunan yang jauh. Selisih rata-rata tegangan transien $\pm 89,355 \%$ atau dengan kata lain tegangan transien mengalami penurunan yang cukup drastis yang semula berada pada 23 kv turun hingga rata-rata 12 kV selama akibat pelepasan beban yang tiba-tiba selama 300 Detik simulasi.

Kesimpulan menunjukkan bahwa besarnya tegangan transien baik pada sisi primer maupun pada sisi sekunder mengalami penurunan yang drastis sehingga berdasarkan pada standar yang ada yakni yang ditetapkan ANSI (*American National Standards Institute*) C57.12 sebesar 1290 kV saat *Switching impulse*. Tegangan transien yang terjadi jauh dibawah standar yang ada dengan kata lain tegangan transien yang terjadi masih aman untuk transformator. Namun, karena terjadi tegangan transien yang menyebabkan tegangan turun secara drastis dapat menyebabkan kerusakan instrument kendali elektronik karena turun tegangan yang menyebabkan peralatan kendali panas.

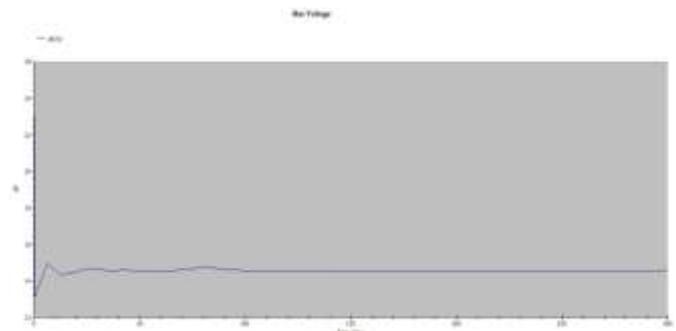
J. Analisa Arus Transien dengan Penambahan Transformator di GITET Cilegon Baru

Pada bahasan kali ini akan disimulasikan adanya penambahan 1 unit transformator pada GITET Cilegon Baru yang akan menyuplai kawasan industri Krakatau

Stell khususnya untuk Krakatau Posco yang sedang dalam tahap pembangunan. GITET Cilegon Baru menambahkan 1 transformator 3 fasa dengan daya yang terpasang sebesar 500 MVA dan beban penanbahan Krakatau Posco sebesar 755,4 MVA. Berikut ini gambar arus dan tegangan transien pada sisi primer transformator saat terjadi pelepasan beban, lihat pada gambar 18 dan gambar 19 :



Gambar 18. Grafik Simulasi Arus Transien Sisi Primer *Low Voltage* Transformator Selama 300 Detik Beban Krakatau Posco



Gambar 19. Grafik Simulasi Tegangan Transien Sisi Primer *Low Voltage* Transformator Selama 300 Detik Beban Krakatau Posco

Nilai arus transien puncak dan tegangan transien terendah transformator selama 300 Detik berada pada nilai 64334,9 A dan 13,1264 kV. Pada sisi primer arus rata-rata mencapai 56287,61 A dan tegangan rata-rata 14,85 kV. Nilai ini jelas sangat besar, mengingat garis batas transformator yang ditetapkan oleh SPLN = 51584,991 A selama 300 Detik. Berikut besarnya arus transien puncak dan tegangan transien terendah, lihat tabel 11.

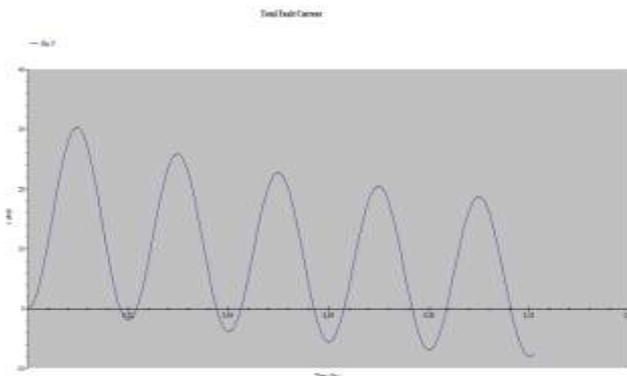
Tabel 11. Hasil Simulasi Arus Transien Puncak dan Tegangan Transien Terendah pada Sisi Primer Transformator *Low Voltage* Penambahan Krakatau Posco

Unit	Arus Transien (Ampere)	Tegangan Transien (kV)
Unit 5 Suralaya	64334,9	13,1264
Unit 6 Suralaya	64334,9	13,1264
Unit 7 Suralaya	64334,9	13,1264

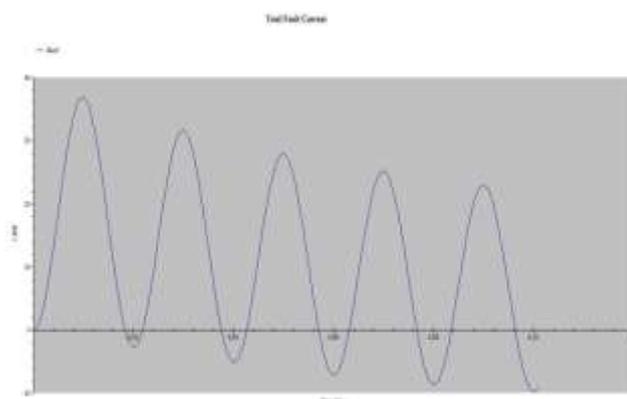
K. Analisa Transien *Short Circuit* pada *Circuit Breaker*

Pada analisa kali ini akan menganalisa besarnya arus transien yang diakibatkan adanya *short circuit* yang terjadi sebagai gangguan yang menyebabkan *circuit breaker* terbuka. Besarnya arus *short circuit* yang terjadi diakibatkan gangguan tiga fasa ke tanah yang terjadi yang menyebabkan *circuit breaker* 5 pada posisi terbuka. Simulasi yang akan dilakukan adalah pada saat keadaan beban penuh dan saat penambahan Krakatau Posco.

Arus transien yang terjadi akan penulis simulasikan untuk melewati *circuit breaker* yang memang telah terpasang dalam gardu induk dengan merek GEC dengan tipe GIS FB2TD dengan kemampuan marking arus sebesar 50 kA, yakni dimana CB mampu untuk mengamankan arus sebesar 50 kA dan tidak rusak. Sedangkan CB memiliki rated ampere 3150 A yakni CB mampu untuk membuka atau menutup dengan aman tanpa menimbulkan gangguan. Berikut ini gambar arus transien *short circuit* pada keadaan beban penuh dan penambahan Krakatau Posco, lihat pada gambar 20 dan gambar 21.



Gambar 20. Arus Transien *Short Circuit* pada Bus 9 Beban Penuh Yang menginduksi CB



Gambar 21. Arus Transien *Short Circuit* pada Bus 9 Penambahan Krakatau Posco Yang menginduksi CB

Nilai arus transien puncak akibat *short circuit* yang menginduksi CB adalah 36,9699 kA pada Saat Penambahan Krakatau Posco dan 30,4027 kA pada saat beban penuh. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa CB masih dalam keadaan aman karena nilai arus transien

yang terjadi masih di bawah kemampuan marking CB yang terpasang.

V. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari analisis dan simulasi arus dan tegangan transien adalah:

1. Besarnya arus transien pada saat kondisi beban penuh puncak sebesar 59183,5 Ampere, saat Asahimas dan PolyPrima off sebesar 57638,6 Ampere, saat Asahimas, PolyPrima dan Alindo off sebesar 57541,4 Ampere, saat Asahimas, PolyPrima, Alindo dan Serang off sebesar 57311,5 Ampere dan Saat penambahan beban posco sebesar 64334,9 Ampere. Dari hasil simulasi berdasarkan standar SPLN no 64 tahun 1985 dari kelima simulasi diperoleh hasil diatas standar yang ditetapkan PLN sebesar 3 x In selama 300 Detik sehingga dapat mengakibatkan kerusakan pada transformator khususnya pada belitannya karena harus menahan arus transien yang sangat besar serta dapat menurunkan kehandalan dari transformator karena dapat mengurugi umur dari transformator.
2. Berdasarkan simulasi tegangan transien yang terjadi pada sisi primer atau pada posisi *low voltage* saat kondisi beban penuh sebesar 12,2345 kV. Saat kondisi Asahimas dan Poly Prima off sebesar 12,1501 kV. Saat Asahimas, Poly Prima dan Alindo off sebesar 12,1387 kV. Saat Asahimas, PolyPrima, Alindo dan Serang off sebesar 12,0637 kV dan penambahan beban Krakatau Posco sebesar 13,1264 kV. Dari kelima simulasi diperoleh hasil masih jauh dari batas ambang yang ditetapkan ANSI (*American National Standards Institute*) C57.12 sebesar 1290 kV saat *Switching* sehingga untuk tegangan transien yang terjadi masih aman untuk transformator. Namun, karena terjadi tegangan transien yang menyebabkan tegangan turun secara drastis dapat menyebabkan kerusakan instrument kendali elektronik karena turun tegangan yang menyebabkan peralatan peralatan kendali panas.
3. Besarnya arus transien yang menginduksi *circuit breaker* (CB) sebesar 30,4027 kA untuk beban penuh dan 36,9699 kA untuk Penambahan beban Krakatau Posco masih jauh dari batas kemampuan marking dari *Circuit breaker* yang telah terpasang yakni sebesar 50 kA, sehingga kondisi CB masih aman.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arfita Yuana Dewi, “ Analisis Arus Transien Pada Sisi Primer Transformator Terhadap Pelepasan Beban Menggunakan Simulasi EMTP “, ITP, Padang, 2006.

-
- [2] Zulfikar Ainur Rohman, “ Analisis Arus Transien Pada Sisi Primer Transformator Terhadap Pelepasan Beban Di Gardu Induk PLTU Gresik- Gardu Iduk Krian Menggunakan Simulasi ATP/ EMTP ”, ITS, Surabaya, 2010.
 - [3] DR. A. Arismunandar, Dr.s.Kuwahara, “ Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid II Saluran Transmisi ”, Pradaya Paramita, Jakarta, 1975.
 - [4] DR. A. Arismunandar, Dr.s.Kuwahara, “ Buku Pegangan Teknik Tenaga Listrik Jilid III Gardu Induk ”, Pradaya Paramita, Jakarta, 1975.
 - [5] Prof.Ir.T.s Hutahuru,M.sc, “ Transmisi Daya Listrik ”, Erlangga, Jakarta, 1993.
 - [6] Abdul Kadir,” Transmisi Tenaga Listrik “, UI Press, Jakarta, 2011.
 - [7] Roger C Dugan,” Electrical Power System Quality Second Edition “, Mc Graw Hill, New York, 2003.
 - [8] _____, ETAP Modul Help.
 - [9] B. Ravindranath, M. Chander, “ Power System Protection and Switchgear “, New Age Internationap (p) Ltd, New Delhi, 1977.
 - [10] _____, “ SPLN No 64 1985 Tentang Garis Batas Ketahanan Transformator “, PT. PLN (Persero), Jakarta, 1985.

Tabel 9. Besarnya Arus Normal dan Arus Transien Puncak Pada Setiap Kondisi

KONDISI	BEBAN (MVA)	ARUS (Ampere)		SELISIH %
		NORMAL	TRANSIEN	
Full Load	1605,077	4395,2	59183,5	92,57
Asahimas,PolyPrima Off	1392,523	3972,8	57638,6	93,11
Asahimas,PolyPrima, Alindo Off	1367,595	3928,7	57541,4	93,17
Asahimas,Polyprima, Alindo, Serang Off	1166,512	3549,1	57311,5	93,81

Tabel 10. Besarnya Tegangan Normal dan Tegangan Transien Pada Setiap Kondisi

KONDISI	BEBAN (MVA)	Tegangan (kV)		SELISIH %
		NORMAL	TRANSIEN	
Full Load	1605,077	23	12,2345	87,99
Asahimas,PolyPrima Off	1392,523	23	12,1501	89,2988
Asahimas,PolyPrima, Alindo Off	1367,595	23	12,1387	89,4766
Asahimas,Polyprima, Alindo, Serang Off	1166,512	23	12,0637	90,6546

Estimasi Kanal Akustik Bawah Air Untuk Perairan Dangkal Menggunakan Metode Least Square (LS) dan Minimum Mean Square Error (MMSE)

Mardawia M. Parenreng¹, Wirawan², Tri Budi Santoso³
 Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, ITS
 Jl. Arif Rahman Hakim, Surabaya 60111

¹mmparenreng@gmail.com, ²wirawan@ee.its.ac.id, ³tribudi@eepis-its.edu

Abstrak – Dalam beberapa tahun terakhir, sistem komunikasi akustik bawah air banyak dikembangkan oleh beberapa peneliti. Besarnya tantangan yang dihadapi membuat para peneliti semakin tertarik untuk mengembangkan penelitian dibidang ini. Kanal bawah air merupakan media komunikasi yang sulit karena adanya *attenuasi*, *absorption*, dan *multipath* yang disebabkan oleh gerakan gelombang air setiap saat. Untuk perairan dangkal, *multipath* disebabkan adanya pantulan dari permukaan dan dasar laut. Kebutuhan pengiriman data cepat dengan *bandwidth* terbatas menjadikan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* sebagai solusi untuk komunikasi transmisi tinggi dengan modulasi menggunakan *Binary Phase-Shift Keying (BPSK)*. Estimasi kanal bertujuan untuk mengetahui karakteristik respon impuls kanal propagasi dengan mengirimkan pilot simbol. Pada estimasi kanal menggunakan metode *Least Square (LS)* nilai *Mean Square Error (MSE)* yang diperoleh cenderung lebih besar dari metode estimasi kanal menggunakan metode *Minimum Mean Square (MMSE)*. Hasil kinerja estimasi kanal berdasarkan perhitungan *Bit Error Rate (BER)* untuk estimasi kanal menggunakan metode *LS* dan metode *MMSE* tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan yaitu berselisih satu *SNR* untuk setiap metode estimasi kanal yang digunakan.

Kata Kunci : Akustik bawah air, *BPSK*, Estimasi kanal, *OFDM*

Abstrak – In recent years, underwater acoustic communication system has been developed by a few researchers. The amount of the challenges faced in underwater communication, make the researchers are increasingly interested to developing this research. Underwater channel is a medium communication that is difficult because of the *attenuation*, *absorption*, and *multipath* caused by the wave motion of water at all times. For shallow waters, due to *multipath* reflections from the surface and the seabed. The need fast transmission data with limited *bandwidth* make *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* as a solution for high transmission communication with modulation using a *Binary Phase-Shift Keying (BPSK)*. Channel estimation aims to find out the characteristics of the propagation channel impulse response by sending pilot symbols. On channel estimation using the method of *Least Square (LS)*, the value of the *Mean Square Error (MSE)* obtained by tend to be larger than channel estimation method using the *Minimum Mean Square (MMSE)*. The results of the performance from channel estimation based on the calculation of *Bit Error Rate (BER)* for channel estimation using *LS* and *MMSE* method showed no significant difference is disputing the *SNR* for each channel estimation methods are used.

Keywords: Underwater acoustics, *BPSK*, channel estimation, *OFDM*

I. PENDAHULUAN

Komunikasi akustik bawah air merupakan teknologi yang dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi seperti penelitian bidang maritim, oseanografi, eksplorasi minyak di daerah lepas pantai dan sistem pertahanan. Fitur-fitur dan arsitektur jaringan sensor bawah air, desain jaringan, gambaran kanal akustik kondisi lingkungan dasar laut telah di sajikan dalam [1]. Komunikasi akustik bawah air menggunakan gelombang suara atau gelombang akustik yang dapat mencapai jarak lebih jauh dari gelombang komunikasi lain tetapi memiliki kecepatan dan *bandwidth* yang terbatas [2].

Sistem komunikasi akustik bawah air merupakan media komunikasi yang sulit, karena adanya *attenuation*, lintas jamak atau *multipath*, *absorption*, dan *delay spread*.

Propagasi akustik di dalam air bekerja dengan baik pada frekuensi rendah yaitu 10–15 KHz, dan dengan kecepatan 1500 m/s [3]. Untuk perairan dangkal dengan kondisi lingkungan yang sangat kompleks, *bandwidth* yang tersedia terbatas tergantung dari jarak dan frekuensi. Desain dan simulasi membutuhkan pemodelan kanal yang akurat, dengan menggunakan metode *ray teory* untuk memberikan gambaran deterministik propagasi *multipath* dengan menambahkan deskripsi statistik dan variasi kanal secara acak terhadap waktu [4]&[5]. Sifat kanal propagasi akustik bawah air dengan pendekatan statistik berdasarkan data hasil pengukuran dibahas pada paper [6]. Untuk kondisi kanal akustik bawah air dengan kedalaman beragam, mulai dari kondisi ekstrim sangat dangkal dan lingkungan berderau untuk daerah muara

sungai dan pelabuhan sampai kondisi relatif dalam telah dibahas pada paper [7].

Sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) adalah teknik transmisi yang memungkinkan pengiriman data kecepatan tinggi dengan membagi sinyal informasi kedalam sub-sub kanal yang berbeda, tidak saling interferensi atau bersifat *orthogonal* satu sama lain. Keunggulan sistem OFDM yaitu mampu mengatasi *delay spread* dengan menggunakan *guard interval*, mampu mengubah *frequency selective* menjadi *frequency non-selective* dan relative mudah diimplementasikan [8]. Kriteria desain dan prosedur analisis untuk sistem OFDM komunikasi bawah air dibahas pada paper [9]. Namun, OFDM memiliki tantangan untuk kanal bawah air, yaitu memiliki *frequency selective* tinggi dengan *delay spread* yang lebar sehingga dibutuhkan estimasi kanal untuk mendapatkan kembali simbol yang ditransmisikan, dengan mengirimkan *training* simbol berupa pilot simbol yang sebelumnya telah diketahui oleh pemancar dan penerima [10]. *Least Square* (LS) dan *Minimum Mean Square Error* (MMSE) adalah dua Metode yang umum digunakan untuk estimasi kanal dengan memanfaatkan simbol pilot. LS atau kuadrat terkecil dari perbedaan sinyal terkirim dengan sinyal terima. MMSE didasari pada meminimalisasian nilai *Mean Square Error* (MSE).

Pada paper ini akan disajikan hasil simulasi OFDM untuk estimasi kanal menggunakan metode LS dan metode MMSE untuk kanal *multipath* dengan pemodelan kanal menggunakan metode *ray tracing*. Analisa dilakukan dengan melihat nilai *Bit Error Rate* (BER) yang dihasilkan dan nilai *Mean Square Error* (MSE). Penjelasan mengenai pemodelan sistem akan dibahas pada bagian II. Pada bagian III berisi tentang hasil simulasi dan analisa. Kesimpulan dibahas pada bagian IV.

II. DESAIN, DAN IMPLEMENTASI

A. Rancangan Penelitian

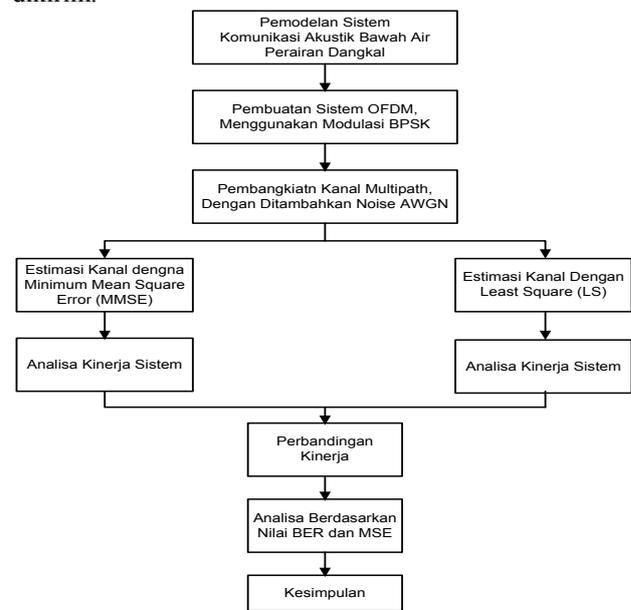
Pada paper ini, langkah yang dilakukan yaitu pemodelan sistem komunikasi akustik bawah air untuk perairan dangkal, sistem transmisi menggunakan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), dengan modulasi *Binary Phase-Shift Keying* (BPSK). Dilakukan estimasi kanal *Least Square* (LS), dan estimasi kanal *Minimum Mean Square Error* (MMSE). Gambar 1 menunjukkan blok diagram langkah-langkah pembuatan simulasi.

Dalam pembuatan sistem OFDM pada komunikasi akustik bawah air untuk perairan dangkal diperlukan beberapa parameter sehingga sistem dapat dijalankan. Tabel 1 merupakan parameter sistem OFDM akustik bawah air yang digunakan dalam pembuatan simulasi ini.

B. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Pada bagian ini, membahas mengenai kinerja sistem OFDM pada komunikasi akustik bawah air untuk perairan dangkal dengan menggunakan modulasi BPSK. Kinerja tersebut ditunjukkan dengan nilai probabilitas kesalahan *Bit Error Rate* (BER) dan *Mean Square Error* (MSE). Gambar 2 adalah blok diagram sistem OFDM pada komunikasi akustik bawah air untuk perairan dangkal.

Sistem kerja OFDM dapat dijelaskan sebagai berikut, data input modulasi sebanyak 240 data subcarrier, dari data 240 diberikan pilot sebanyak 16 sehingga total data menjadi 256 sudah termasuk simbol pilot. Kemudian data tersebut diaplikasikan kedalam IFFT yang berukuran 256 untuk pembuatan simbol OFDM. Penggunaan IFFT ini memungkinkan pengalokasian frekuensi yang saling tegak lurus (*orthogonal*) dan mengubah domain frekuensi menjadi domain waktu. Selanjutnya data ditambahkan *cyclic prefix*. Setelah penambahan *cyclic prefix* berikutnya dikonversi menjadi serial oleh blok *parallel to serial* dan dikirim.



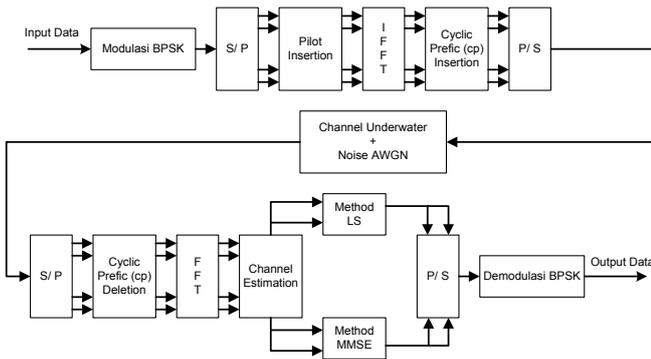
Gambar 1. Blok diagram langkah-langkah pembuatan simulasi

Tabel 1. Parameter sistem OFDM akustik bawah air

Bandwidth	5 KHz
Modulasi	BPSK
Jumlah subcarrier	256
Jumlah IFFT/FFT	256
Jumlah Bit	10000
Jumlah pilot	16
Guard Interval T_g	16, 1, 0

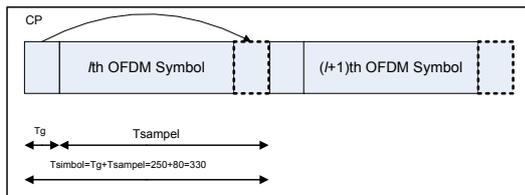
Pada proses pengiriman, disimulasikan menggunakan kanal *multipath* dengan pemodelan kanal menggunakan metode *ray tracing* dengan kondisi kanal dipengaruhi oleh *noise* AWGN.

Di sisi penerima dilakukan proses berkebalikan dengan proses di pengirim yaitu sinyal yang diterima diubah lagi kedalam bentuk *serial to parallel*, menghapus *cyclic prefix*, proses FFT dan selanjutnya estimasi kanal dengan estimasi kanal ideal, estimasi kanal dengan metode LS dan estimasi kanal dengan metode MMSE, menghapus pilot simbol, *parallel to serial* dan terakhir sinyal didemodulasi untuk memperoleh kembali bit informasi yang telah dikirimkan sebelumnya.



Gambar 2. Blok diagram sistem OFDM

Untuk mengatasi masalah *delay multipath* pada OFDM digunakan suatu *guard interval* yaitu *cyclic prefix*. Penggunaan *cyclic prefix* adalah sebagai syarat agar tidak terjadi ISI. Untuk simulasi estimasi kanal akustik perairan dangkal digunakan *cyclic prefix* sebanyak 16ms yang sama dengan 80 simbol OFDM. Proses penambahan *cyclic prefix* dilakukan dengan mengopikan sebanyak 80 simbol terakhir dari simbol OFDM dan dipindahkan keawal dari simbol OFDM sehingga total simbol dalam satu blok OFDM menjadi 336 simbol.

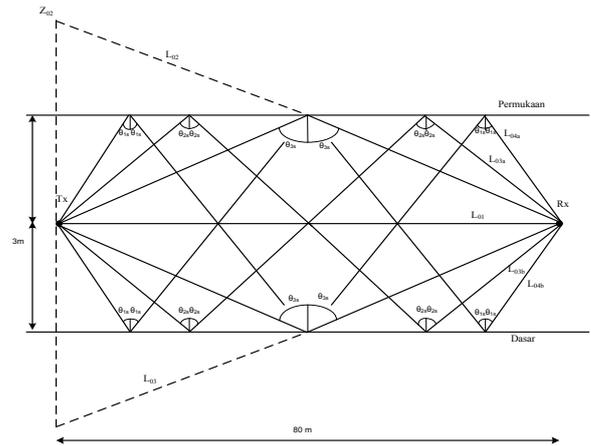


Gambar 3. Penggambaran Cyclic Prefix (CP)

C. Pembangkitan Kanal Multipath

Dalam mensimulasikan kanal akustik bawah air untuk perairan dangkal dengan kondisi kanal *multipath*, pemodelan kanal menggunakan metode *ray tracing* seperti yang ditunjukkan Gambar 4. Maka dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan delay masing-masing lintasan pada kanal akustik bawah air untuk perairan dangkal, yang direpresentasikan pada kolam pengukuran, kondisi air tawar dengan kedalaman 3m (sangat dangkal), pada jarak pemancar dan penerima 80m.

Umumnya jumlah bayangan atau sumber pada pemancar virtual memiliki nilai tidak berhingga, dan setiap bayangan memiliki perulangan. Dari lokasi pemancar bayangan, dihasilkan suatu lintasan dengan panjang beragam. Lintasan langsung dari pemancar (sumber suara) ke penerima (hidrophone), LOS ditandai sebagai L_{01} dan berjarak 80m. Posisi sumber bayangan yang dihasilkan melalui image method (metode bayangan) adalah Z_{02}, Z_{03}, Z_{04} .



Gambar 4. Model lintas jamak ray tracing untuk perairan dangkal

$$\begin{aligned} Z_{02} &= 2(2 - 1)3 = 6m \\ Z_{03} &= 2(3 - 1)3 = 12m \\ Z_{04} &= 2(4 - 1)3 = 18m \\ Z_{05} &= 2(5 - 1)3 = 24m \end{aligned} \tag{1}$$

Pada bagian atas memberikan berkas perambatan sinyal L_{02}, L_{03}, L_{04} . Dengan persamaan yang sama pada kasus *ray tracing* akan memberikan nilai-nilai:

$$\begin{aligned} L_{02} &= \sqrt{Z_{02}^2 + D^2} = \sqrt{6^2 + 80^2} = 80.22m \\ L_{03} &= \sqrt{Z_{03}^2 + D^2} = \sqrt{12^2 + 80^2} = 80.89m \\ L_{04} &= \sqrt{Z_{04}^2 + D^2} = \sqrt{18^2 + 80^2} = 82.00m \\ L_{05} &= \sqrt{Z_{05}^2 + D^2} = \sqrt{24^2 + 80^2} = 83.52m \end{aligned} \tag{2}$$

Sinyal yang sampai pada penerima telah mengalami pelemahan sesuai dengan jarak propagasi yang ditempuh. Jika jarak tempuh dinyatakan dengan L, dan kecepatan perambatan sinyal akustik dalam air adalah c (c = 1495 m/s untuk air tawar), maka besarnya waktu tempuh dapat dihitung dengan persamaan $t_L = L/c$. Tabel 3 menunjukkan jarak lintasan yang terbentuk dengan metode *ray tracing*.

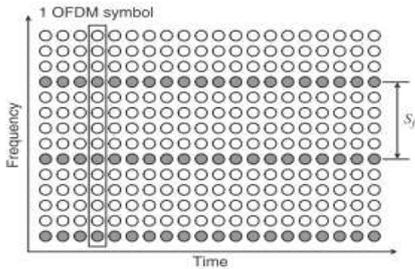
Tabel 3. Jarak lintasan terbentuk dengan ray tracing pada Tx-Rx = 80m

Lintasan ke n	L_{80} (M)	T (ms)	Power norm (dB)
1	80	53.33	-18.57
2	80.22	53.48	-13.99
3	80.89	53.93	-7.23
4	82.00	54.67	-2.43
5	83.53	55.68	0.00

D. Estimasi Kanal

Estimasi kanal merupakan suatu teknik yang digunakan untuk mengetahui respon impuls dari suatu

kanal terhadap sinyal terkirim dengan mengirimkan training simbol berupa pilot simbol yang sebelumnya telah diketahui oleh *transmitter* dan *receiver*, yang selanjutnya dikirim bersamaan dengan sinyal informasi. Menggunakan pola pengaturan pilot tipe comb yaitu dengan memasukkan simbol pilot secara periodik pada setiap lokasi *subcarrier*. penyisipan dilakukan dalam domain frekuensi, dan pengiriman dilakukan dengan menentukan *subcarrier* mana yang akan digunakan untuk mengirimkan pilot. Penyusunan pilot tipe comb ditampilkan pada gambar berikut [11]:



Gambar 5. Pola penyusunan pilot tipe comb

1. Estimasi Kanalk dengan Metode Least Square (LS)

Metode estimasi kanal yang digunakan dengan memanfaatkan simbol pilot yaitu dengan estimasi kanal menggunakan metode LS dan metode MMSE, diawali dengan mendapatkan nilai estimasi kanal, \hat{H} dengan cara meminimalkan nilai *cost function* seperti berikut:

$$J(\hat{H}) = \|Y - X\hat{H}\|^2 = (Y - X\hat{H})^H (Y - X\hat{H}) \tag{3}$$

$$= Y^H Y - Y^H X\hat{H} - \hat{H}^H X^H Y + \hat{H}^H X^H X\hat{H}$$

Penurunan persamaan untuk mendapatkan \hat{H} menjadi nol:

$$\frac{\partial J(\hat{H})}{\partial \hat{H}} = -2(X^H Y)^* + 2(X^H X\hat{H})^* = 0 \tag{4}$$

Sehingga $X^H X\hat{H} = X^H Y$, akan memberikan penyelesaian persamaan pada estimasi kanal LS seperti berikut:

$$\hat{H}_{LS} = (X^H X)^{-1} X^H Y = X^{-1} Y \tag{5}$$

Selanjutnya kita tetapkan setiap \hat{H}_{LS} sebagai $\hat{H}[k]_{LS}$ dimana $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Matrik X diasumsikan diagonal dalam hal ini tidak terjadi ICI. Maka estimasi kanal LS pada setiap subcarrier dapat ditulis:

$$\hat{H}_{LS}[k] = \frac{Y[k]}{X[k]}, \text{ dimana } k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \tag{6}$$

Nilai mean square error (MSE) pada estimasi kanal LS diberikan sebagai berikut:

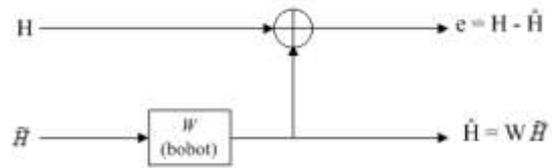
$$MSE_{LS} = E\{(H - \hat{H}_{LS})^H (H - \hat{H}_{LS})\} = E\{(H - X^{-1}Y)^H (H - X^{-1}Y)\} \tag{7}$$

$$= E\{(X^{-1}Z)^H (X^{-1}Z)\} = E\{Z^H (ZZ^H)^{-1} Z\}$$

$$= \frac{\sigma_z^2}{\sigma_z^2}$$

2. Estimasi Kanal dengan Metode Minimum Means Square Error (MMSE)

Secara sederhana metode estimasi kanal dengan MMSE bisa digambarkan dengan diagram blok sebagai berikut:



Gambar 6. Estimasi kanal dengan MMSE

Berdasarkan gambar tersebut, nilai mean square error (MSE) pada nilai estimasi kanal \hat{H} diberikan sebagai

$$J(\hat{H}) = E\{\|e\|^2\} = E\{\|H - \hat{H}\|^2\} \tag{8}$$

Tujuan estimasi MMSE adalah untuk mendapatkan nilai estimasi yang lebih baik, dalam hal ini adalah pemilihan bobot W yang tepat. Sehingga persamaan diatas perlu diminimisasi.

Dengan memanfaatkan sifat orthogonalisasi pada estimasi vektor error $e = H - \tilde{H}$ yang akan orthogonal terhadap \tilde{H} , sehingga:

$$E\{e\tilde{H}^H\} = E\{(H - \tilde{H})\tilde{H}^H\}$$

$$= E\{(H - W\tilde{H})\tilde{H}^H\}$$

$$= E\{H\tilde{H}^H\} - WE\{\tilde{H}\tilde{H}^H\} \tag{9}$$

$$= R_{H\tilde{H}} - WR_{\tilde{H}\tilde{H}} = 0$$

Dalam hal ini \tilde{H} adalah estimasi kanal dari *least square* (LS) yang diberikan sebagai $\tilde{H} = X^{-1}Y = H + X^{-1}Z$ nilai bobot W diperoleh dengan sebagai $W = R_{H\tilde{H}} R_{\tilde{H}\tilde{H}}^{-1}$ dengan $R_{\tilde{H}\tilde{H}}$ adalah matrik autokorelasi pada matrik \tilde{H} , dan diberikan sebagai:

$$R_{\tilde{H}\tilde{H}} = E\{\tilde{H}\tilde{H}^H\} = E\{X^{-1}Y(X^{-1}Y)^H\} = E\{(H + X^{-1}Z)(H + X^{-1}Z)^H\}$$

$$= E\{HH^H + X^{-1}ZH^H + HZ^H(X^{-1})^H + X^{-1}ZZ^H(X^{-1})^H\}$$

$$= E\{HH^H\} + E\{X^{-1}ZZ^H(X^{-1})^H\}$$

$$= E\{HH^H\} + \frac{\sigma_z^2}{\sigma_z^2} I \tag{10}$$

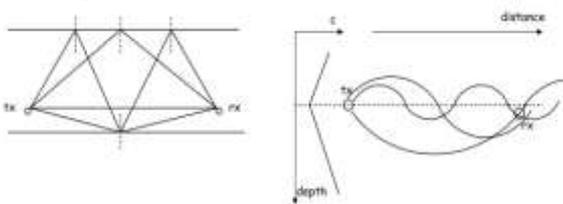
Sementara $R_{H\tilde{H}}$ merupakan matrik korelasi silang antara vektor kanal yang sebenarnya dengan vektor kanal temporer di dalam domain frekuensi. Selanjutnya estimasi kanal dengan MMSE dapat diberikan sebagai berikut:

$$\hat{H} = W\tilde{H} = R_{HH} R_{HH}^{-1} \tilde{H} = R_{HH} \begin{pmatrix} R_{HH} & \frac{\sigma_z^2}{2} I \end{pmatrix} \tilde{H} \quad (11)$$

E. Karakteristik Kanal Akustik Bawah Air

Komunikasi akustik bawah air memiliki karakteristik yang unik, gerakan air yang tidak pernah berhenti, kondisi yang cepat berubah secara drastis tergantung pada lokasi, waktu, dan cuaca. Oleh karena itu kinerja pada komunikasi underwater sulit diprediksi, dan memiliki batasan-batasan tertentu yang mempengaruhi kinerja kanal.

Pada kanal underwater sendiri dibedakan menjadi 2 jenis yaitu Deep water dan Shallow water. Pada Shallow water tingkat loss nya lebih sedikit daripada Deep Water. Pada Shallow water, multipath terjadi karena sinyal memantul kembali ketika mengenai permukaan air dan batas ke Deep water. Sedangkan pada Deep water karena adanya tekanan air pada deep water sangat tinggi sehingga menyebabkan transmisi sinyal akan terus dipantulkan seolah-olah sinyal akan kelihatan terus membengkok.



Gambar 7. Propagasi akustik bawah air (a) Shallow water, (b) Deep water

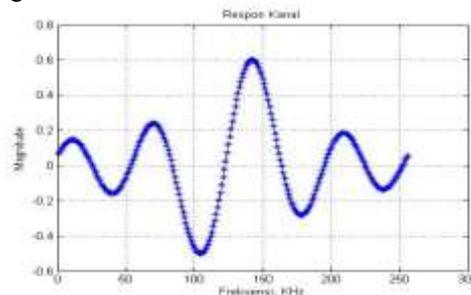
Dalam melakukan simulasi untuk kanal bawah air, multipath terjadi karena channel geometry, signal frequency, dan sound speed profile, sedangkan sound speed naik seiring bertambahnya tingkat salinitas, temperature, dan tekanan yang terjadi. Jadi sifat-sifat air yang terdiri dari salinitas dan temperatur akan menyebabkan pengaruh banyak tidaknya multipath yang terjadi. Untuk perairan dangkal tingkat salinity lebih tinggi dibanding pada deep water begitu juga pada tingkat temperatur untuk perairan dangkal lebih tinggi dari pada deep water, hal ini disebabkan karena pada perairan dangkal lebih banyak terkena sinar matahari dan lebih banyak pergerakan air. Pada penelitian ini, kondisi kanal multipath direpresentasikan dengan menggunakan kolam pengukuran berdimensi 80m x 3m x 3m.

Tabel 4. Tabel Perbedaan pada sinyal akustik, radio, dan optic untuk Underwater Sensor Network pada propagasi underwater [12].

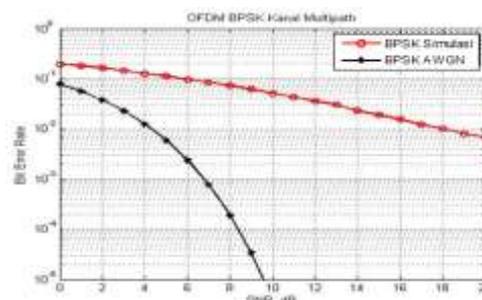
Carriers parameter	Akustik	Radio	Optik
Pelemahan	Rendah	Tinggi	Tinggi
Jarak efektif	~km	~10m	~10-100m
Delay	Tinggi	Rendah	Rendah
Bandwidth	~kHz	~MHz	~10-150MHz
Data rate	Up to 100kbps	Up to 10Mbps	Up to 1Gbps
Keterbatasan	- Bandwidth terbatas	Power terbatas	Lingkungan terbatas
	- interferensi terbatas		

III. HASIL SIMULASI

Simulasi sistem OFDM kanal akustik bawah air untuk perairan dangkal, dengan dipengaruhi delay berdasarkan perhitungan menggunakan metode ray tracing, kondisi kanal multipath dan ditambahkan noise AWGN. Grafik respon kanal akustik bawah air untuk perairan dangkal ditunjukkan pada Gambar 8. Untuk grafik perbandingan BER berdasarkan hasil simulasi dan untuk kondisi kanal AWGN ditunjukkan Gambar 9. Jumlah lintasan sebanyak 5tap yang terdiri dari lintasan langsung atau Line of Sight (LOS) dan lintasan tidak langsung atau indirect.

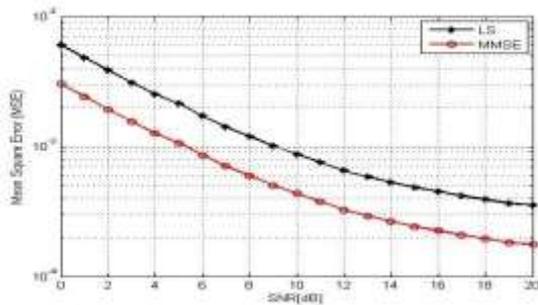


Gambar 8. Grafik respon impulse



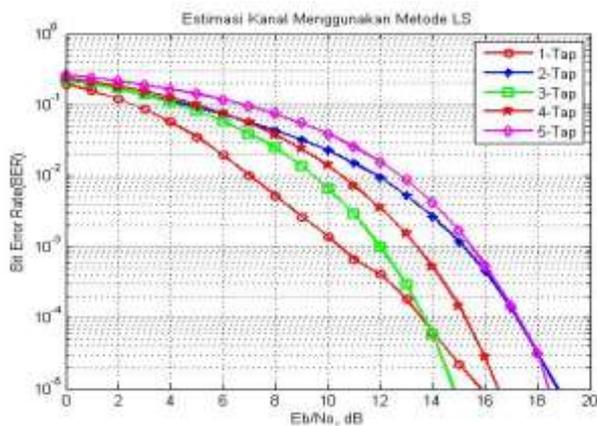
Gambar 9. Kinerja sistem OFDM untuk kanal multipath

Proses estimasi kanal dilakukan dengan memanfaatkan training symbol berupa pilot tones yang ditransmisikan bersamaan dengan symbol-symbol data. Jumlah pilot yang digunakan sebanyak 16, dengan pola penyisipan menggunakan tipe comb. Penilaian keakuratan estimasi kanal dilakukan dengan perhitungan rata-rata kuadrat error, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Dengan jumlah lintasan sebanyak 5 tap.

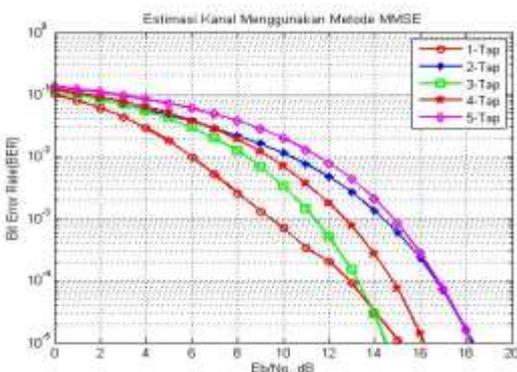


Gambar 10. Hasil simulasi kinerja OFDM kanal akustik bawah air berdasarkan perhitungan MSE

Analisa perhitungan BER berdasarkan hasil estimasi kanal ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11. Estimasi kanal dilakukan dengan membandingkan estimasi LS dan estimasi MMSE. Nilai BER dibandingkan untuk setiap Tap dengan jumlah Tap sebanyak 5Tap.



Gambar 11. Perbandingan BER masing-masing Tap untuk estimasi kanal LS



Gambar 12. Perbandingan BER masing-masing Tap untuk estimasi kanal MMSE

IV. KESIMPULAN

1. Sistem komunikasi akustik bawah air merupakan sistem komunikasi yang sulit karena adanya *attenuasi*, *multipath*, *absorbsi*, dan *delay spread*. *Bandwidth* yang tersedia kecil yaitu 5KHz dan bekerja dengan baik pada frekuensi rendah yaitu 10-15KHz.

2. Kondisi kanal *multipath* merupakan kondisi yang merepresentasikan kondisi real dari kanal akustik bawah air, karena adanya gerakan gelombang air setiap saat yang menyebabkan terjadinya banyak pantulan sehingga akan selalu terjadi error karena banyaknya lintasan yang dilalui oleh informasi sebelum sampai ke penerima
3. Estimasi kanal pada sistem OFDM dilakukan dengan memanfaatkan training simbol berupa pilot tone, yang diharapkan mampu memberikan kinerja yang bagus pada penerima dalam memprediksi kanal propagasi dengan mengetahui kuadrat error dari estimasi kanal menggunakan perhitungan MSE. Dimana nilai MSE yang muncul berbanding terbalik dengan kenaikan SNR Hasil proses estimasi kanal berdasarkan perhitungan BER. Dimana Penambahan jumlah Tap akan menurunkan kinerja sistem. Semakin kecil jumlah Tap yang digunakan maka semakin kecil nilai BER yang diperoleh.

Daftar Pustaka

- [1] I.F.Alkydiz, D. Pompili, dan T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Network: Research Challenges", *Elsevier, Ad Hoc Network*, 2005.
- [2] S. Ismail, dan D. P. Kurniadi, "Sistem Komunikasi Menggunakan Gelombang Akustik dengan Memanfaatkan Bawah Air sebagai Medium Propagasi", *Jurnal Elektronika*, No.1, Vol.9, juni 2009.
- [3] M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communications: Design Considerations on the Physical Layer", *Proc. of Wireless on Demand System and Service 2008*, Wons 2008.
- [4] F. D. Rango, F. Veltri, dan P. Fazio, "A Multipath Fading Channel Model for Underwater Shallow Acoustic Communications", *Proc. of Communication (ICC), 2012 IEEE International Conference On*, 10-15 June 2012.
- [5] A. Radosevic, J. G. Proakis, M. Stojanovic, "Statistical Characterization and Capacity of Shallow Water Acoustic Channel", *Proc. of IEEE Oceans '09 Conference*, Bremen, Germany, May 2009.
- [6] P. Qarabaqi, dan M. Stojanovic, "Statistical Modeling of a Shallow Water Acoustic Communication Channel", *Proc. of Underwater Acoustic Measurements Conference*, Nafplion, Greece, June 2009.
- [7] B. Borowski, "Characterization of a Very Shallow Water Acoustic Communication Channels", *Proc. of Oceans 2009*, MTS/ IEEE Biloxi-Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges.
- [8] K. Tu, D. Fertoni, T. M. Duman, dan P. Hursky, "Mitigation of Intercarrier Interference for OFDM Over Time Varying Underwater Acoustic Channel", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol 36, No. 2, April 2011.
- [9] B. C. Kim, dan I. T. Lu, "Parameter Study of OFDM Underwater Communications System", *Proc. of Oceans 2000 MTS/ IEEE Conference and Exhibition*, Vol 2, Sept 2000.

- [10] W. Yonggang, “ Underwater Acoustic Channel Estimation for Pilot Based OFDM”, *Proc. of Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC), 2011 IEEE International Conference On*, 14-16 Sept 2011.
- [11] Y.S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang dan C. G. Kang, “MIMO-OFDM Wireless Communication with Matlab”, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, *IEEE Press*, 2010.
- [19] M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communications," in *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, John G. Webster, Ed., John Wiley & Sons, 1999, Vol.22, pp.688-698.

Biodata Penulis

Mardawia M. Parenreng menyelesaikan studi D4 di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) tahun 2011, setelah lulus melanjutkan studi S2 di Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Program Studi Telekomunikasi Multimedia, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.

Studi Pemanfaatan Arus Laut Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif di Wilayah Selat Sunda

Budi Supian, Suhendar, Rian Fahrizal
Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon, Indonesia
Jl. Jenderal Sudirman km 03, Cilegon, Banten

Abstrak – Sumber energi untuk pembangkit listrik yang berasal dari fosil semakin menipis membuat manusia harus mencari sumber energi alternatif seperti sumber energi alternatif arus laut. Salah satu sumber energi alternatif arus laut berada di wilayah selat Sunda, dengan kecepatan arus laut rata-rata per bulan sebesar 0,66-1,10m/s selama satu tahun. Besarnya potensi ini dapat dimanfaatkan pada skema PLTAL (Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut) sebagai pembangkit listrik tambahan untuk meningkatkan produksi listrik di wilayah selat Sunda. Energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin untuk kecepatan arus laut minimum 0,66m/s sebesar 5,89kW dan maksimum 1,10m/s sebesar 27,28kW, sedangkan energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin untuk kecepatan arus laut minimum 0,66m/s sebesar 2,06kW dan maksimum 1,10m/s sebesar 9,54kW. Besarnya biaya pembangkitan sebesar Rp.452/kWh dan harga jual listrik sebesar Rp.519/kWh, dengan jumlah pendapatan pertahun didapat sebesar Rp.58.365.567,36/tahun. Hasil studi kelayakan secara finansial diperoleh PLTAL di wilayah selat Sunda cukup layak dengan ROR sebesar 22,88%, dan biaya modal investasi dapat kembali dalam waktu 5 tahun.

Kata Kunci : Energi Alternatif, PLTAL, Biaya Investasi

Abstract – The energy source for electricity generation from fossil dwindling make humans must look for alternative energy sources alternative energy sources such as ocean currents. One source of alternative energy in ocean currents in the area of the Sunda Strait, with the speed of ocean currents on average per month of 0.66 to 1.10 m/s for one year. The magnitude of this potential can be utilized in the scheme PLTAL (Sea Power Flow) as an additional power plants to increase electricity production in the Sunda Strait region . The electrical energy generated without the constant value for the speed of the turbine efficiency of ocean currents minimum of 0.66 m/s at 5.89 kW and a maximum of 1.10 m/s at 27.28 kW, while the electrical energy generated by the turbine efficiency constant value for the minimum speed of ocean currents 0.66 m/s of 2.06 kW and a maximum of 1.10 m/s at 9.54 kW. The amount of Rp.452/kWh generation cost and price of electricity at Rp.519/kWh , the number of annual revenue obtained by Rp.58.365.567, 36/tahun. The results of the feasibility study was financially obtained PLTAL in the Sunda Strait region is quite feasible with ROR of 22.88 %, and the cost of capital investment can be returned within 5 years.

Keywords : Alternative Energy, PLTAL, Investment Costs

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan kebutuhan pokok masyarakat dan menjadi penunjang di segala aspek kehidupan dan pembangunan nasional, termasuk peningkatan taraf hidup. Ketergantungan masyarakat terhadap energi listrik semakin tinggi, seiring berjalannya waktu dan berkembangnya teknologi. Di sisi lain permasalahan yang muncul adalah sumber energi di Indonesia selama ini banyak mempergunakan hasil konversi dari energi fosil seperti minyak bumi, batubara dan gas sebagai sumber energi utamanya. Seperti diketahui, bahwa sumber energi yang berasal dari fosil ini semakin menipis persediaannya, sehingga semakin lama semakin berkurang dan tidak dapat diperbaharui lagi. Untuk mengatasi menipisnya persediaan energi listrik tersebut, diperlukan sebuah terobosan untuk memanfaatkan energi lain, dengan mengembangkan sumber-sumber energi terbarukan. Sumber energi terbarukan merupakan sumber energi non-fosil yang dapat diperbaharui, ramah lingkungan dan dapat dimanfaatkan dalam jangka waktu yang lama. Energi terbarukan memiliki peranan penting yang cukup besar dalam upaya

pengadaan energi listrik alternatif. Akan tetapi potensi energi terbarukan belum dimanfaatkan secara optimum terutama dalam membangkitkan tenaga listrik.

Sebagian besar daerah di Indonesia merupakan daerah kepulauan yang disatukan oleh lautan. Sebagai negara dengan potensi wilayah lautan yang cukup besar, sebenarnya membuat Indonesia memiliki potensi untuk mengembangkan sumber-sumber energi alternatif yang berasal dari laut seperti sumber energi alternatif arus laut. Energi arus laut merupakan salah satu energi terbarukan yang keberadaannya kontinu dan ramah lingkungan yang tidak akan pernah habis tidak seperti halnya dengan energi fosil. Salah satu energi arus laut berada di wilayah selat Sunda, karena wilayah selat Sunda merupakan titik pertemuan antara laut Jawa dan samudera Hindia yang melewati alur yang sempit dengan dibatasi oleh dua daratan yaitu daratan Jawa dan daratan Sumatra. Hal ini mengakibatkan arus yang terjadi cukup besar dengan kecepatan rata-rata per bulan sebesar 0,66-1,10m/s selama satu tahun. Besarnya potensi ini dapat dimanfaatkan pada skema PLTAL (Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut) sebagai pembangkit listrik tambahan

untuk meningkatkan produksi listrik di wilayah selat Sunda.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Energi

Energi adalah bagian utama untuk semua kegiatan makhluk hidup, termasuk manusia dalam memenuhi kebutuhan hidupnya selalu memerlukan energi. Energi dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja, oleh karena itu sifat dan bentuk energi dapat berbeda sesuai dengan fungsinya [1]. Kebutuhan konsumsi energi pada manusia dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok sektor, yaitu kelompok pembangkit listrik, pemakaian industri, transportasi, komersial dan rumah tangga. Sumber-sumber energi yang terutama adalah air, angin, minyak bumi, gas alam, matahari, uranium, biomassa dan biogas. Bentuk atau sifat energi tersebut dapat saling dikonversikan, secara langsung ataupun tidak langsung. Energi listrik yang diperoleh dari baterai (sel primer atau sekunder) adalah dihasilkan langsung pada proses kimia masing-masing kedua sel tersebut, tetapi energi listrik pada PLTA (Pusat Listrik Tenaga Air) dihasilkan dari proses konversi energi potensial air akibat adanya selisih beda tinggi permukaan, dikonversikan menjadi energi kinetik oleh turbin yang selanjutnya oleh generator energi kinetik dikonversi menjadi energi listrik.

Bentuk energi yang sangat penting bagi kehidupan manusia adalah energi listrik. Saat ini negara-negara di dunia, termasuk Indonesia, mulai memproduksi dan menggunakan energi terbarukan dalam upaya pengadaan energi listrik. Sejalan dengan meningkatnya kesejahteraan manusia maka kebutuhan energi listrik juga makin meningkat, maka selalu dilakukan sebagai upaya untuk mendapatkan energi listrik melalui proses yang efisien, efektif dan ekonomis.

2.2 Definisi Arus Laut

Arus laut adalah sistem sirkulasi dari samudera dalam arah pergerakan vertikal dan horizontal yang dibangkitkan oleh gaya gravitasi, gaya gesek angin (*wind friction*) dan variasi kerapatan air pada bagian yang berbeda dalam samudera [2]. Aliran arus samudera berada dalam pola yang sangat kompleks, selain disebabkan oleh faktor yang telah disebutkan di atas, arus laut juga disebabkan oleh karena adanya topografi dasar samudera (*topography of the ocean floor*) dan rotasi bumi (*the earth's rotation*). Arus laut merupakan proses pergerakan massa air laut yang berpindah dari satu tempat ketempat lain secara kontinu atau terjadi secara terus-menerus [3]. Arus dipermukaan laut terutama disebabkan oleh tiupan angin, sedangkan arus dikedalaman laut disebabkan oleh perbedaan densitas massa air laut. Selain itu, arus dipermukaan laut dapat juga disebabkan oleh gerakan pasang surut air laut atau gelombang. Arus laut dapat terjadi di samudera luas yang bergerak melintasi samudera (*ocean currents*), maupun terjadi diperairan pesisir (*coastal currents*).

2.3 Perencanaan Sistem Tenaga Listrik

Perencanaan sistem tenaga listrik dilakukan interaksi ke dalam sistem perencanaan energi secara keseluruhan akan mendapatkan hasil yang efektif. Langkah awal dalam analisis terpadu antara sistem energi dan sistem tenaga listrik adalah pengembangan jaringan permintaan maupun penyediaan yang menelusuri aliran energi dari sumber energi primer sampai kepada pemakaian terakhir (*end use*). beberapa hal penting dalam perencanaan sistem pembangkit tenaga listrik, yaitu [4]:

1. Perkiraan kebutuhan energi listrik
2. Pemilihan teknologi
3. Evaluasi ekonomi
4. Keandalan
5. Faktor pembatas

Setelah perencanaan sistem pembangkit tenaga listrik dimasukkan dalam sistem pembangkit energi, maka perlu diperhatikan beberapa hal penting dalam perencanaan pembangunan pembangkit tenaga listrik sehingga pembangkit tenaga listrik akan bekerja secara optimal sampai waktu yang telah ditentukan. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pembangunan pembangkit tenaga listrik [4]:

1. Biaya pembangkitan
2. Keamanan dari pembangkit tenaga listrik
3. Keandalan
4. Efisiensi
5. Kemudahan pemeliharaan
6. Kondisi kerja yang baik

2.3.1 Turbin

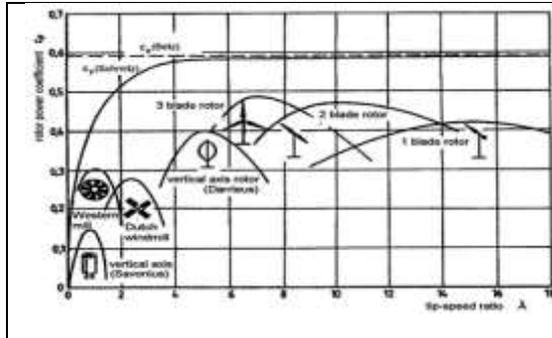
Fungsi utama turbin pada mesin penggerak adalah merubah arah gerak (tenaga mekanik) dari gerak translasi menjadi gerak rotasi. Turbin ini digerakkan (diputar) oleh suatu fluida kerja dengan tekanan yang besar. Adapun fluida kerja yang berperan dalam hal ini dapat berupa uap (air yang dipanaskan), gas (dapat berupa gas bumi yang langsung dieksploitasi dari dalam perut bumi, dapat pula berupa gas yang diproses lebih dulu) dan dapat berupa air suhu normal (dari aliran sungai, laut atau danau).

Untuk mendapatkan daya dari energi kinetik yang terdapat dari energi arus laut dibutuhkan turbin yang sesuai dengan kondisi keadaan di perairan Indonesia pada umumnya. Perbandingan efisiensi dan daerah operasi turbin arus laut dapat dilihat pada Tabel 1 [5].

Tabel 1. Efisiensi dan Daerah Operasi Turbin Arus Laut

Turbin	Efisiensi (%)	Daerah Operasi (m/s)
Garman	15-18	> 0,5
Tyson	16	> 0,5
Savonius	19	> 2
SeaFlow	20	> 2
Darrieus	23	> 2
Gorlov	35	> 0,6
Verdant	43	> 2

Pemilihan turbin pada suatu pembangkit didasarkan pada beberapa pertimbangan antara lain kecepatan arus laut, daya yang ingin dibangkitkan serta kecepatan putaran turbin yang diinginkan untuk memutar generator. Jika dilihat dari Gambar 1, maka dapat diketahui jenis desain blade turbin yang sesuai dengan keadaan arus laut di Indonesia [6].



Gambar 1. Jenis Desain Blade Turbin (Grafik ini dapat Digunakan untuk Semua Fluida) [6].

2.3.2 Generator

Generator adalah suatu peralatan yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Prinsip kerja generator adalah berdasarkan induksi elektromagnetik, setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime movers*), dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub diberi arus searah maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya fluks) yang berputar, kecepatannya sama dengan putaran kutub. Salah satu prototipe perangkat pembangkit listrik tenaga arus laut skala kecil banyak menggunakan generator type PMG (*Permanent Magnet Generator*). PMG adalah sebuah desain generator sinkron listrik berdasarkan penggunaan magnet permanen di rotor. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*Alternating Current*).

Pemilihan jenis generator untuk lokasi yang dipilih sesuai dengan daya output dan spesifikasi teknik dijabarkan pada Tabel 2 [7].

Tabel 2. Pemilihan Generator Berdasarkan Daya

Daya Terpasang	<10 kW	10-30 kW	>30 kW
Tipe generator	Sinkron atau Asinkron	Sinkron atau Asinkron	Sinkron
Fasa	1 atau 3	1 atau 3	3

2.4 PLTAL (Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut)

Indonesia memiliki banyak potensi alam yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit tenaga listrik. Pembangkit tenaga listrik yang banyak terdapat di Indonesia antara lain PLTA, PLTU, PLTD dan PLTGU. Namun, semua pembangkit yang disebutkan ini memiliki output gas buang dengan kandungan karbon yang berdampak kurang baik bagi lingkungan. Maka dari itu dibutuhkan suatu terobosan untuk memanfaatkan energi

terbarukan, tidak hanya mengandalkan energi tidak terbarukan. Untuk wilayah Indonesia, energi terbarukan yang punya prospek bagus salah satunya adalah energi arus laut. Hal ini dikarenakan Indonesia mempunyai banyak pulau dan selat. Untuk mendapatkan besar energi yang dihasilkan oleh suatu pembangkit listrik arus laut dapat diperoleh melalui persamaan 1 [4].

$$P = 0,5 \times \rho \times A \times V^3 \tag{1}$$

Dimana: P = Energi listrik yang dihasilkan (kW)

ρ = berat jenis air = 1025 kg/m³

A = luas penampang (m²)

V = kecepatan arus (m/s)

Dengan mempertimbangkan bahwa pembangkit energi arus laut memiliki *losses* di turbin, maka persamaan untuk mendapatkan besar energi yang dihasilkan oleh suatu pembangkit listrik arus laut dapat diperoleh melalui persamaan 1 menjadi persamaan 2 [4].

$$P = 0,5 \times \rho \times A \times V^3 \times \eta \tag{2}$$

Dimana: η = efisiensi turbin

Berbeda dengan energi gelombang laut yang hanya terjadi pada kolom air di lapisan permukaan saja, arus laut bisa terjadi sampai pada lapisan yang lebih dalam dan bahkan sampai ke dasar laut. Kelebihan karakter fisik arus laut ini memberikan peluang yang lebih optimal dalam pemanfaatan konversi energi kinetik menjadi energi listrik. Road map penelitian karakteristik arus laut serta estimasi daya listrik yang telah dilaksanakan oleh PPPGL (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan) sampai tahun 2011 di perairan Sunda Kecil atau Nusa Tenggara Timur, seperti yang ditunjukkan Tabel 3.

2.5 Biaya Pembangunan Pembangkitan PLTAL

Beberapa faktor yang harus diperhitungkan dalam usaha pemenuhan kebutuhan listrik dari pola pemakaian konsumen adalah faktor beban, faktor kapasitas dan faktor mampu dari pembangkit tenaga listrik [4].

Tabel 3. Road Map Penelitian Karakteristik Arus Laut

Energi Arus Laut	Selat Lombok	Selat Nusa Penida	Selat Larantuka	Selat Pantar	Selat Molo
Kecepatan Arus (m/s)	1,8-2,4	0,5-3,2	1,5-3,4	1,5-3,1	1,7-3,5
Luas Penampang Turbin (m ²)	15	40	40	40	40
Daya Listrik (kW/cell)	70-150	20-400	60-450	50-250	65-440
Tahun Penelitian	2005,2006	2007,2009	2008	2010	2011

$$\text{Faktor Beban} = \frac{\text{Rata - rata beban pada waktu tertentu}}{\text{Beban terbesar pada waktu yang sama}} \tag{3}$$

Avaibility

$$= \frac{\text{Lamanya pembangkit beroperasi}}{\text{waktu total pengamatan}} \quad (4)$$

Biaya pembangkitan total tanpa biaya eksternal merupakan penjumlahan dari biaya modal, biaya bahan bakar, serta biaya operasional dan perawatan.

$$TC = CC + FC + O\&M \quad (5)$$

Dimana: TC = Biaya pembangkitan total
 CC = Biaya modal
 FC = Biaya bahan bakar
 O&M = Biaya operasi dan perawatan

2.5.1 Biaya Modal (*Capital Cost*)

Total modal investasi untuk pembangkit tenaga listrik meliputi biaya langsung, biaya kepemilikan dan biaya suku cadang (kadang-kadang harus dibeli secara kolektif dan disebut biaya sebelum produksi), biaya tak terduga, kenaikan harga dan daya yang dipakai selama masa konstruksi.

Perhitungan biaya modal, tergantung pada tingkat suku bunga (*discount rate*) dan umur ekonomis. Nilai suku bunga diperhitungkan adalah suku bunga pertahun yang harus dibayar dengan memperhitungkan umur dari pembangkit yang mempunyai rumus sebagai berikut [4]:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

Sehingga, secara umum biaya modal dapat dirumuskan dari persamaan sebagai berikut [4]:

$$CC = \frac{\text{Biaya pembangunan} \times \text{kapasitas pembangkit} \times CRF}{\text{Jumlah pembangkitan netto tenaga listrik}} \quad (7)$$

Dimana: CRF = *Capital Recovery Factor* (desimal)
 i = Suku bunga/*Interest rate* (%)
 n = Umur pembangkit/lama waktu penyusutan (tahun)
 CC = Biaya modal/*Capital Cost* (US\$/kWh)

$$\text{Biaya pembangunan} = \frac{\text{biaya investasi}}{\text{kapasitas daya terpasang}} \quad (8)$$

$$\text{Jumlah pembangkitan netto tenaga listrik (kWh/tahun)} = \text{daya terpasang} \times \text{faktor daya} \times \text{jam} \times \text{hari} \quad (9)$$

2.5.2 Biaya Operasional dan Pemeliharaan

Biaya operasional dan pemeliharaan terdiri dari dua komponen, yaitu biaya tetap (yang tidak berhubungan dengan *output* listrik) dan biaya variabel (yang berhubungan dengan *output* listrik). Dimana biaya tetap tersebut tergantung jenis bahan bakar, kapasitas pembangkit dan teknologi yang digunakan. Sedangkan biaya variabel yang berhubungan dengan pengoperasian pembangkit dan faktor yang mempengaruhinya adalah pemeliharaan dan desain pembangkit.

2.5.3 Harga Jual Listrik (*COE/ Cost of Energy*)

Perhitungan harga jual listrik dari PLTAL dapat dilakukan dengan memperhitungkan nilai keuntungan yang besarnya 15% dari biaya pembangkitan total. Persamaan harga jual listrik dapat diperoleh melalui persamaan (10) [4]:

$$COE = TC + (15\% \times TC) \quad (10)$$

Dimana: COE = Harga jual
 TC = Biaya total

2.5.4 Perhitungan Pendapatan per-Tahun (*CIF/Cash in Flow*)

Jumlah pendapatan pertahun/*CIF* (*Cash in Flow*) dapat dihitung dari kWh_{out} dan selisih BPP (Biaya Pokok Penyediaan) dengan BP (Biaya Pembangkitan) atau dengan kata lain KP (Keuntungan Penjualan). Pembangkit ini direncanakan akan melalui saluran tegangan menengah, untuk daerah Banten. Perhitungan pendapatan per tahun dapat dihitung menggunakan persamaan (11) [4].

$$CIF = \text{kWh}_{\text{out}} \times KP \quad (11)$$

$$CIF = \text{kWh}_{\text{out}} \times (BPP - TC)$$

2.5.5 ROR (*Rate or Return*)

ROR menunjukkan perbandingan laba tahunan terhadap investasi. Dengan demikian merupakan cara sederhana untuk mengukur keberhasilan suatu investasi. Bank Dunia menetapkan suatu proyek dianggap layak jika mempunyai ROR lebih dari 8%. Kelemahan kriteria ini tidak mempertimbangkan nilai waktu dari uang [8]. ROR dapat dapat dihitung menggunakan persamaan (12).

$$ROR = \frac{CIF}{\text{Biaya Investasi}} \times 100\% \quad (12)$$

2.5.6 ROI (*Return of Investment*)

ROI (*Return of Investment*) adalah kemampuan pembangkit untuk mengembalikan dana investasi dalam menghasilkan tingkat keuntungan yang digunakan untuk menutup investasi yang dikeluarkan. Perhitungan ROI (*Return of Investment*) dengan menggunakan suku bunga 10,04% dapat dihitung menggunakan persamaan (13) [4]

$$ROI = \frac{\sum_t^n \text{Bennefit}_t - \text{Investment Cost}}{\text{Investment Cost}} \quad (13)$$

$$\text{Bennefit} = (CIF_t - COF_t)$$

Dimana : CIF_t = Pemasukan tahun ke-t

COF_t = Pengeluaran tahun ke-t

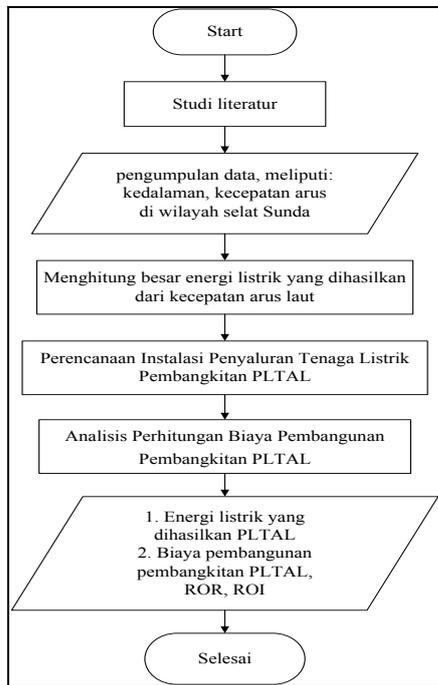
III. METODOLOGI PENELITIAN

Secara sederhana, proses studi kasus pemanfaatan arus laut sebagai sumber energi listrik alternatif dapat dijelaskan melalui diagram alir pada Gambar 2.

3.1 Data

Data yang digunakan pada penelitian berupa data geografis meliputi data kecepatan arus laut di wilayah

selat Sunda dalam se-tahun terakhir, yaitu pada bulan Januari-Desember 2012 yang tercatat di Dinas Hidro-Oceanografi TNI AL dengan memberikan letak lintang dan bujur lokasi wilayah selat Sunda, data kecepatan arus di wilayah selat Sunda dapat dilihat pada Tabel 4.



Gambar 2. Diagram Alir Perencanaan Penelitian

Tabel 4. Kecepatan Arus Laut di Wilayah Selat Sunda

No.	Data/Bulan	Kecepatan Arus Laut Rata-Rata dalam m/s
1	Januari	1,04
2	Februari	0,73
3	Maret	0,66
4	April	0,71
5	Mei	0,97
6	Juni	1,02
7	Juli	0,87
8	Agustus	0,70
9	September	0,67
10	Oktober	0,72
11	Nopember	0,90
12	Januari	1,10
Rata-rata		0,84

3.2 Pemilihan Jenis Turbin

Dalam suatu sistem pembangkit tenaga listrik dengan tenaga arus laut, turbin merupakan salah satu peralatan utama selain generator. Pergerakan turbin ditentukan oleh arus laut. Dengan nilai kecepatan arus laut di wilayah selat Sunda yang diperoleh, dapat dilihat pada Tabel 4, jenis turbin yang digunakan dapat ditentukan menggunakan Tabel 1. Berdasarkan Tabel 1, dengan kecepatan arus laut di wilayah selat Sunda rata-rata sebesar 0,84m/s, maka jenis turbin yang dipilih

adalah turbin Gorlov. Turbin Gorlov memiliki karakteristik di antaranya mempunyai efisiensi yang dikatakan paling tinggi dan konstan dibandingkan jenis turbin arus laut lainnya sebesar 35%.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perhitungan Energi Listrik yang Dihasilkan

4.1.1 Perhitungan Energi Listrik yang Dihasilkan Tanpa Nilai Konstanta Efisiensi Turbin

Berdasarkan data kecepatan arus di wilayah selat Sunda yang diperoleh, maka dapat dihitung energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin menggunakan data pada Tabel 4 dan menggunakan persamaan (1). Seperti pada contoh perhitungan energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin pada bulan ke-1 berikut ini.

$$\begin{aligned}
 P &= 0,5\rho AV^3 \\
 &= 0,5.1025.40.1,04^3 \\
 &= 23059,71W \sim 23,05kW
 \end{aligned}$$

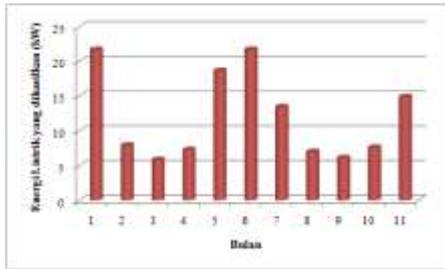
Hasil perhitungan energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin pada bulan berikutnya hingga bulan ke-12 dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Energi Listrik yang Dihasilkan Tanpa Nilai Konstanta Efisiensi Turbin

No.	Bulan	Energi Listrik yang Dihasilkan (kW)
1	Januari	23,05
2	Februari	7,97
3	Maret	5,89
4	April	7,33
5	Mei	18,7
6	Juni	21,75
7	Juli	13,49
8	Agustus	7,03
9	September	6,16
10	Oktober	7,65
11	Nopember	14,94
12	Desember	27,28
Min		5,89
Rata-rata		13,43
Max		27,28

Hasil perhitungan pada Tabel 5 dapat dilihat nilai minimum energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin terjadi pada bulan Maret sebesar 5,89kW. Untuk nilai maksimum energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin terjadi pada bulan Desember sebesar 27,28kW. Dengan nilai rata-rata energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin sebesar 13,43kW. Mengacu pada hasil energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin, dibuatlah sebuah grafik

hubungan perbandingan antara bulan dan nilai energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Hubungan antara Bulan dan Energi Listrik yang Dihasilkan Tanpa Nilai Konstanta Efisiensi Turbin

4.1.1 Perhitungan Energi Listrik yang Dihasilkan dengan Nilai Konstanta Efisiensi Turbin

Berdasarkan data kecepatan arus di wilayah selat Sunda yang diperoleh, maka dapat dihitung energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin menggunakan data pada Tabel 4 dan menggunakan persamaan (2). Seperti pada contoh perhitungan energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin pada bulan ke-1 berikut ini.

$$\begin{aligned}
 P &= 0,5\rho AV^3\eta \\
 &= 0,5.1025.40.1,04^3.0,35 \\
 &= 8070,89W \sim 8,07kW
 \end{aligned}$$

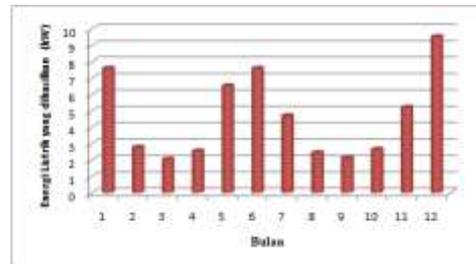
Hasil perhitungan energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin pada bulan berikutnya hingga bulan ke-12 dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Energi Listrik yang Dihasilkan dengan Nilai Konstanta Efisiensi Turbin

No.	Bulan	Energi Listrik yang Dihasilkan (kW)
1	Januari	8,07
2	Februari	2,79
3	Maret	2,06
4	April	2,56
5	Mei	6,54
6	Juni	7,61
7	Juli	4,72
8	Agustus	2,46
9	September	2,15
10	Oktober	2,67
11	Nopember	5,23
12	Desember	9,54
Min		2,06
Rata-rata		4,70
Max		9,54

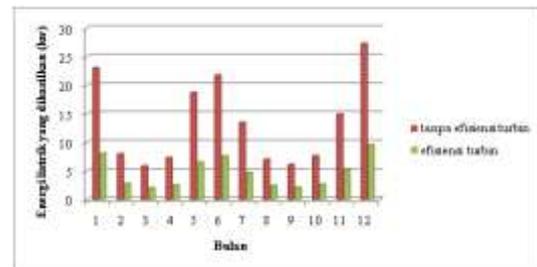
Hasil perhitungan pada Tabel 5 dapat dilihat nilai minimum energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin terjadi pada bulan Maret sebesar 2,06kW. Untuk nilai maksimum energi listrik yang

dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin terjadi pada bulan Desember sebesar 9,54kW. Dengan nilai rata-rata energi listrik yang dihasilkan dengan konstanta efisiensi turbin yang dihasilkan sebesar 4,70kW. Mengacu pada hasil perhitungan energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin, dibuatlah sebuah grafik hubungan perbandingan antara bulan dan nilai energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin, dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Hubungan antara Bulan dan Energi Listrik yang Dihasilkan dengan Nilai Konstanta Efisiensi Turbin

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5 dan Tabel 6 dengan memperlihatkan nilai energi listrik yang dihasilkan, dibuatlah sebuah grafik hubungan perbandingan antara bulan dan nilai energi listrik yang dihasilkan dengan nilai tanpa konstanta efisiensi turbin dan sesudah dengan nilai konstanta efisiensi turbin, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Perbandingan antara Bulan dan Energi Listrik yang Dihasilkan Tanpa dan Sesudah Menggunakan Nilai Konstanta Efisiensi Turbin

4.2 Perencanaan Instalasi Penyaluran Tenaga Listrik Pembangkitan PLTAL

Prinsip sederhana dari pemanfaatan energi alternatif arus laut adalah memakai energi kinetik untuk memutar turbin selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik, dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Prinsip Proses Konversi Energi Arus Laut

Komponen utama yang dipergunakan dalam penyaluran daya listrik adalah: kabel penghantar, tiang listrik, dan sistem pentanahan. Penjelasannya sebagai berikut:

1. Kabel Penghantar

Kabel Penghantar menggunakan jaringan JTR (Jaringan Tegangan Rendah) 220/380V. Untuk menentukan jenis penghantar harus diperhatikan besarnya arus listrik yang akan disalurkan dan besarnya drop tegangan yang terjadi. Penghantar yang dipilih harus mempunyai KHA (Kuat Hantar Arus) lebih besar daripada arus nominalnya. Sehingga drop tegangan diharapkan tidak melebihi 5% KHA dari penghantar dipengaruhi oleh jenis dari material penghantar, penampang penghantar, jenis beban dan suhu dikelilingi penghantar. Untuk kapasitas dari pembangkit adalah 9,54kW dengan sistem 3 fasa tegangan 380V, faktor daya beban adalah 0,8, maka arus nominal dihitung dengan persamaan 14 berikut:

$$\begin{aligned}
 I_{nom} &= \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \text{Cos}\phi} & (14) \\
 &= \frac{9540}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,8} \\
 &= \frac{9540}{\sqrt{3} \times 380 \times 0,8} = 18,11A \\
 \text{KHA} &= 1,1 \times I_{nominal} = 1,1 \times 18,11 = 19,92 A
 \end{aligned}$$

Jenis penghantar pada jaringan distribusi untuk tegangan 220/380V direncanakan menggunakan kabel bawah laut (*sub marine cable*) dengan kabel berinti tiga berisolasi XLPE dan berselubung PE/PVC (SPLN No.43-5-6, tahun 1995) dan kabel udara dengan menggunakan jenis kabel LVTC (*Low Voltage Twisted Cable*) (SPLN No. 42-10, tahun 1993).

2. Tiang

Sebagai penopang kabel digunakan tiang beton JTR 9 meter, dengan jarak tiang (span) rata-rata 40 meter. Mengingat letak jaringan di daerah pantai maka digunakan jenis tiang beton untuk menghindari terjadinya korosi yang bisa terjadi pada tiang besi.

3. Sistem Pentanahan Netral Pengaman

Sebagai pengaman terhadap tegangan lebih dari luar sistem dan terjadinya kegagalan isolasi agar tidak terjadi tegangan sentuh yang tinggi dan berlangsung lama, maka perlu digunakan sistem pentanahan yang baik yaitu dengan pemasangan arde 5 ohm setiap jarak 250 meter atau 6 gawang. Dengan suatu tindakan pengamanan berubah menghubungkan badan peralatan atau instalasi yang diamankan dengan hantaran netral tahanan netral yang ditanahkan (SPLN No. 3 tahun 1978).

4.3 Analisis Perhitungan Biaya Pembangunan Pembangkitan PLTAL

Pembangunan PLTAL di wilayah Selat Sunda, akan diambil asumsi secara umum bahwa pembangunan PLTAL dengan kapasitas total daya terpasang sebesar

9,54kW memiliki faktor daya sebesar 80% dan memiliki umur pembangkit 20 tahun.

4.3.1 Biaya Modal (*Capital Cost*)

Perhitungan biaya modal, tergantung pada tingkat suku bunga (*discount rate*) dan umur ekonomis. Besarnya biaya investasi PLTAL dengan kapasitas daya terpasang 9,54kW untuk waktu umur pembangkit 20 tahun dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 7. Investasi Pembangkitan PLTAL

Komponen Elektrikal dan Mekanikal	
Komponen	Harga
Generator Sinkron 3 fasa	US\$8000
Turbin	US\$5000
Bouyance/rumah storage	US\$6000
Instalasi Alat	US\$3000
Aksesoris	US\$3500
Total	US\$25500

Berdasarkan Tabel 6 dapat diketahui biaya investasi pembangkitan PLTAL di wilayah selat Sunda dengan kapasitas daya terpasang 9,54kW ini sebesar US\$25500 atau Rp.255.000.000 (dengan kurs Rp.10000,- per USD).

a. perhitungan CRF (*Capital Recovery Factor*)

PLTAL yang akan dikembangkan pada penelitian ini, diasumsikan beroperasi selama 20 tahun. Besarnya tingkat diskonto (i) yang dipergunakan untuk menghitung nilai sekarang pada penelitian ini adalah sebesar 10,04%. Penentuan tingkat diskonto ini mengacu kepada tingkat suku bunga kredit bank pada tahun 2012 yaitu rata-rata sebesar 10,04% (BPS, 2012).

$$\begin{aligned}
 CRF &= \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \\
 &= \frac{0,1004(1+0,1004)^{20}}{(1+0,1004)^{20} - 1} \\
 &= \frac{0,680}{5,776} \\
 &= 0,117
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan biaya pembangunan

Berdasarkan biaya investasi dan kapasitas daya terpasang yang telah diketahui sehingga didapatkan biaya pembangunan/*capital investment cost* adalah sebesar:

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya pembangunan} &= \frac{\text{biaya investasi}}{\text{kapasitas daya terpasang}} \\
 &= \frac{\text{US\$25500}}{9,54kW} \\
 &= \text{US\$2672,9/kW}
 \end{aligned}$$

Sehingga didapat untuk nilai biaya pembangunan pembangkit adalah US\$2672,9/kW.

c. Perhitungan jumlah pembangkitan tenaga listrik (kWh/tahun)

PLTAL yang dioperasikan selama 24 jam, dengan daya terpasang 9,54kW dan faktor daya 80% maka jumlah total tenaga listrik yang terbangkitkan dapat dihitung menggunakan persamaan (9).

$$\begin{aligned} kWh_{out} &= \text{daya terpasang} \times \text{faktor daya} \times \text{jam} \times \text{hari} \\ &= 9,54 \times 0,8 \times 24 \times 365 \\ &= 66856,32 \text{ kWh/tahun} \end{aligned}$$

Sehingga dengan menggunakan persamaan (7) didapatkan hasil perhitungan biaya modal (*CC/Capital Cost*) setelah dipengaruhi oleh nilai kWh_{out} dan besar nilai CRF sebagai berikut:

$$\begin{aligned} CC &= \frac{2672,9 \times 9,54 \times 0,117}{66856,32} \\ &= 0,044 \text{ US\$/kWh} \sim 4,4 \text{ centUS\$/kWh} \end{aligned}$$

4.3.2 Perhitungan Biaya Bahan Bakar

Meskipun PLTAL tidak memerlukan bahan bakar fosil sebagai sumber energinya, tetapi PLTAL tetap memerlukan minyak yang digunakan sebagai pelumas mesin-mesinnya. Biaya minyak pelumas yang digunakan untuk PLTAL ini adalah sebesar Rp. 9/kWh atau sebanding dengan 0,09 centUS\$/kWh.

4.3.3 Perhitungan Biaya Operasi dan Perawatan (*Operation and Maintenance Cost/O&M*)

Biaya operasi dan perawatan adalah biaya yang dikeluarkan untuk pengoperasian pembangkit dan perawatan berkala, dapat dilihat pada Tabel 8. Berdasarkan Tabel 8 dapat diketahui bahwa biaya operasi dan perawatan PLTAL Selat Sunda 9,54kW ini adalah sebesar 0,03 centUS\$/kWh.

Tabel 8. Perbandingan Biaya O&M Berdasarkan Power Source (*retscreen.net*)

Sumber Daya	O&M Cost (centUS\$/kWh)
Panas Bumi	0,40-1,40
Tenaga Air	0,70
Arus Laut	0,03
Batubara	0,46
Nuklir	1,90

4.3.4 Perhitungan Biaya Pembangkitan Total

Perhitungan biaya pembangkitan dalam pembangkitan tahunan dapat dihitung menggunakan persamaan (5).

$$\begin{aligned} TC &= CC + FC + O\&M \\ TC &= 4,4 \text{ centUS\$/kWh} + 0,09 \text{ centUS\$/kW} + 0,03 \text{ centUS\$/kWh} \\ &= 4,52 \text{ centUS\$/kWh} \\ &= 0,0452 \text{ US\$/kWh} \\ &= \text{Rp. 452/kWh} \end{aligned}$$

4.3.5 Perhitungan Harga Jual Listrik (*COE/ Cost Of Energy*)

Perhitungan harga jual listrik dari PLTAL Selat Sunda dapat dilakukan dengan memperhitungkan nilai keuntungan yang besarnya 15% dari biaya pembangkitan total. Perhitungan harga jual listrik dapat dihitung menggunakan persamaan (10).

$$\begin{aligned} COE &= TC + (15\% \times TC) \\ COE &= 0,0452 \text{ US\$/kWh} + (0,15 \times 0,0452 \text{ US\$/kWh}) \\ &= 0,0452 \text{ US\$/kWh} + 0,0067 \text{ US\$/kWh} \\ &= 0,0519 \text{ US\$/kWh} \\ &= \text{Rp. 519/kWh} \end{aligned}$$

4.3.6 Perhitungan Pendapatan per-Tahun (*CIF/Cash In Flow*)

Jumlah pendapatan pertahun/*CIF (Cash In Flow)* dapat dihitung dari kWh_{out} dan selisih BPP (Biaya Pokok Penyediaan) dengan BP (Biaya Pembangkitan) atau dengan kata lain KP (Keuntungan Penjualan). Pembangkit ini direncanakan akan melalui saluran tegangan rendah, untuk wilayah Jawa dan Bali dengan biaya pokok penyediaan atau tarif tenaga listrik sebesar Rp.1325/kWh (ESDM, 2012). Perhitungan pendapatan per tahun dapat dihitung menggunakan persamaan (11).

$$\begin{aligned} CIF &= kWh_{out} \times KP \\ CIF &= kWh_{out} \times (BPP - TC) \\ CIF &= 66856,32 \times (\text{Rp. 1325} - \text{Rp. 452}) \\ CIF &= \text{Rp. 58.365.576,36/tahun} \end{aligned}$$

4.3.7 ROR (*Rate Or Return*)

ROR menunjukkan perbandingan laba tahunan terhadap investasi. Dengan demikian merupakan cara sederhana untuk mengukur keberhasilan suatu investasi. Bank Dunia menetapkan suatu proyek dianggap layak jika mempunyai ROR lebih dari 8%. Kelemahan kriteria ini tidak mempertimbangkan nilai waktu dari uang. ROR dapat diketahui dengan melakukan perhitungan seperti persamaan (12).

$$\begin{aligned} ROR &= \frac{CIF}{\text{Biaya Investasi}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{Rp. 58.365.576,36}}{\text{Rp. 255.000.000}} \times 100\% \\ &= 22,88\% \end{aligned}$$

4.3.8 Laba Investasi (*ROI/Return of Investement*)

ROI (*Return of Investment*) adalah kemampuan pembangkit untuk mengembalikan dana investasi dalam menghasilkan tingkat keuntungan yang digunakan untuk menutup investasi yang dikeluarkan. Perhitungan ROI (*Return of Investment*) dapat dihitung menggunakan persamaan (13).

$$\begin{aligned} \text{1. Pada tahun pertama (t=1)} \\ ROI &= \frac{(58.365.576,36 - 0) - 255.000.000}{255.000.000} \\ &= -77,11\% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan ROI (*Return of Investment*) dengan menggunakan suku bunga 10,04% pada tahun berikutnya hingga tahun ke-20 dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil perhitungan ROI (*Return of Investment*) PLTAL di Selat Sunda 9,54kW

Tahun	Investasi = Rp.255.000.000		
	Benefit (Rp)	%	ROI Nominal (Rp)
0	0	0	-286.200.000
1	58.354.188,16	-77,11	-196.630.500
2	116.731.134,7	-54,22	-138.261.000
3	175.096.702,1	-31,33	-79.891.500
4	233.462.269,4	-8,44	-21.522.000
5	291.827.836,8	14,44	36.822.000
6	350.193.404,2	37,33	95.191.500
7	408.558.971,5	60,21	153.535.500
8	466.924.538,9	83,10	211.905.000
9	525.290.106,2	105,99	270.274.500
10	583.655.673,6	128,88	328.644.000
11	642.021.241	151,77	387.013.500
12	700.386.808,3	174,66	445.383.000
13	758.752.375,7	197,54	503.727.000
14	817.117.943	220,43	562.096.500
15	875.483.510,4	243,32	620.466.000
16	933.849.077,8	266,21	679.835.500
17	992.214.645,1	289,10	737.205.000
18	1.050.580.212	311,99	795.574.500
19	1.108.945.780	334,88	853.944.000
20	1.167.311.347	257,76	912.288.000

Hasil perhitungan pada Tabel 9, dapat diketahui bahwa dana investasi dengan suku bunga 10,04% dapat dikembalikan pada tahun ke-5, dengan nilai benefit dan ROI masing-masing sebesar Rp.291.827.836,8 dan 14,44% atau sebesar Rp.36.822.000.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian studi pemanfaatan energi arus laut di wilayah selat Sunda sebagai energi alternatif ini menghasilkan beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Energi listrik yang dihasilkan tanpa nilai konstanta efisiensi turbin untuk kecepatan arus laut minimum 0,66m/s sebesar 5,89kW dan maksimum 1,10m/s sebesar 27,28kW, sedangkan energi listrik yang dihasilkan dengan nilai konstanta efisiensi turbin untuk kecepatan arus laut minimum 0,66m/s sebesar 2,06kW dan maksimum 1,10m/s sebesar 9,54kW.
2. Biaya pembangkitan dengan suku bunga $i=10,04\%$ sebesar 0,0452US\$/kWh atau Rp.452/kWh dan besarnya harga jual listrik sebesar 0,0519US\$/kWh atau Rp.519/kWh, dengan jumlah pendapatan pertahun/CIF (*Cash in Flow*) didapat sebesar Rp.58.365.567,36/tahun.

5.2 Saran

Masih terdapat kekurangan dalam penelitian ini sehingga perlu pengembangan agar menjadi lebih baik lagi. Saran yang penulis ingin sampaikan, yaitu:

1. Perlu dilakukan studi lebih lanjut mengenai potensi pembangkit listrik alternatif lainnya yang dapat dimanfaatkan di wilayah selat Sunda.
2. Sebagai studi lebih lanjut, perlu adanya penelitian tentang perancangan sistem transmisi dan pendistribusiannya dalam aspek teknis agar perencanaan penyaluran tenaga listrik dapat optimal.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hardiansyah. 2012. *Perancangan Dual Axis Solar Tracker*. Skripsi Jurusan Teknik Elektro Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- [2] Anonim. 2009. *Ocean currents*. [http://www.waterencyclopedia.com/ocean currents/](http://www.waterencyclopedia.com/ocean_currents/). [URL dikunjungi pada 15 Januari 2013].
- [3] Gross, M. 1972. *Oceanography sixth edition*. New Jersey: Prentice-Hall.Inc.
- [4] Azis, Asruldin. 2010. *Studi Pemanfaatan Energi Listrik Tenaga Arus Laut di Selat Alas Kabupaten Lombok, NTB*. Skripsi Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Novrinaldi, Aidil Haryanto, dan Umi Hanifah. 2011. *Rancang Bangun Turbin Heliks Aliran Datar Tipe L C500*. Prosiding SNaPP2011 Sains, Teknologi, dan Kesehatan.
- [6] Stiebler, Manfred. 2008. *Wind Energy System for Electric Power Generation*. Institute of Energy and Automation Technology.
- [7] Kurniawan, Adhy dkk. 2009. *Pedoman Studi Kelayakan Mekanikal Elektrikal (Buku 2C)*. Direktorat Jenderal Listrik Dan Pemanfaatan Energi Departemen Energi Dan Sumber Daya Mineral.
- [8] Firmansyah, Ifhan. 2011. *Studi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) Dompjong 50kW di Desa Dompjong, Bendungan, Trenggalek untuk Mewujudkan Desa Mandiri Energi (DME)*. Skripsi Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS.

PEDOMAN BAGI PENULIS JURNAL SETRUM

Jurnal SETRUM adalah jurnal ilmiah untuk publikasi penelitian dan pengembangan di bidang :

1. Sistem Kendali
2. Sistem Tenaga Listrik
3. Elektronika dan Instrumentasi
4. Telekomunikasi
5. Komputer

Sistematika Penulisan

1. Naskah pada kertas ukuran A4 dengan batas atas, batas kanan, batas bawah, dan batas kiri masing-masing 2 cm. Naskah terdiri atas bagian judul, bagian abstrak, dan bagian isi makalah.
2. Bagian judul berisi judul yang ringkas tidak lebih dari 12 kata tanpa singkatan jika menggunakan bahasa Indonesia dan 10 kata tanpa singkatan jika menggunakan bahasa Inggris. Bagian judul disertai nama (para) penulis tanpa gelar, instansi/ perguruan tinggi, dan email penulis utama dan/atau penulis lainnya. Bagian Judul diketik dengan huruf Times New Roman ukuran 16, cetak tebal, dan rata tengah. Bagian Judul disajikan dalam satu kolom.
3. Bagian abstrak ditulis dengan font Times New Roman ukuran 10, cetak miring, dan rata kanan-kiri. Abstrak disajikan dalam dua bahasa, yaitu bahasa Indonesia dan bahasa Inggris. Abstrak disertakan dengan kata kunci. Bagian abstrak disajikan dalam satu kolom. Bagian abstrak harus memuat inti permasalahan yang dikemukakan, metode pemecahannya, dan hasil-hasil yang diperoleh serta kesimpulan dan tidak lebih dari 200 kata.
4. Bagian isi diketik dengan huruf Times New Roman ukuran 10, rata kanan-kiri, dan disajikan dalam dua kolom. Bagian isi terdiri atas bab Pendahuluan, Metode, Hasil & Pembahasan, Kesimpulan, dan Daftar Pustaka. Tiap bab diawali dengan penomoran romawi kapital dan tiap sub bab diawali dengan penomoran numerik. Kata-kata atau istilah asing ditulis dengan huruf miring
5. Gambar atau foto harus dapat dicetak dengan tajam dan jelas. Gambar atau foto warna hanya tersedia pada edisi elektronik. Gambar dan tabel dapat dimasukkan ke dalam bagian isi atau terpisah dalam lampiran tersendiri. Untuk kejelasan penempatan dalam jurnal, gambar dan tabel harus diberi nomor sesuai dengan nomor urut gambar pada tulisan tersebut, misalnya Gambar 1 atau Tabel 1. Gambar dan tabel harus disertakan judul. Penulisan nomor dan judul gambar diletakkan setelah gambar dan penulisan nomor dan judul tabel diletakkan sebelum tabel.
6. Persamaan diketik dan diberi nomor disebelah kanan, misalnya (1). Satuan yang digunakan adalah satuan internasional (EGS atau MKS) atau yang lazim ada cabang ilmunya. Angka desimal pada data numerik harus mengacu kepada sistem internasional yaitu dengan menggunakan titik.
7. Rujukan dan daftar pustaka ditulis dengan menggunakan metode Vancouver.
8. Naskah dikirim ke redaksi melalui email.

ISSN 2301-4652



9 772301 485253

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Jend. Sudirman km. 3 Kota Cilegon, Banten
Phone: 0254-395502 ext. 15 Fax: 0254-395440