

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

1.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian tentang pembangkit listrik tenaga sampah telah banyak dilakukan di berbagai daerah baik itu di Indonesia maupun luar negeri, banyak metode dan teknologi pengolahan sampah yang digunakan, hal itu tergantung dari berbagai perspektif dan keadaan tempat suatu tempat. Oleh karena itu, penulis mendasari penelitian ini dari berbagai penelitian sebelumnya sebagai acuan untuk menganalisis potensi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) di TPA Putri Cempo dan pemilihan teknologi yang tepat.

Dalam hal ini, penulis mencoba mengembangkan penelitian ini terhadap aspek kelistrikan yang juga bersumber dari berbagai penelitian sebelumnya, yaitu mengenai Distributed Generation, dan secara kategori PLTSa merupakan salah satu jenis dari Distributed Generation (DG). Dengan adanya (DG) yang dikoneksikan ke jaringan distribusi kota Surakarta sebagai suplai daya listrik tambahan, tentunya (DG) akan menimbulkan dampak pada sistem kelistrikan itu sendiri terutama pada kualitas parameter listrik (tegangan), rugi-rugi daya dan tingkat keandalan pada jaringan. Dengan adanya penelitian sebelumnya akan memberi gambaran mengenai hasil penelitian ini kedepannya.

1.1.1. Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

Pengelolaan sampah dalam prakteknya berbeda-beda, hal ini tergantung pada regulasi atau keadaan tempat maupun letaknya. Perbedaan itu bisa dilihat dari perbedaan penolahan sampah antara pedesaan dengan perkotaan, daerah perumahan dengan industri, negara maju dengan negara berkembang. Penanganan sampah yang tidak berbahaya seperti sampah pemukiman dan area metropolitan biasanya ditangani oleh pemerintah namun untuk industri akan dikelola oleh pihak industri itu sendiri. Pengelolaan sampah di negara maju seperti

di eropa dan amerika, mereka tidak hanya sebatas menanggulangi pemasalahan lingkungan namun mereka sudah menerpkan bahwa sampah merupakan potensi yang bisa dimanfaatkan. Seperti negara Denmark yang 54% sampah negara tersebut telah dimanfaatkan untuk pembangkit listrik (I Nyoman Endy Triatmaja, 2011).

Syafrizal (2014) dengan judul penelitian, Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Kota (PLTSa) Type Incinerator Solusi Listrik Alternatif Kota Medan. Dalam penelitian ini dijelaskan bahwa penggunaan energi terbarukan seperti *Municipal Solid Waste* atau sampah kota dapat mengurangi dampak pemanasan global karena mampu menggantikan penggunaan bahan bakar fosil sebagai bahan baku pembangkitan energi listrik. Disamping itu, potensi sampah kota menjadi sumber energi listrik dapat dimanfaatkan untuk mengurangi defisit daya listrik di kota medan. Penelitian ini menggunakan jumlah penduduk dan produksi sampah rumah tangga per hari sebagai asumsi dasar perhitungan.

Peneltian yang dilakukan oleh Rachmad Ikhsan dan Syukriyadin (2014) tentang Studi Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) di TPA Kota Banda Aceh. Menyatakan bahwa penerapan Landfill Gas (LFG) di Banda Aceh yang menggunakan metode least cost untuk menghitung analisa ekonomi berupa menentukan nilai NPV, ROI, BCR, PP. Dari hasil perhitungan metode tersebut didapatkan besarnya potensi gas yang dihasilkan =1.992.533 m³/tahun dan energi listrik yang dihasilkan adalah 15.065.010 kWh dan daya listrik yang dihasilkan 1,7 MW, sedangkan nilai NPV = Rp. 18.607.329.579, IRR = 24%, BCR = 3,73 dan juga nilai PP = 4,01 Tahun, sehingga dari hasil tersebut proyek pembangunan PLTSa di Kota Banda Aceh dapat memenuhi kriteria kelayakan untuk dibangun.

Dalam berbagai aspek, seperti yang telah teliti oleh Murni Rahayu Purwaningsih (2012) tentang Analisis Biaya Dampak Sosial Keberadaan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Bagi Masyarakat Sekitar Menggunakan Teknologi Insinersi. PLTSa Gedebage memiliki nilai NPV yang negatif, yakni Rp -568.038.555.957,-. Nilai IRR pada PLTSa Gedebage dengan teknologi

insinerasi adalah -5,22%, yang berarti hingga tahun 2032 PLTSA Gedebage tidak memberikan manfaat bersih bagi masyarakat sekitar, dan bahkan jumlah manfaat bersih masih lebih kecil dibandingkan biaya modal. Nilai PBP menunjukkan angka 62,33 tahun. Hal ini berarti jika PLTSA Gedebage dapat beroperasi sampai 62 tahun, maka total manfaat yang diperoleh baru akan dapat menutupi biaya modal. Hasil perhitungan kriteria investasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa PLTSA Gedebage dengan teknologi insinerasi dari 2011 hingga 2032 lebih banyak memberikan kerugian bagi masyarakat sekitar. Namun, PLTSA Gedebage dapat dianggap layak untuk dibangun dan menguntungkan secara ekonomi ataupun secara sosial, yakni dengan mempertimbangkan teknis pembangunan dan teknologi yang digunakan.

1.1.2. Estimasi Pertumbuhan Beban Listrik Menggunakan Metode DKL 3.01

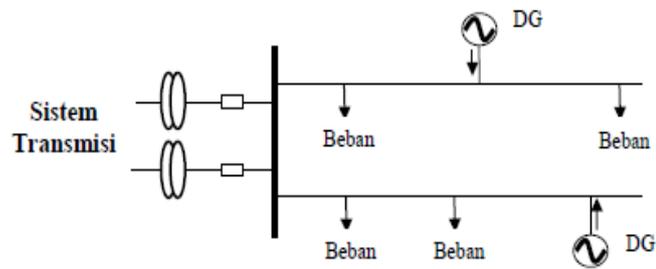
Metode DKL 3.01 yaitu metode yang digunakan untuk menyusun prakiraan konsumsi ketenagalistrikan model sektoral seperti pelanggan rumah tangga, pelanggan bisnis, pelanggan industri dan pelanggan publik. Ada beberapa penelitian yang menerapkan metode DKL 3.01 yang dijadikan acuan dalam penelitian ini yaitu:

Kukuh Siwi Kuncoro (2010), tentang Studi Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Sampah 10 MWe di Kota Medan ditinjau dari Aspek Teknis, Ekonomi dan Lingkungan. Penelitian ini mencoba menerapkan metode DKL 3.01 dalam menghitung peramalan konsumsi daya listrik kota medan dari tahun 2010 hingga 2015. Dalam penelitiannya menunjukkan bahwa keadaan konsumsi daya listrik di kota medan terus mengalami kenaikan.

Vian Febrianto (2009), tentang Studi Pengembangan Serta Rencana Energi dan Kelistrikan Daerah dengan Memanfaatkan Potensi Energi Daerah di Kabupaten Lamongan Jawa Timur. Penelitian ini menyatakan bahwa dengan menggunakan Metode DKL 3.01 laju pertumbuhannya penggunaan energi listrik kabupaten lamongan rata-rata sebesar 17,44 % per tahun.

1.1.3. Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) sebagai *Distributed Generation (DG)*

Sistem pembangkit listrik konvensional karakteristiknya membangkitkan energi listrik yang letaknya jauh dari pusat beban dengan kapasitas (umumnya > 100 MW) sehingga dalam menyalurkan energi listrik membutuhkan saluran yang panjang dan peralatan yang kompleks. (DG) *Distributed Generation* dilihat dari karakteristiknya, sistem pembangkitannya terletak dekat dengan pusat beban selain itu kapasitas daya (DG) juga lebih kecil dibandingkan sistem pembangkitan konvensional yang nilainya (< 10 MW), DG dalam operasinya bisa dioperasikan secara radial maupun interkoneksi sehingga dalam hal ini sangat memungkinkan terjadinya peningkatan kualitas kelistrikan. DG tidak memerlukan peralatan yang terlalu banyak karena tidak memerlukan saluran transmisi dan Gardu Induk skala besar dalam oleh karena itu biaya investasi pembangunan sistem tenaga listriknya dapat diminimalisir semurah mungkin, selain itu kualitas pelayanan pelanggan dapat meningkat karena tidak memperhitungkan gangguan saluran transmisi, dan dalam realisasinya pembangunan DG tidak membutuhkan waktu yang lama dibandingkan pembangunan pembangkit listrik konvensional



Gambar 2.1. *Distributed Generation (DG)*

Sumber: diktat teknik elektro Universitas Sumatra Utara

Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi listrik dengan tingkat keandalan dan kualitas daya yang baik dapat dilakukan dengan penerapan distributed generation pada suatu jaringan tenaga listrik. Pemanfaatan distributed generation dapat dilakukan dengan memanfaatkan energi terbarukan seperti : air, angin, matahari, biomassa, sampah, panas bumi dan lain sebagainya. CIGRED dan CIRED pada tahun 1997 menyampaikan sebuah gagasan baru tentang

pembangkitan terdistribusi dengan memanfaatkan energi baru terbarukan yang telah banyak dilakukan di kawasan Uni Eropa, seperti : Belanda, Spanyol, Denmark, Jerman. CIRED dan CIGRED mendefinisikan distributed generation sebagai :

1. Lokasi dekat dengan beban.
2. Berkapasitas 10 kW sampai dengan 10 MW.
3. Pada umumnya terinterkoneksi ke jaringan distribusi tenaga listrik.
4. Ramah lingkungan.
5. Menggunakan energi baru terbarukan sebagai energi primer.

Banyak istilah dan definisi yang digunakan untuk menyebutkan pembangkit skala kecil yang lokasinya tersebar dan terinterkoneksi dengan jaringan distribusi tenaga listrik, dalam penelitian ini disebut sebagai distributed generation. Distributed generation adalah teknologi pembangkit skala kecil yang menyediakan energi listrik atau dekat dengan lokasi beban dan terhubung dengan jaringan distribusi (Borbely dan Freider, 2001). Teknologi distribution dapat berupa internal consumption engines, fuel cells, microturbines, small gas turbine, small combined cycle gas turbine, wind power dan small-hydro power (EIA, 2002) teknologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas engine.

Distributed generation (DG) yang bersumber dari energi terbarukan memiliki peran penting sebagai salah satu sumber energi listrik di masa yang akan datang. (EIA) (Energy of Information Administration) telah melakukan penelitian menghasilkan data berupa statistik mengenai pertumbuhan kebutuhan energi listrik khususnya *distributed generation* yang bersumberkan dari energi terbarukan diseluruh dunia. Distributed generation menawarkan konsep investasi pembangkitan, saluran transmisi yang lebih murah dibandingkan dengan pembangkit konvensional.

Distributed generation terutama yang berasal dari energi terbarukan untuk pembangkit listrik terus mengalami peningkatan pembangunan dengan laju

pertumbuhan 3%, lebih besar dibandingkan laju pertumbuhan yang menggunakan sumber energi primer batubara yang hanya 2,3% pertahun, maupun dari sumber gas alam yang sebesar 2,1 % pertahun. (EIA, 2010). Dengan berbagai kebijakan dan insentif dari pemerintah di seluruh dunia yang mendukung pertumbuhan distributed generation terutama yang berasal dari energi terbarukan, komposisi pembangkit listrik terbarukan di seluruh dunia diperkirakan akan mengalami peningkatan yang signifikan dari 18% 2007 menjadi 23% pada tahun 2015.

1.1.4. Pengaruh Penerapan *Distributed Generation*

Banyak penelitian telah dilakukan, yaitu tentang pengaruh *distributed generation* dalam meningkatkan kualitas sistem tenaga listrik. Penerapan *distributed generation* pada sistem tenaga listrik dapat memberikan dampak menguntungkan, yaitu mencakup peningkatan keandalan, meniadakan investasi saluran transmisi dan mengurangi dampak lingkungan (Dally dan Morriso, 2001). Selain itu, interkoneksi *distributed generation* memberi pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kualitas jaringan distribusi tenaga listrik yang meliputi aliran daya, perbaikan profil tegangan, peningkatan keandalan dan penurunan susut daya.

Sebagian besar jaringan distribusi dirancang sedemikian rupa, sehingga daya dapat mengalir ke beban secara kontinu. Ketika daya yang dibangkitkan oleh *distributed generation* lebih besar dari beban sebelah hilir (downstream), *distributed generation* akan mengalirkan daya sisa ke bagian hulu (upstream) dari suatu sistem jaringan distribusi tenaga listrik.

2.1.4.a) Perbaikan Profil Tegangan

Profil tegangan berhubungan langsung dengan kualitas daya. Jaringan tenaga listrik memiliki jatuh tegangan yang lebih besar pada lokasi-lokasi yang jauh dari pembangkit (GI). Perbaikan jatuh tegangan pada sistem tenaga listrik merupakan hal yang sangat penting untuk meningkatkan kualitas parameter kelistrikan sesuai standar PLN. Standar PLN (SPLN) memiliki standar untuk fluktuasi tegangan yaitu, $\pm 5\%$. dari tegangan normal.

Distributed generation jarang dijadikan untuk perbaikan profil tegangan dibandingkan regulator tegangan dan kapasitor bank. Terdapat beberapa penelitian tentang perbaikan profil tegangan pada jaringan distribusi dengan menginterkoneksi ke *distributed generation* yang langsung terhubung pada sistem distribusi tenaga listrik. *Distributed generation* umumnya memberikan pengaturan tegangan dan perbaikan profil terbaik saat generator dioperasikan secara *voltage-controlled generator* untuk memaksimalkan daya yang dihasilkan. Hal ini disebabkan sebagian besar unit pembangkit beroperasi paling efisien saat daya yang dibangkitkan maksimum.

Sebuah penelitian (Chiradeja dan Ramakumar, 2003) menggunakan pendekatan probalistik dan non-probalistik untuk memperbaiki profil tegangan pada jaringan distribusi tenaga listrik. Penelitian ini menggunakan turbin angin sebagai *distributed generation*. Peneliti tersebut menggunakan pendekatan probabilistik dan non probabilistik untuk mengoptimalkan lokasi, ukuran, dan faktor daya dari turbin angin, pendekatan sedikit lebih rumit tapi lebih akurat. Kedua metode menunjukkan bahwa terjadi peningkatan profil tegangan ketika kapasitas *distributed generation* dinaikkan atau dipindahkan ke suatu lokasi yang lebih dekat dengan beban. Tegangan ini mengalami peningkatan sebesar 0,005 pu ketika jarak *distributed generation* dari beban 80% menjadi 0%. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa tegangan pada beban meningkat sebesar 0,01 p.u ketika daya yang dibangkitkan turbin angin dari 0,08 p.u menjadi 0,3 p.u.

Penelitian yang dilakukan oleh Carenina Zabo, dkk (2010). Tentang Analisa Pengaruh Pemasangan Pembangkit Listrik Terdistribusi Pada Sistem Jaringan Distribusi Terhadap Voltage Sag dengan Pemodelan ATP/EMTP, menyatakan bahwa drop tegangan terbesar di tegangan menengah sebelum dipasang DG sebesar 12.86 % dan yang terletak di ujung jaringan sebesar 13.31 %. Hal ini disebabkan rugi-rugi di sepanjang konduktor di Sedangkan selisih tegangan di tegangan menengah setelah dipasang DG sebesar 1.82 % dari tegangan nominal dan pada tegangan rendah sebesar 1.28 %.

Banyak penelitian yang berkaitan dengan distributed generation dan profil tegangan dengan menggunakan beberapa metode, namun menunjukkan hasil yang sama, yaitu :

- a. Profil tegangan akan semakin meningkat jika semakin dekat dengan beban.
- b. Profil tegangan akan meningkat jika kapasitas distributed generation ditingkatkan.

Hubungan yang telah dibahas di atas sering sekali menjadi pertimbangan dalam menentukan lokasi dan ukuran distributed generation pada jaringan distribusi tenaga listrik. Banyak penelitian tentang distributed generation merekomendasikan mengikuti aturan yang sama ketika menempatkan distributed generation seperti menempatkan kapasitor bank untuk perbaikan profil tegangan pada jaringan distribusi tenaga listrik.

2.1.4.b) Penurunan Susut Daya

Suatu penelitian mengemukakan bahwa, lokasi distributed generation sangat berpengaruh terhadap susut daya pada jaringan tenaga listrik. Disamping itu, peningkatan kapasitas distributed generation berpengaruh terhadap penurunan susut daya pada jaringan distribusi tenaga listrik (Borges dan Falcao, 2003). Penelitian ini mengemukakan bahwa peningkatan jumlah distributed generation dapat meningkatkan efisiensi penyaluran energi pada jaringan distribusi tenaga listrik (Quezada dkk, 2006).

Penelitian yang dilakukan oleh Elias K Bawan (2012) mengenai Dampak Distributed Generation Terhadap Rugi-rugi Daya, mengemukakan bahwa penetrasi DG pada jaringan distribusi menimbulkan dampak positif terhadap jaringan distribusi tenaga listrik. Besarnya pengaruh DG terhadap jaringan distribusi tenaga listrik tergantung pada lokasi penempatan DG, dan kapasitas operasi DG dalam menyuplai daya ke beban. Hal ini dapat dilihat dari hasil penelitiannya menyatakan bahwa penetrasi DG pada lokasi BUS 77 (dengan panjang 65% dari

GRID) dan kapasitas operasi DG yaitu 85% rugi-rugi daya turun sebesar 58,6% yang semula nilainya 240,15 KW menjadi 99,4 KW

2.1.4.c) Peningkatan Keandalan

Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengamati peningkatan keandalan jaringan distribusi tenaga listrik dengan adanya distributed generation. Salah satu penelitian menghasilkan, durasi ketidak sediaan daya pertahun (SAIDI) dapat dikurangi, sementara frekuensi daya pertahun (SAIFI) hanya sedikit penurunan dengan menerapkan distributed generation pada suatu jaringan distribusi tenaga listrik (Bollen dkk, 2005). Penelitian lain tentang tentang automatic sectionalizing switching device (ASSDs) yang digunakan dalam international islanding dapat mengurangi gangguan sistem hingga 90% dan durasi gangguan hingga 82% pada suatu jaringan tenaga listrik (Pilo dan Celli, 2004). Penelitian lain mengungkapkan distributed generation hanya sedikit berpengaruh terhadap frekuensi ketidakersediaan daya per tahun, tetapi dapat memiliki dampak yang signifikan terhadap durasi ketidakersediaan daya per tahun (Freitas dkk, 2005).

Penelitian yang dilakukan oleh I Made Nusaman, dkk (2015), mengenai analisis pengaruh penetrasi DG (PLTSA Sawung) terhadap keandalan dan keandalan jaringan distribusi tepatnya di penyulang serangan, penelitian ini mengungkapkan bahwa terjadi perbaikan nilai indeks keandalan dan penurunan besar rugi-rugi daya. Penelitian ini juga mengaitkan penempatan DG guna mengetahui performance operasi terbaik DG. Penerapan optimasi penempatan terbaik DG penelitian ini menghasilkan nilai rugi-rugi daya turun sekitar 11% atau sebesar 4,5 KW begitupun juga halnya pada SAIFI nilainya turun menjadi 0,1 gangguan/pelanggan/tahun dan nilai SAIDI turun menjadi 1,41 jam/pelanggan /tahun. Jadi penelitian ini memperlihatkan bahwa DG yang optimal pengaruhnya yaitu DG yang berlokasi paling dekat dengan pusat beban dan yang jumlah pelanggannya lebih besar.

Penelitian yang dilakukan oleh Wahri Sunanda (2013) tentang perbaikan keandalan sistem melalui pemasangan distributed generation. menyatakan bahwa

keandalan sistem maupun indeks keandalan setiap beban) dapat ditingkatkan dengan pemasangan *distributed generation* (DG). Besar peningkatan keandalan sistem juga ditentukan berdasarkan lokasi pemasangan *distributed generation* (DG) pada jaringan distribusi tenaga listrik.

1.2. Dasar Teori

Dalam penelitian ini, penulis melakukan analisis berdasarkan teori-teori yang berasal dari buku, jurnal atau sumber lainnya yang diakui kebenarannya. Namun dalam melakukan analisis dan perhitungan, penulis juga membandingkan hasil penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian ini, guna mengatasi kemungkinan kesalahan dalam proses dan hasil analisis dan perhitungan.

2.2.1 Potensi Energi Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Sampah

2.2.1.a) Gambaran Umum Sampah

Pengetian sampah cukup kompleks namun menurut Tchobanoglous et al., (1993) menyatakan bahwa sampah merupakan bahan buangan yang tidak dipakai atau tidak lagi bermanfaat bagi pemilik atau penghasilnya yang berasal dari aktifitas manusia, hewan, industri, dan sebagainya yang bentuknya padat, cair, semi padat, gas. Dalam pengelompokannya buangan berupa gas dan cair disebut emisi. Salah satu penghasil emisi yang sangat besar yaitu sampah yang bentuknya berupa gas metan. Gas metan jika tidak ditanggulangi dan dimanfaatkan secara baik maka akan menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan terutama penipisan lapisan Ozon yang perannya sangat vital dalam permasalahan pemanasan global. Menurut jenisnya sampah di Indonesia terbagi atas 3 yaitu organik, anorganik, dan B3. Porsi persentase sampahnya berbeda antara satu daerah dengan daerah lain, namun nilai rata-ratanya dapat diprediksi 70% adalah sampah organik, 28% sampah anorganik, dan 2% sampah lain-lain seperti B3 yang memerlukan pengolah khusus. Karena dominasi sampah organik yang sangat signifikan maka sangat potensial dimanfaatkan untuk produksi biogas dan pupuk kompos.

Menurut (Wardhana, 1995) penanggulangan permasalahan sampah tidak cukup hanya dengan penyediaan TPA, karena produksi sampah secara kontinu diproduksi oleh aktifitas-aktifitas makhluk hidup sehingga volume terus

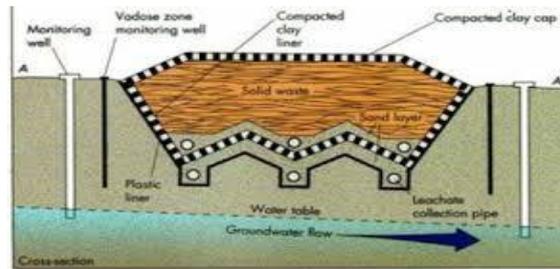
meningkat dan menimbulkan terjadinya penumpukan sampah di TPA. Untuk itu perlu adanya pemrosesan lebih lanjut guna mengurangi volume dan menjadikan sampah sebagai suatu potensi yang menguntungkan seperti pembuatan pupuk kompos dan pemanfaatan gas metan dari sampah organik.

2.2.1.b) Mekanisme Pengelolaan Sampah

Pada prakteknya, pengelolaan sampah yang banyak ditemui hanya terdiri dari proses pengumpulan sampah dari pemukiman atau sumber sampah lainnya, pengangkutan, dan pembuangan sampah di Tempat Penampungan Sementara (TPS), dan akhirnya pembuangan di Tempat Pemrosesan Akhir (TPA). Pengelolaan sampah di perkotaan dilakukan oleh pemerintah masing-masing daerah. Namun tidak jarang karena keterbatasan kemampuan Pemerintah Daerah ataupun karena terdapat hal-hal lain yang lebih menjadi prioritas, pengelolaan sampah di perkotaan menjadi terabaikan. Jika pengelolaan sampah tidak dilakukan dengan baik, maka keberadaan sampah perkotaan, yang memiliki jumlah yang besar tersebut, memungkinkan dapat menimbulkan berbagai dampak. Selain dampak lingkungan dan kesehatan, keberadaan sampah yang tidak dikelola dengan baik juga dapat berpengaruh secara tidak langsung pada aspek sosial.

2.2.1.c) *Sanitary Landfill*

Adalah pengelolaan sampah terpadu yang didesain untuk mencegah perembesan lindi kedalam tanah. Dasar TPA dipasang *liner* dan *geomembrane* yang berfungsi untuk mencegah lindi merembes kedalam tanah (Bagchi, 1994). Di TPA sampah akan mengalami dekomposisi oleh mikroba yang mengakibatkan perubahan fisik-kimia secara simultan, dengan menghasilkan lindi. Menurut Bagchi (1994), faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas lindi adalah komposisi sampah, umur *landfill*, kadar air sampah dan kadar oksigen. Kualitas oksigen juga dipengaruhi oleh umur *landfill*. Secara umum, konsentrasi polutan yang terkandung pada tahun pertama lebih rendah dari tahun-tahun berikutnya dan mencapai puncak setelah beberapa tahun selain itu, kualitas ini juga dipengaruhi pertumbuhan bakteri dan reaksi-reaksi kimia yang berlangsung. Berikut ini adalah sistem *sanitary landfill* yang sering digunakan.



Gambar 2.2. Sistem *Sanitary Landfill*

Sumber: <http://seagrant.uaf/nasb/paper/2004/selawik.landfill.html>

Tujuan mendasar dari pelaksanaan sistem ini adalah untuk melindungi air tanah supaya tidak terkontaminasi oleh lindi. Agar landfill dapat berfungsi dengan baik, elemen-elemen strukturnya harus dirancang dengan tepat dan sesuai standar. Lapisan yang harus ada pada sebuah landfill adalah lapisan dasar tanah, lapisan clay linier, geomembran, pipa pengumpul lindi, konstruksi lapisan drainase, konstruksi lapisan tertutup serta kolam-kolam pengolah lindi.

Diantara sistem pengolah sampah di TPA, yang paling penting adalah teknik *capping* (menutup) lahan. *Capping* lahan penting untuk memahami bahwa rencana sistem pengembangan termasuk sebuah tutup (*cap*) semi-impermeable untuk memungkinkan terjadinya penyerapan kelembapan. Diperkenalkan aturan baru di seluruh dunia yang menyatakan bahwa lahan TPA harus dilapisi atau ditutup dengan membran mencegah lepasnya gas LPG ke udara. Saat ini, lahan TPA merupakan salah satu kontributor produksi metan utama dan permasalahan gas rumah kaca di seluruh dunia.

2.2.1.d) Landfill Gas (LFG)

Anonim menyatakan bahwa landfill gas (LFG) adalah gas yang dihasilkan dari fermentasi atau anaerobik dari bahan-bahan organik, seperti kotoran manusia, kotoran hewan, limbah domestik, limbah pertanian, limbah perkebunan dan lain-lain kandungan utama dalam *LFG* adalah gas Metan (CH_4) dan Carbon Dioksida (CO_2).

Gas landfill didapat dari penimbunan sampah padat yang menguap didalam landfill. Agar produksi gas maksimal, maka sampah ditimbun dan dipadatkan secara mekanik agar sampah tertutup dan tidak ada udara dalam proses penguraiannya, dengan kata lain, Sampah dalam kondisi padat seperti

ternetuk secara anaerob. Oleh sebab itu, gas landfill didefenisikan sebagai gas hasil oleh sampah padat yang ditimbun secara padat agar proses anerob dapat berlangsung. Jika gas ini tidak dimanfaatkan maka beberapa hal negatif yang ditimbulkan yaitu:

1. Jika kandungan gas metan tidak lepas maka sangat rawan terjadinya ledakan.
2. Gas metan yang dihasilkan dari sampah menyebabkan dampak tidak baik yaitu memicu terjadinya pemanasan global, besar pengaruhnya yaitu 21 kali lebih besar dar CO₂ dalam massa yang sama.
3. Dapat menyebabkan *photochemical smog* jika material organiknya terlepas.

Hamburg (1988) menyatakan bahwa LPG yang dihasilkan oleh pembusukan bahan organik dengan cara anaerobik merupakan campuran gas-gas. Komposisi gas yang dihasilkan tergantung pada bahan yang dicerna (bahan baku sampah),kemampuan penampung pengolahan, keadaan kesehatan untuk makhluk pencerna, dan berbagai parameter lainnya, seperti suhu, kelembaban, kadar air, keasaman, perbandingan karbon/nitrogen,dll. Untuka gas yang berasal dari landfill, biasanya memiliki kosentrasi sebesar 60% untuk gas metana (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), berikut gas yang dihasilakandar landfill dengan proses anaerobik :

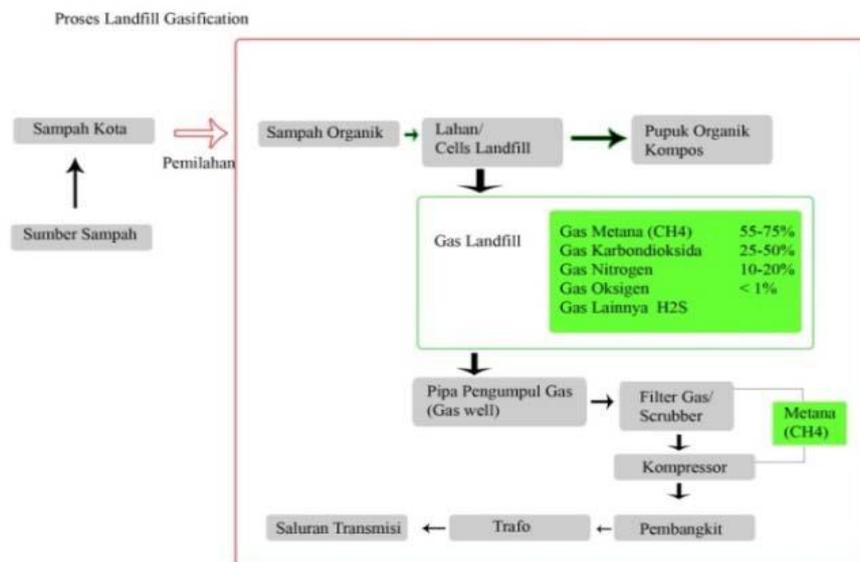
Tabel 2.1. Kandungan Gas *Landfill*

Komponen	Kandungan Gas %
Metan	45-60
Karbon Dioksida	40-60
Nitrogen	2,0-5,0
Oksigen	0,1-1,0
Amonia	0,1-1,1
Hidrogen	0-0,2
Karbon Monoksida	0-0,2

Sumber : tchobanglous, 1993

Zietman (2003) menyatakan gas metana berasal dari pembusukan sampah padat dalam suatu pengolahan. Sedangkan menurut (H. Insam a, B. Wett, 2007 Lenny Bernstain Gary Yohe, dkk, 2007) gas metana merupakan gas rumah kaca (GRK) yang menyumbang pemanasan global 21 kali lebih besar dari karbon diokasida. Oleh karena itu harus dikurangi emisinya dengan cara ditangkap atau diekstraksi untuk dijadikan CO₂ dengan cara flaring maupun dijadikan bahan bakar pembangkit listrik.

2.2.1.e) Proses Terbentuknya *Landfill Gass* (LFG)



Gambar 2.3. Proses Terbentuknya LFG dan Energi Listrik
Sumber : Kukul Siwi Kuncoro, 2010

Hadi (2000) menyatakan bahwa sampah yang terdapat dalam landfill akan mengalami proses biologi, kimiawi, fisik pada reaksi biologis. Bahkan organik diubah kedalam bentuk cairan. Proses penguraian secara aerobik akan berlangsung dalam waktu yang dekat sampai oksigen yang tersedia mengalami penurunan. Selama penguraian aerobik dihasilkan gas CO₂ kemudian terjadi penguraian aerobik dimana bahan organik diubah menjadi CO₂, CH₄, amoniak, dan hidrogen sulfida.

Proses kimiawi yang terjadi pada landfill yaitu terlutnya kembali hasil penguraian secara biologis bersamaan dengan senyawa lain, terutama senyawa

organik. Sedangkan perubahan fisik terjadi pada landfill yaitu penyebaran gas-gas yang terbentuk kelingkungan.

Tchnobanologlous et al (1993) menyebutkan bahwa pembuangan sampah pada *landfill* akan menghasilkan gas maupun air lindi (*leachate*) sebagai output. Gas yang terdapat pada landfill meliputi gas metan (CH₄), karbondioksida (CO₂), karbonmonoksida (CO), amoniak (NH₃), nitrogen (N₂), hidrogen sulfida (H₂S), dan oksigen (O₂). Dari beberapa gas yang dihasilkan di landfill, gas metan (CH₄), dan karbondioksida (CO₂) dihasilkan melalui proses anaerobik..

Proses *anaerobic* ini berlangsung dalam empat tahap sebagai Berikut (Sidik, 2008 dan Sudradjat, 2006).

1. Proses *Hydrolysis*

Yaitu proses dekomposisi yang disebabkan oleh kelompok bakteri anaerob yang sifatnya fakultatif contohnya bakteri *lipolytic*, bakteri *cellulolytic*, bakteri *protolytic*. Dekomposisi dapat membentuk bahan organik polimer seperti lemak, protein, dan karbohidrat menjadi monomer seperti glukosa, asam lemak, dan asam amino yang semuanya bersifat mudah larut.

2. Proses acidogenesis

Proses ini adalah proses kelanjutan dari *hydrolysis*, dalam proses ini juga alkohol dan asam-asam organik dibentuk dengan cara dekomposisi monomer organik. Monomer yang sifatnya mudah larut diproses lebih lanjut menjadi asam laktat, ammonia, profiat, butir, format, asetat. Selain asam juga dihasilkan CO₂, H₂, dan etanol. Senyawa ini semua dibentuk dari asam organik.

3. Proses *acetogenesis*

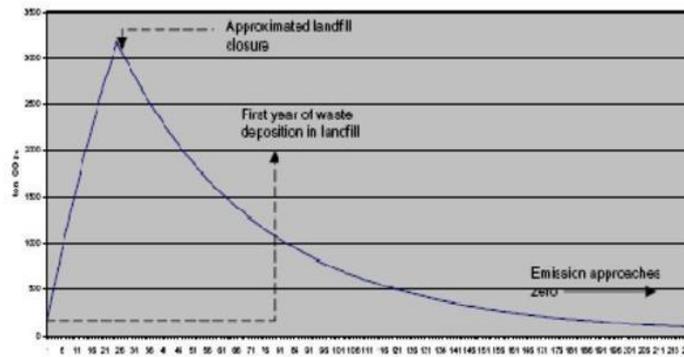
Pada proses ini asam asetat dibentuk, prosesnya yaitu membentuk asam format, asetat, CO₂, dan H₂ dari senyawa asam organik dan etanol.

4. Proses *methanogenesis*

Proses ini menghasilkan gas metan dari asam asetat yang dibantu oleh mikroorganisme *methanogenesis*. Proses ini dapat dilakukan secara fermentasi dan menggunakan H₂ untuk mereduksi CO₂ menjadi CH₄.

Reaksinya seperti berikut:

$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ ini adalah proses fermentasi, dan $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ untuk proses penggunaan H_2 oleh methanogen guna membentuk CH_4 .



Gambar 2.4. Kecenderungan Pembentukan Gas pada *Landfill*
Sumber: Lou, 2008

Dari gambar 2.4, dapat diketahui kecenderungan gas yang dihasilkan oleh *landfill* akan terus menurun, hal ini dikarenakan sampah yang diurai oleh mikroorganisme *methanogenesis* sudah mulai habis dan membusuk. Sampah yang paling cepat menghasilkan gas adalah sampah organik, karena lebih cepat busuk dan menghasilkan gas dibandingkan dengan sampah non organik. Oleh karena itu, jumlah sampah organik sudah mulai berkurang karena sudah membusuk, dan gas metana yang dihasilkan akan masih ada namun dengan jumlah yang sedikit.

Reeynold (1982) menyebutkan bahwa pengolahan anaerobik merupakan proses biologis dimana senyawa organik diubah menjadi sel baru, energi, dan gas seperti metan (CH_4), karbondioksida (CO_2) oleh aktivitas bakteri anaerobik (bakteri yang hidup tanpa udara) dan bakteri fakultatif. Pembentukan gas dari proses anaerobik yang dipengaruhi oleh aktivitas bakteri metanogenik, selain itu dipengaruhi pula oleh kondisi lingkungan yang ada disekitarnya.

Tenderson (2003) menyebutkan bahwa kondisi lingkungan yang mempengaruhi terbentuknya gas metan diantaranya adalah Karakteristik sampah organik, pH (6,8-8,0), kadar air, optimalnya kadar air dalam sampah sebesar 60%, kelembaban, temperatur, alkalinitas yang cukup, konsentrasi asam volatil dan toksisitas.

Damanhuri (1993) menyebutkan bahwa gas metan yang dihasilkan oleh sampah dengan temperatur 370C adalah sebesar 40% dari semua gas yang dihasilkan oleh sampah, dibandingkan dengan temperatur sebesar 200C, yang hanya menghasilkan gas kurang dari 9%. Perlakuan optimasi temperatur pada temperatur 370C (mesofilik) ternyata mampu meningkatkan potensi gas pada sampah kota dari TPA (Apriliani, 2005).

Beberapa keuntungan pengolahan sampah secara anaerobik adalah sebagai berikut:

- a. Produksi lumpur (*sludge*) dalam jumlah yang kecil dan stabil, hal ini disebabkan karena sebagian besar atau sebesar >90% bahan (sampah) adalah organik yang akan menghasilkan gas metan, dimana gas metan merupakan sumber energi.
- b. Tidak membutuhkan transfer oksigen, karena proses anaerobik dilakukan oleh senyawa yang hidup tanpa oksigen (udara).
- c. Proses anaerobik menghasilkan gas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi, yaitu gas metan.

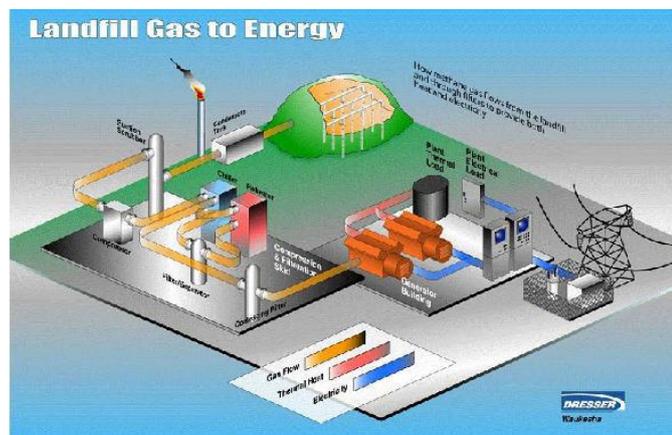
Sementara itu, Lou dan Nair (2008) ahwa produksi gas yang berasal dari *landfill* merupakan kontributor yang cukup signifikan terhadap peningkatan pemanasan global. Gas yang terbentuk dari *landfill* akan terus terbentuk seiring dengan adanya aktivitas-aktivitas dekomposisi (penguraian) yang ada pada *landfill*. Dari tahun ke tahun setelah *landfill* ditutup, semakin lama umur suatu *landfill*, maka produksi gas yang terbentuk dari *landfill* akan terus berkurang.

2.2.1.f) Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

Beberapa jenis pembangkit listrik dapat dibedakan atas dasar bahan baku yang digunakan untuk menggerakkan generator maupun turbinnya. Oleh karena itu, setiap jenis pembangkit dinamakan berdasarkan jenis bahan baku yang digunakan baik bahan bakar fosil maupun energi baru terbarukan. Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa), sama halnya dengan pembangkit yang lain. Namun yang membedakan jenis pembangkit ini adalah dengan menggunakan gas. Dimana, gas ini berasal dari sampah yang mengalami penguraian secara alami dengan proses anaerobik. Gas ini merupakan gas yang secara alami dimiliki oleh

setiap sampah dengan jenis organik. Sehingga pembangkit ini dinamakan pembangkit listrik tenaga sampah.

PLTSa ini adalah pembangkit yang menggunakan gas dari *landfill* hasil dekomposisi sampah, yang kemudian akan dimanfaatkan gas metana yang terkandung didalamnya sebagai bahan bakar generator (*gas engine*), yang kemudian akan menghasilkan listrik. Berikut adalah skema proyek pemanfaatan LFG untuk pembangkit listrik:



Gambar 2.5. Proyek Pemanfaatan LFG untuk Pembangkit Listrik
Sumber: LFG Energy Project Development Handbook EPA, 2010

Dalam proyek pada gambar 2.5, gas menerima beberapa proses sebelum nantinya akan digunakan sebagai bahan baku pembangkit listrik. Gas yang dihasilkan oleh *landfill* (LFG) melalui proses anaerobik, kemudian gas ditangkap oleh sumur gas dan dibantu untuk dinaikkan ke permukaan dengan menggunakan blower. Selain gas, output yang dihasilkan dalam proses tersebut adalah air lindi (*leachate*). Dengan adanya lapisan geomembran didalam *landfill*, maka air lindi tidak akan mencemari tanah maupun air tanah yang kemudian air lindi dialirkan menuju tempat *evaporator* air lindi melalui pipa-pipa yang telah disediakan.

2.2.1.g) Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

Saat ini gas pada *sanitary landfill* (LFG) belum dimanfaatkan secara optimal. LFG yang terdapat pada *sanitary landfill* hanya terbuang cuma-cuma ke atmosfer, padahal LFG sendiri memiliki potensi yang besar untuk meningkatkan efek pemanasan global karena kandungan yang terdapat didalamnya seperti CH₄ dan CO₂. Menurut (LFG Energy Project Development Handbook EPA, 2010),

terdapat beberapa pemanfaat gas lahan TPA. Secara umum, pemanfaat gas lahan TPA dapat dilakukan sebagai pengganti bahan bakar kendaraan, digunakan sebagai komponen rumah kaca, digunakan untuk aktivitas yang memerlukan banyak energi seperti pembuatan logam dan penempaan, hingga pembuatan bioetanol. Selain itu, LFG dapat digunakan untuk menghasilkan listrik.

Setelah dilakukan beberapa penelitian dan perkembangan teknologi, ternyata diketahui bahwa gas CH₄ yang terkandung pada LFG dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk menjalankan mesin generator yang dapat menghasilkan listrik. Beberapa teknologi digunakan untuk menghasilkan listrik dari bahan bakar LFG. Yaitu:

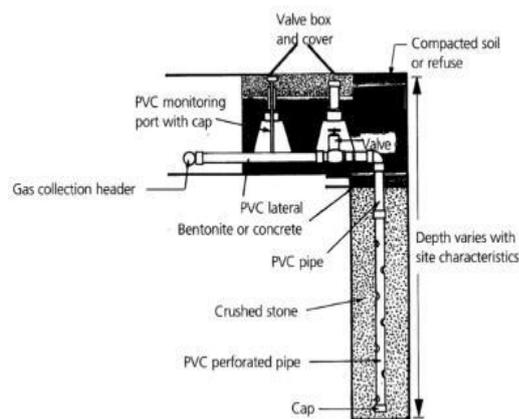
1) Vertical extraction wells (sumur gas vertical)

Pada instalasi pipa penangkapan gas *landfill*, teknologi yang mulai dikembangkan adalah dengan menggunakan sumur gas *vertical*. Sumur gas *vertical* ini berada dalam *landfill*, sumur gas ini ditanam di dalam *landfill*. Instalasi pipa ini digunakan cara pengeboran langsung ditempat pembuangan akhir. Pipa tersebut dengan kedalaman kurang lebih 15 meter, ini bisa disesuaikan dengan kedalaman masing-masing *landfill* yang ada. Hal ini dikarenakan fungsi dari pipa tersebut adalah untuk mengoleksi gas yang telah dihasilkan oleh *landfill*. Oleh karena itu, untuk menjangkau semua gas yang ada di dalam *landfill* tersebut, diperlukan suatu pipa gas yang mampu mencapai dasar dari *landfill*.

Selain itu, pipa atau Sumur gas *vertical* ini memiliki pori-pori dibawahnya, yaitu sekitar 3 meter dari atas *landfill*. Pori-pori ini yang digunakan untuk menghisap semua gas-gas yang telah dihasilkan *landfill*. Melalui pori-pori ini, gas tersebut dihisap dan masuk kedalam pipa, kemudian disalurkan menuju sistem perpipaan yang telah disediakan untuk kemudian menuju *power house*. Pori-pori ini diasumsikan 3 meter dibawah permukaan *capping* bagian atas, karena sumur gas *vertical* ini akan menyerap gas dari hasil *landfill*. Oleh karena itu untuk meminimalisir tercampurnya gas *landfill* dengan gas-gas yang tidak diharapkan seperti oksigen (O₂) dan juga air, maka pori-pori tersebut terdapat 3 meter dari atas permukaan *capping* bagian atas sampai didasar permukaan *landfill* untuk menjaga konsentrasi gas CH₄ yang akan dihasilkan. Sedangkan, proses

instalasi pipa tersebut memiliki jarak sekitar 30 meter antar pipa. Hal ini didasari pada kapasitas atau kemampuan pipa tersebut dapat menghisap gas *landfill* dengan jarak sekitar 30 meter disekitarnya. Oleh karena itu, pipa-pipa tersebut terpasang setiap 30 meter antar pipa untuk mengoptimalkan kinerja dari pipa tersebut.

Pada *landfill* terdapat beberapa sumur gas (sumur bor), antar sumur dihubungkan dengan jaringan pipa. Konsentrasi gas CH₄ pada jaringan pipa utama diharapkan dapat >50%. Untuk keperluan mengendalikan gas yang akan masuk ke dalam sistem pembangkit, masing masing pipa sumur dipasang stop kran. Ini digunakan untuk dapat mengatur berapa banyak gas yang dapat dialirkan kedalam sistem pembangkit listrik.



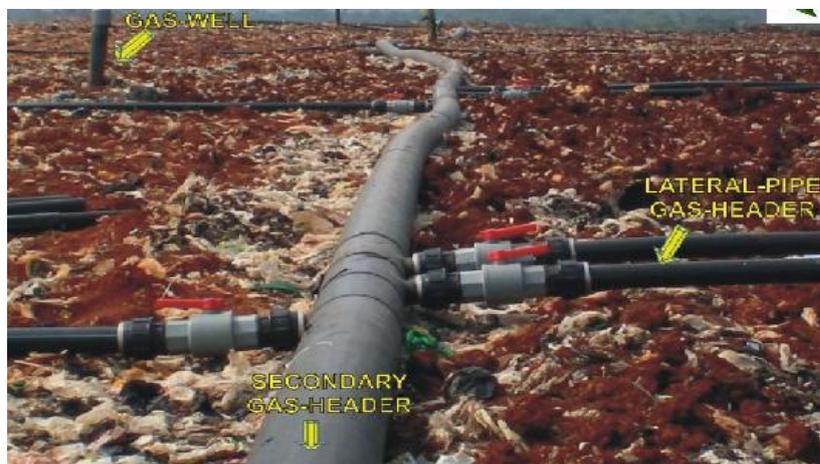
Gambar 2.6. Jenis Pipa untuk Sumur Gas di *Landfill*
Sumber: Jacobs (2007)

Untuk mengetahui atau mengukur tekanan gas yang terdapat di pipa sumur gas, di berikan alat yang *flow meter*. Selain itu operasi ekstraksi gas dapat dimaksimalkan dengan pemasangan alat penghisap seperti pompa vakum dan kompresor kompresor di ujung saluran sebelum gas metan diinputkan ke turbin. Oleh karena itu, dengan adanya sumur ini gas-gas hasil pembusukan sampah akan tersedot dan terkumpul, selanjutnya gas tersebut akan mengalir ke system pemipaan. Disebabkan kandungan air didalam landfill cukup tinggi guna menyertai gas metan.

2) Instalasi pipa pada area *sanitary landfill*

Dari sumur-sumur gas tersebut, diperoleh gas yang akan digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik. Dengan adanya jarak dari area *landfill* dan area *power house*, maka diperlukan sistem pemipaan untuk mengalirkan gas yang diperoleh dari *landfill* menuju area pembangkit listrik (*power house*).

Pipa ini berfungsi untuk mengalirkan LFG dari hasil pembusukan sampah pada *sanitary landfill*. Gas tersebut kemudian dialirkan ke sistem pembangkit listrik (*power house*) untuk kemudian gas-gas tersebut dimanfaatkan sebagai bahan bakar *gas engine*.



Gambar 2.7. Sistem Pemipaan di *Sanitary Landfill*
Sumber: TPST Banter Gebang

Dari gambar 2.8, terlihat sistem pemipaan yang terdapat pada lahan *sanitary landfill*. Yang berfungsi untuk mengoleksi hasil gas dari sumur gas. Yang kemudian gas tersebut dihisap dan naik keatas permukaan *landfill*.

3) *Capping* (penutup *sanitary landfill*)

Menurut aturan diseluruh dunia, menyebutkan bahwa TPA harus dilapisi/ditutup dengan membran yang sesuai. Hal ini digunakan untuk mencegah lepasnya gas *landfill* ke atmosfer dan membuat gas tersebut masuk ke dalam sampah. Dalam melakukan penutupan *landfill* tersebut, juga dilakukan dengan menggunakan tanah merah. Jika *landfill* penuh maka dan tidak mampu lagi untuk menerima sampah, maka *landfill* ditutup dengan tanah lagi, kemudian ditanami rumput maupun pohon di bagian atasnya. Sistem ini akan mengurangi kebocoran

gas pada *landfill*. Selain itu, dikarenakan untuk memperoleh gas metan, dibutuhkan proses dekomposisi (pembusukan dan penguraian) secara *anaerob* yang tidak membutuhkan udara (O_2). Sehingga dengan ditutupnya *landfill* dengan tanah merah akan membuat kondisi di dalam *landfill* akan lembab dan tidak ada udara yang masuk. Sehingga dapat dilakukan proses dekomposisi dengan proses *anaerob* secara alami oleh senyawa *metanogenesis*.

Beberapa *Capping* terbuat dari bahan *geomembran* yang berfungsi untuk mengurung gas di dalam *sanitary landfill* sehingga gas tersebut tidak keluar ke alam bebas, mengurangi bau sampah yang ditimbulkan, dan juga digunakan untuk menahan agar air tidak masuk ke dalam *landfill* untuk meminimalisir terjadinya penyerapan kelembapan di *landfill*. Hal ini dikarenakan untuk mencegah kebocoran pada *landfill* yang akan menyebabkan tercampurnya air dan udara yang mengandung oksigen (O_2) ke dalam *landfill*. Masuknya udara dan air tersebut dapat menyebabkan rusaknya CH_4 karena berinteraksi secara langsung dengan O_2 yang akan menghasilkan CO_2 dan H_2O . Sehingga gas-gas berbahaya dari *sanitary landfill* yang menimbulkan efek rumah kaca (CH_4 dan CO_2) bisa dikendalikan, dan tidak berinteraksi dengan udara dan air yang dapat menyebabkan rusaknya CH_4 yang merupakan bahan bakar utama untuk menghasilkan tenaga listrik.



Gambar 2.8. *Capping*
Sumber: TPST Banter Gebang

Selain itu, *capping* diletakkan di dasar *landfill* yang berfungsi untuk menahan agar air lindi (*leachate*) yang diproduksi oleh sampah yang telah membusuk tidak masuk ke dalam tanah. Hal ini tentunya untuk mengantisipasi adanya pencemaran tanah dan juga air tanah, dengan adanya *capping* ini maka air lindi (*leachate*) tidak akan meresap/masuk ke dalam tanah. Oleh karena itu,

sistem pengelolaan sampah terpadu ini sangat layak untuk dikembangkan karena tidak menimbulkan pencemaran tanah. Sehingga *landfill* tersebut akan menjadi bersih dan sehat yang dapat mengurangi beberapa masalah sosial masyarakat.

4) Condensator (kondensator)

Kondensator adalah alat yang digunakan untuk memisahkan antara gasgas yang telah dihasilkan oleh *landfill* dengan air atau uap air. Karena yang dibutuhkan adalah gas hasil dari *landfill* dan dengan adanya air yang tercampur dari *landfill* maka gas tersebut tidak dapat digunakan untuk bahan bakar listrik. Oleh karena itu, gas tersebut perlu untuk di dipisahkan dengan air yang tercampur. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa gas tersebut menjadi murni gas, dan tidak ada campuran dari air yang terdapat pada *landfill*. Dengan adanya kondensator, gas-gas *landfill* yang bergerak dari sistem perpipaan akan menjadi gas murni yang terdiri dari CH₄, CO₂, Nitrogen, dan O₂.

5) Chiller

Dalam proses operasi produksi gas metan, chiller mempunyai peran penting yaitu sebagai stabilizer saat penurunan temperatur dan tekanan gas, hal ini diperlukan guna mencegah terjadinya ledakan. Chiller melakukan pendinginan terhadap gas saat gas telah dipisahkan dari air yang terkandung dalam *landfill*.

Pada awalnya, suhu pada gas *landfill* mencapai 600C yang sangat berbahaya dan bisa menghasilkan ledakan apabila tidak ditekan atau didinginkan. Suhu gas yang sebesar 600C kemudian di dinginkan dengan menggunakan *Chiller* yang akan menghasilkan suhu gas *landfill* sekitar 230-270C. Suhu tersebut adalah sesuai dengan suhu ruangan, yang tidak berbahaya seperti pada awal gas tersebut dihasilkan. Sehingga dengan suhu yang stabil, gas tersebut dapat digunakan sebagai bahan bakar penghasil listrik dan tidak berbahaya. Alat ini digunakan untuk mendinginkangas dengan suhu 600C menjadi 25-270C.

6) Blower (pengubah tekanan)

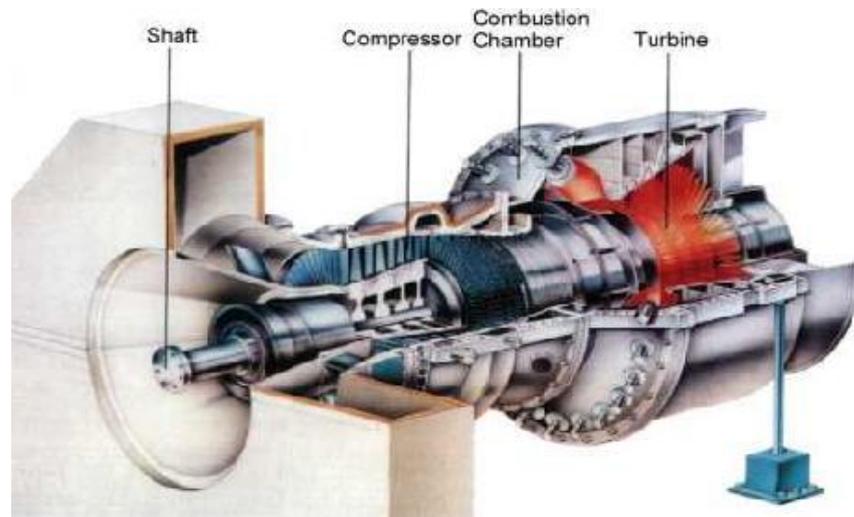
Blower mempunyai fungsi vital dalam memberikan tekanan pada gas-gas hasil penguraian sehingga gas-gas yang dipelukan untuk sistem pembangkitan dapat mengalir ke sistem pembangkit. Blower diperlukan karena sistem pemipaan yang panjang dan memiliki banyak cabang-cabang.

Blower adalah alat yang berfungsi untuk memberikan tekanan kepada gas-gas hasil pembusukan sampah pada *sanitary landfill*. *Blower* menjadi sangat penting karena dengan sistem pemipaan yang sangat panjang, jalur yang sangat rumit, dan juga beberapa material yang ikut tercampur dengan gas-gas yang lainnya. Dengan begitu, *blower* akan mampu untuk menyedot atau menarik gas dan material-material lainnya masuk ke dalam sistem pemipaan dan untuk kemudian dialirkan menuju sistem pembangkit (*power house*).

Menurut fungsi utama dari *blower* sendiri adalah untuk mengalirkan gas dan material-material lainnya dengan lancar ke dalam sistem pemipaan dan sistem *power house*. Selain itu, di dalam *blower* juga terdapat filter yang berfungsi untuk memisahkan air dan gas yang tercampur pada tahap sebelumnya yaitu pendinginan suhu. Hal ini dikarenakan, *blower* merupakan mesin terakhir sebelum gas yang akan digunakan sebagai bahan bakar pembangkit listrik memasuki mesin generator. Oleh karena itu, gas yang akan masuk tersebut menjadi murni gas *landfill*.

7) Pembangkit Listrik Gas Turbine (*Electricity Generation*)

Mesin turbin gas merupakan alat yang digunakan untuk memutar turbin melalui pembakaran internal dengan pemanfaatan gas sebagai bahan bakar. Untuk menghasilkan energi listrik dari gas metan, ada beberapa langkah yang diperlukan yaitu, pertama energi kinetik dalam turbin gas di ubah menjadi energi mekanik dengan memanfaatkan udara bertekanan tinggi dalam turbin untuk menggerakkan poros turbin dan yang kedua energi mekanik dari pergerakan turbin di konversikan menjadi energi listrik oleh generator dengan cara menkopel putaran turbin. Sistem turbin gas memiliki 3 bagian yaitu, kompresor, ruang bakar, dan turbine gas, ini adalah sistem yang sangat sederhana, jika diterapkan sistem yang lebih modern memungkinkan adanya penambahan komponen guna mendapatkan output energi dari turbin yang maksimal. Dalam pemanfaatan LPG, LPG digunakan sebagai bahan bakar untuk memutar turbin. Selain itu gas panas sisa dialirkan ke *recuperator* dan *exhaust heat recovery* untuk keperluan lainnya.



Gambar 2.9. *Turbine Gas Engine*

(Sumber: Sulisty, 2010)

Pada pembangkit jenis ini, nilai efisiensinya adalah berkisar 24-35%. Pemanfaatan turbin gas cocok untuk digunakan pada sistem dengan kebutuhan daya listrik yang besar dan kontinyu. Dan polusi emisi dari mikroturbin yang sebesar 1-10% dari hasil pembakaran gas. Selain itu, mikroturbin ini mampu beroperasi dan membakar dengan kandungan metana pada LFG sebesar 35%.

Dalam melakukan perhitungan jumlah listrik yang dihasilkan mesin tersebut, digunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Jumlah Listrik} = \text{gas metan} \times 9,93 \text{ kWh} \times \text{efisiensi mesin} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana, Menurut (Renewable Energy Conversion, Transmision, And Storage, Bent Sorensen, Juni 2007) bahwa konversi energi gas metan menjadi energi listrik yang didasarkan pada potensi panas yang dimiliki oleh 1 Kg gas metan setara dengan $6,13 \times 10^7$ J, dan 1kWh listrik setara dengan $3,6 \times 10^6$ J, 1m³ gas metan setara dengan 9,39 kWh sehingga konversi gas metan menjadi listrik adalah sebagai berikut:

Tabel 2.2. Data Konversi Energi

Konversi Energi	
1 Kg Gas Metan	$6,13 \times 10^7$
1 kWh	$3,6 \times 10^6$
1 m ³ gas metan	9,39 kWh

Sumber: Sulistyو (2010)

2.2.1.h) Perhitungan Potensi *Landfill Gas* (LFG)

1. Persamaan untuk pehitungan (TS) *total solid*, (VS) *volatile solid* dan produksi biogas dengan proses *anaerob digestion*

Dalam artikel (McDonald Tanya, dkk, dalam Sulistyو, 2010) yang berjudul *feasibility of increased biogas production from the co-digestion of agricultural, municipal, and agro-industrial wastes in rural communities*, menyatakan bahwa saat pengujian produksi biogas berbahan baku sampah organik, diperoleh konvesrsi energi berdasarkan persamaan berikut:

$$M_s = 27,7\% \times Q \dots\dots\dots (2.2)$$

$$M_s = 74,1\% \times T_s \dots\dots\dots (2.3)$$

$$M_{BS} = 0,676 \times M_s \dots\dots\dots (2.4)$$

keterangan:

Q = besar potensi sampah organik (kg/hari)

M_S = total sampah pada (*total solid*) (kg/hari)

M_S = sampah padat yang dapat menguap (*volatile solid*) (kg/hari)

M_{BS} = jumlah produksi biogas(m3/hari)

1. Perhitungan untuk menentukan produksi gas metan

Untuk mengetahui produksi total gas metan yang dijadikan sebagai sumber enrgi primer pada sistem pembangkit listrik maka proses yang diterapkan yaitu penguraian atau reaksi kimia secara *anaerobik digestion*. Besarnya energi

e. Prediksi pertumbuhan energi total

1) Prediksi pertumbuhan penggunaan energi sektor rumah tangga

a) Prediksi Pertumbuhan Penduduk

Untuk menentukan besar pertumbuhan penduduk, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$P_t = P_{t-1}(1 + i) \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan:

- P_t = besar jumlah penduduk pada tahun t;
- P_{t-1} = besar jumlah penduduk pada tahun t-1;
- i = nilai pertumbuhan penduduk berdasarkan data %;
- t = tahun sampel perhitungan

b) Prediksi Pertumbuhan Rumah Tangga

Untuk menentukan besar pertumbuhan rumah tangga, kita dapat menggunakan persamaan berikut:

$$H_t = P_t / Q_t \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan:

- H_t = hasil perhitungan atau data jumlah rumah tangga pada tahun t;
- P_{t-1} = hasil perhitungan atau data jumlah rumah tangga pada tahun t-1;
- Q_t = jumlah penghuni rumah tangga pada tahun ke t.

c) Prediksi Pertumbuhan Pelanggan Rumah Tangga

Dari rasio elektrifikasi dan jumlah rumah maka jumlah pelanggan rumah tangga dapat ditentukan.

d) Prediksi Pertumbuhan Pelanggan Rumah Tangga Tersambung

Untuk menentukan besar pertumbuhan pelanggan rumah tangga tersambung, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

Secara matematis daya yang tersambung pada rumah tangga dinyatakan :

$$VAR_t = VAR_{t-1} + \Delta Pel.R_t * V_R \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

- V_{ATt} = prediksi pertumbuhan pelanggan rumah tangga tersambung tahun t
- V_R = jumlah pertambahan atau pertumbuhan pelanggan rumah tangga

$\Delta \text{Pel.Rt}$ = perubahan atau penambahan pelanggan rumah tangga tahun t

e) Prediksi Pertumbuhan Energi Sektor Rumah Tangga

Untuk menentukan besar pertumbuhan energi listrik sektor rumah tangga , maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\text{UKR}_t = \frac{\{\text{UKR}_{t-1} * (1 + \varepsilon \text{ER} * \text{Gt}/1000)\} * \text{Pel.Rt} + (\Delta \text{Pel.Rt} * \text{UR})}{\text{Pel.Rt}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\text{ER}_t = \text{Pel.Rt} * \text{UKR} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan :

UKR_t = jumlah konsumsi rata-rata tiap rumah tangga tahun t

ER_t = konsumsi energi rumah tangga total tahun ke t

εER = nilai elastisitas pelanggan rumah tangga

Gt = nilai pertumbuhan PDRB pada tahun t

UR = jumlah konsumsi daya listrik sektor rumah tangga baru

2) Prediksi Pertumbuhan Penggunaan Energi Listrik Sektor Bisnis

a) Prediksi Pertumbuhan Pelanggan Sektor Bisnis

Untuk menentukan besar pertumbuhan energi listrik sektor bisnis atau komersil, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Pel.Bt} = \text{Pel.Bt-1} * [1 + \{\varepsilon \text{Pel.B} * (\text{Pel.Bt}/ \text{Pel.Bt-1}) * 100\} / 100] \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan :

Pel.Bt = jumlah pelanggan komersil pada tahun t

Pel.Bt-1 = jumlah pelanggan komersil pada tahun t-1

$\varepsilon \text{Pel.B}$ = nilai elastisitas pelanggan komersil

b) Prediksi Pertumbuhan daya tersambung sektor bisnis

Untuk menentukan besar pertumbuhan daya tersambung sektor bisnis atau komersil, dapat menggunakan persamaan berikut:

$$\text{VABt} = \text{VABt-1} + (\Delta \text{Pel.Bt} * \text{VK}) \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan:

VABt = besar daya tersambung sektor komersil pada tahun t

VABt-1 = daya tersambung sektor komersil pada tahun t-1

$\Delta \text{Pel.Bt}$ = penambahan jumlah pelanggan bisnis pada tahun t

V_B = daya rata-rata tersambung pada tiap-tiap pelanggan sektor komersil

c) Prediksi Pertumbuhan Konsumsi Energi Listrik Sektor Bisnis

Untuk menentukan besar pertumbuhan energi listrik sektor bisnis atau komersil, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$EB_t = EB_{t-1} * (1 + \epsilon_{EB} * GB_t / 100) \dots \dots \dots (2.13)$$

Keterangan:

E_{bt} = jumlah konsumsi energi listrik sektor komersil tahun t

E_{Bt-1} = jumlah konsumsi energi listrik sektor komersil tahun t-1

ϵ_{EB} = nilai elastisitas sektor komersil

GB_t = pertumbuhan PDRB sektor komersil pada tahun t

3) Prediksi Pertumbuhan Konsumsi Energi Listrik Sektor Publik

a) Prediksi Pertumbuhan Pelanggan Publik

Pertumbuhan jumlah pelanggan sektor publik diasumsikan dipengaruhi oleh faktor rasio pertumbuhan pelanggan publik terhadap pelanggan rumah tangga dan nilai elastisitas pelanggan. Untuk menentukan besar pertumbuhan energi listrik sektor publik, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$Pel.U_t = Pel.U_{t-1} * [1 + \{ \epsilon_{Pel.U} * (Pel.U_t / Pel.U_{t-1}) * 100 \} / 100] \dots \dots \dots (2.14)$$

Keterangan:

$Pel.U_t$ = jumlah pelanggan publik pada tahun t

$Pel.U_{t-1}$ = jumlah pelanggan publik pada tahun t-1

$\epsilon_{Pel.U}$ = nilai elastisitas pelanggan publik.

b) Prediksi Pertumbuhan Daya Tersambung Sektor Publik

Untuk menentukan besar pertumbuhan daya tersambung sektor publik, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$VAU_t = VAU_{t-1} + (\Delta Pel.U_t * VU) \dots \dots \dots (2.15)$$

Keterangan :

VAU_t = besar daya tersambung sektor publik pada tahun t

VAU_{t-1} = besar daya tersambung sektor publik pada tahun t

$\Delta Pel.U_t$ = pertumbuhan pelanggan publik pada tahun t

VU = nilai rata-rata daya per pelanggan sektor publik

c) Prediksi Pertumbuhan Penggunaan Energi Listrik Sektor Publik

Untuk menentukan besar penggunaan energi listrik sektor publik, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$EU_t = EU_{t-1} * (1 + \epsilon_{EU} * GU_t / 100) \dots \dots \dots (2.16)$$

Keterangan:

EU_t = penggunaan energi listrik sektor publik pada tahun t

EU_{t-1} = penggunaan energi listrik sektor publik pada tahun t-1

ϵ_{EU} = nilai elastisitas pelanggan sektor publik

GU_t = nilai pertumbuhan PDRB sektor industri pada tahun t

4) Prediksi Pertumbuhan Penggunaan Energi Listrik Sektor Industri

a) Prediksi Pertumbuhan Jumlah Pelanggan Sektor Industri

Untuk menentukan besar pertumbuhan jumlah pelanggan sektor industri, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$Pel.It = Pel.It-1 * (1 + \epsilon_{Pel.I} * GI_t / 100) \dots \dots \dots (2.17)$$

Keterangan :

$Pel.It$ = jumlah pelanggan sektor industri pada tahun t

$Pel.It - 1$ = jumlah pelanggan sektor industri pada tahun t-1

$\epsilon_{Pel.I}$ = nilai elastisitas pelanggan sektor industri

GI_t = besar pertumbuhan PDRB sektor industri.

b) Prediksi Pertumbuhan Daya Tersambung Sektor Industri

Untuk menentukan besar pertumbuhan besar daya tersambung sektor industri, maka dapat menggunakan persamaan berikut:

$$VAIt = VAIt-1 + \Delta Pel.It * V_{it} + VKBt + VCTOt \dots \dots \dots (2.18)$$

Keterangan:

$VAIt$ = besar nilai daya tersambung sektor industri pada tahun t

V_{it} = besar konsumsi daya rata-rata per pelanggan sektor industri pada tahun t

$\Delta Pel.It$ = besar pertumbuhan pelanggan sektor industri pada tahun t

$VKBt$ = besar daya tersambung baru pada konsumen besar pada tahun t

$VCTOt$ = besar daya kapasitif sektor industri pada tahun t

Dala penelitian ini, diasumsikan nilai daya *captive* tidak ada.

c) Prediksi Pertumbuhan Penggunaan Energi Listrik Sektor Industri

Energi terjual dan *captive power* sektor industri digunakan untuk memperkirakan berapa besar pertumbuhan energi listrik sektor industri. *Captive power* disebut juga energi yang dibangkitkan oleh industri itu sendiri atau terpisah dengan jaringan dari PLN, perkiraan penggunaan energi listrik sektor industri dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$E_{it} = E_{it-1} * (1 + \epsilon_{EI} * G_{it} / 100) + ECTO_t \dots \dots \dots (2.19)$$

Keterangan :

E_{it} = besar penggunaan energi listrik sektor industri pada tahun t

E_{it-1} = besar penggunaan energi listrik sektor industri pada tahun t-1

ϵ_{EI} = nilai elastisitas energi listrik sektor industri

G_{it} = besar penambahan jumlah PDRB sektor industri pada tahun t

$ECTO_t$ = jumlah *captive power* yang dikonsumsi PLN pada tahun t.

Parameter $ECTO_t$ dalam persamaan ini dianggap tidak ada atau diabaikan karena *captive power* dianggap tidak ada, oleh karena itu sektor industri secara keseluruhan dilayani oleh PLN.

5) Prediksi Pertumbuhan Penggunaan Energi Listrik Total dari Semua Sektor

Prediksi pertumbuhan penggunaan energi listrik total dapat ditentukan dengan menjumlahkan hasil prediksi penggunaan energi listrik sektor rumah tangga, bisnis, komersil, industri.

$$E_{tt} = E_{R_t} + E_{B_t} + E_{U_t} + E_{it} \dots \dots \dots (2.20)$$

Keterangan :

E_{tt} = jumlah total penggunaan energi listrik pada tahun t

E_{R_t} = jumlah penggunaan energi listrik sektor rumah tangga pada tahun t

E_{B_t} = jumlah penggunaan energi listrik sektor bisnis pada tahun t

E_{U_t} = jumlah penggunaan energi listrik sektor umum pada tahun t

E_{it} = jumlah penggunaan energi listrik sektor industri pada tahun t

6) **Prediksi Besar Beban Puncak kaitannya terhadap Pertumbuhan Permintaan Daya Listrik Surakarta**

Prediksi permintaan energi listrik dari PLN adalah jumlah total energi yang terjual atau yang dibutuhkan dan rugi-rugi daya pada tahun tertentu, untuk memprediksi kebutuhan energi listrik dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$PT_t = ET_t + Set \dots\dots\dots (2.21)$$

Keterangan :

PT_t = jumlah total penggunaan energi listrik pada tahun t

ET_t = jumlah total penggunaan energi listrik pada tahun t

SE_t = besar susut energi listrik pada tahun t

Untuk beban puncak dapat menggunakan persamaan berikut:

$$BP_t = PT_t / (FB_t * Jot) \dots\dots\dots (2.22)$$

Keterangan :

BP_t = besar beban puncak pada tahun t

PT_t = nilai total produksi energi listrik pada tahun t

FB_t = faktor beban rata-rata pada tahun t

Jot = jam operasi dalam kurun waktu tertentu.

2.2.3. **Pengaruh Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA) Terhadap Profil Tegangan dan Rugi-rugi daya Jaringan distribusi**

2.2.3.a) **Jaringan Distribusi Primer**

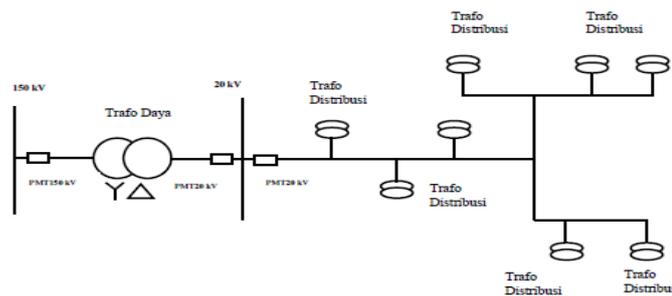
Jaringan distribusi primer adalah jaringan sekundernya GI distribusi hingga ke pelanggan langsung ataupun ke pelanggan tak langsung. Pelanggan tak langsung didefinisikan juga sebagai jaringan 380/320 yang merupakan keluaran atau sekunder trafo distribusi 20 KV/380 V. Jaringan distribusi tak langsung jarang diaplikasikan ke beban perkotaan karena dapat mengganggu frekuensi radio, telekomunikasi yang diakibatkan oleh korona.

Jaringan distribusi mempunyai lingkup yang luas hal itu dapat dilihat dari perbedaan karakteristik dan lokasi jaringan ataupun pelanggan. Dalam hal ini, karakteristik beban dapat dibedakan atas berbagai sektor yaitu, sektor industri, sektor publik, sektor rumah tangga, sektor bisnis. Dari lokasi terlihat perbedaan konfigurasi ataran pusat perkotaan dengan pinggiran kota karena adanya perbedaan

prioritas. Karena karakteristik dan lokasinya yang berbeda maka terdapat konfigurasi jaringan yang berbeda, sehingga dalam hal ini terdapat 4 konfigurasi yaitu sebagai berikut:

1. Konfigurasi Jaringan Radial

Konfigurasi jaringan ini adalah konfigurasi jaringan yang paling sederhana, sehingga dalam investasi ekonomi.

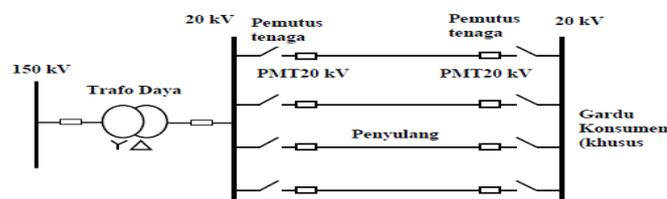


Gambar 2.10. Konfigurasi Jaringan Radial

Sumber: Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatra Utara

Keuntungan konfigurasi ini adalah tidak rumit dan lebih murah, namun kekurangannya dari segi keandalan lebih rendah dibandingkan dengan sistem lain. Keandalan yang rendah disebabkan oleh jaringan hanya disuplai atau disalurkan melalui 1 penyulang utama hingga apabila penyulang utama mengalami gangguan maka sistem dibawahnya akan mengalami pemutusan juga, hal inilah yang menyebabkan kualitas kelistrikan di ujung penyulang tidak baik.

2. Konfigurasi Jaringan Penghubung *Tie line*



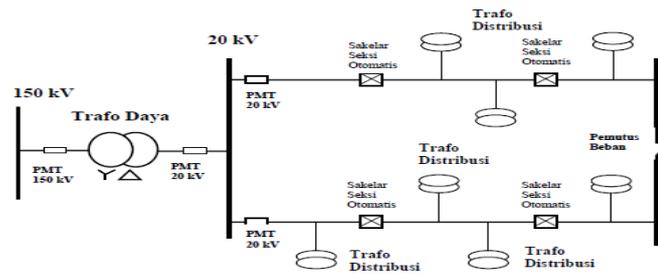
Gambar 2.11. Jaringan Distribusi *Tie Line*

Sumber: Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatra Utara

Konfigurasi jaringan mempunyai beberapa penyulang dan disetiap penyulang terdapat komponen *Automatic Transfer Switch/ Automatic Over*

Switch. Oleh karena itu tingkat keandalan jauh lebih baik dibandingkan konfigurasi jaringan radial karena apabila penyulang 1 mengalami gangguan maka suplai daya dapat menggunakan penyulang lain.

3. Konfigurasi Loop



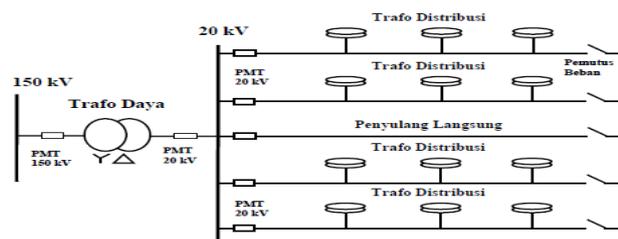
Gambar 2.12. Konfigurasi Sistem Loop

Sumber: Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatra Utara

Konfigurasi jaringan ini relatif lebih baik karena sistem penyaluran daya berbentuk lingkaran, sehingga suplai daya dapat melalui mana saja sesuai kapasitasnya.

4. Konfigurasi Jaringan Spindel

Konfigurasi jaringan spindel merupakan kombinasi konfigurasi jaringan yang mengintegrasikan pola dari sistem radial dengan pola sistem ring



Gambar 2.13. Konfigurasi Sistem Spindel

Sumber: Diktat Sistem Tenaga Listrik Universitas Sumatra Utara

Saat beroperasi sistem jaringan ini beroperasi secara radial namun saat adanya gangguan maka fungsi penyaluran daya diambil alih oleh penyulang cadangan. Pola sistem ini, beban di suplai oleh beberapa penyulang dan hanya terdapat 1 penyulang cadangan .

2.2.3.b) Trafo Distribusi atau Gardu Distribusi

Kapasitas trafo distribusi berbeda-beda karena tergantung pada besarnya beban yang dilayani dan wilayah beban. Gardu distribusi atau trafo distribusi berfungsi menurunkan tegangan guna memenuhi kebutuhan tegangan kerja beban. Dalam aplikasinya trafo distribusi 3 fasa dan 1 fasa banyak digunakan hal ini sesuai karakteristik beban.

2.2.3.c) Jaringan Distribusi Sekunder

Jaringan distribusi ini berhubungan langsung dengan beban karena tegangan jaringan sudah sesuai dengan tegangan kerja beban. Besar tegangan jaringan ini yaitu 380/220, 220 merupakan tegangan fasa ke netral, dan 380 merupakan jaringan fasa ke fasa.

2.2.3.d) Tegangan Jaringan Distribusi

Tegangan jaringan distribusi pada umumnya dapat dibagi menjadi bagian yaitu, tegangan rendah dan tegangan menengah. Tegangan rendah besar tegangan yang paling umum digunakan sebesar 380/220 V tegangan ini dapat langsung diterapkan ke beban. Tegangan menengah yang paling umum digunakan di Indonesia yaitu 20 KV sebelum diterapkan pada beban, besar tegangan 20 KV diturunkan terlebih dahulu ke bentuk tegangan rendah.

2.2.3.e) Drop Tegangan pada Jaringan Distribusi

Drop tegangan didefinisikan sebagai selisih nilai tegangan sumber atau swing bus (pusat DG, GI, gardu hubung). Drop tegangan disebabkan karena adanya resistansi dan reaktansi saluran jaringan distribusi yang dialiri oleh arus listrik. Besarnya kecilnya drop tegangan dipengaruhi oleh beban dan impedansi pada tiap-tiap titik. Untuk persamaan drop tegangan pada saluran dapat digunakan persamaan berikut:

$$\left(\frac{\Delta V}{V_f}\right)\% = (\Delta V)\% \cong \frac{IR\cos\phi + IXL\sin\phi}{V_f} \times 100\% \dots\dots\dots (2.23)$$

$$(\Delta V)\% \cong \frac{S(R \cos \varphi + XL \sin \varphi)}{\sqrt{3}V_j V_f} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

$$(\Delta V)\% \cong \frac{S(R \cos \varphi + XL \sin \varphi)}{V_j^2} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

$$(\Delta V)\% = \frac{SxL(r \cos \varphi + X \sin \varphi)}{V_j^2} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2.26)$$

Dimana:

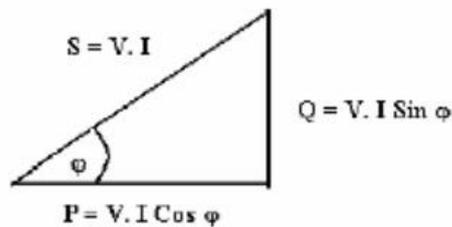
- S = daya semu 3 fasa (MVA)
- P = daya aktif 3 fasa (MW)
- Q = daya reaktif 3 fasa (MVar)
- V_j = tegangan jala-jala (KV)
- r = resistansi per fasa (ohm/km)
- x = resistansi per fasa (ohm/km)
- R = r.L (Ohm)
- X = x.L (ohm)

2.2.3.f) Rugi-rugi daya pada jaringan distribusi

Rugi-rugi daya pada jaringan distribusi disebabkan oleh rugi-rugi saluran dan rugi-rugi trafo. Jenis rugi-rugi daya tersebut menyebabkan penurunan kualitas daya pada pelanggan. Karena kualitas yang kurang baik, peralatan atau beban tidak dapat melakukan fungsinya dengan optimal sehingga sangat perlu adanya regulator untuk meningkatkan atau memperbaiki kualitas kelistrikan di beban. Selain efek di beban, efek finansial juga muncul yang diakibatkan menurunnya energi dan pengolahan jaringan distribusi tenaga listrik.

Daya yang dikirim dari sumber atau *power plant* adalah daya total (KVA). Daya ini disebut juga daya semu yang terdiri dari daya aktif (KW), dan reaktif (KVar). Daya reaktif dalam aplikasinya digunakan untuk menghasilkan medan magnet sedangkan daya aktif dimanfaatkan konversi ke bentuk energi lain, seperti

energi cahaya, panas, suara, dan sebagainya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.15. Diagram Vektor Segitiga Daya

Sumber: <https://www.google.co.id/search?q=vektor+hubungan+daya+aktif+dan+reaktif>

Dari gambar tersebut dapat kita peroleh :

$$kVA^2 = kW^2 + kVar^2 \dots\dots\dots (2.27)$$

$$kW = kVA \cos \phi \dots\dots\dots (2.28)$$

$$kVar = kVA \sin \phi \dots\dots\dots (2.29)$$

Daya listrik pada sistem 3 fasa dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Daya aktif (P)} = V . I \cos \phi \text{ (kW)} \dots\dots\dots (2.30)$$

$$\text{Daya reaktif (Q)} = V . I \sin \phi \text{ (kVar)} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$\text{Daya total (S)} = P + jQ \text{ (kVA)} \dots\dots\dots (2.32)$$

$$S = V . I \cos \phi + j V . I \sin \phi \dots\dots\dots (2.33)$$

1) Rugi-rugi Daya pada Saluran

Penghantar pada jaringan distribusi tenaga listrik memiliki nilai resistansi dan reaktansi atau disebut juga dengan impedansi. Jika arus AC mengalir pada penghantar maka akan mengakibatkan rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya terjadi karena adanya nilai impedansi dari penghantar sehingga sebagian kecil energi pada penghantar mengalami konversi energi ke bentuk energi panas, medan magnet dan sebagainya. Rugi-rugi daya dengan beban terpusat pada ujung penghantar jaringan distribusi primer dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$V = I (R \cos \phi + X \sin \phi) L \dots\dots\dots (2.34)$$

$$P = 3 I^2 x R x L \dots\dots\dots (2.35)$$

Sedangkan jika beban terdistribusi di sepanjang saluran distribusi primer, maka rugi-rugi energi yang timbul adalah :

$$V = (I/2)2 I (R \cos \phi + X \sin \phi) L \dots\dots\dots (2.36)$$

$$P = 3 (I/2)^2 x R x L \dots\dots\dots (2.37)$$

Dimana adalah arus yang mengalir per fasa (Ampere)

R = Resistansi saluran per fasa (Ohm/km)

X = Reaktansi saluran per fasa (Ohm/km)

Cos ϕ = Faktor daya beban

L = Panjang saluran (km)

2) Rugi-rugi Daya pada Transformator

Saat beroperasi, trafo menyebabkan rugi-rugi daya. ada beberapa jenis rugi-rugi daya pada trafo di jaringan distribusi, seperti berikut:

a) Rugi-rugi tembaga

Rugi-rugi tembaga disebabkan oleh adanya resistansi dan reaktansi pada komparan primer dan sekunder trafo. Persamaanya dapat seperti berikut:

$$P_{cu} = I^2 R \dots\dots\dots (2.38)$$

b) Arus Eddy

Rugi-rugi arus eddy adalah rugi-rugi daya karena adanya panas yang terjadi pada bagian inti trafo. Tegangan induksi inti trafo menghasilkan fluks yang berubah-ubah sehingga menimbulkan arus pusar pada inti trafo, arus pusar pada inti trafo mendisipasi energi ke dalam inti besi trafo sehingga menyebabkan panas. Rugi-rugi daya dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B M^2 \dots\dots\dots (2.39)$$

Keterangan:

Pe = rugi-rugi inti

Ke = kostanta eddy

F = frekuensi jaringan (Hz)

BM = kerapatan fluks maksimum (Maxwell/m²).

c) Rugi-rugi Hysterisis

Rugi-rugi hysterisis yaitu rugi-rugi yang diakibatkan adanya medan magnet pada inti trafo, medan magnet ini diatur dengan menggunakan energi. Dalam mengatur medan magnet, rugi-rugi daya akan timbul sehingga menimbulkan panas pada bagian inti trafo. Untuk menentukan besar rugi-rugi daya tersebut, dapat menggunakan persamaan berikut:

$$Ph = Kh \cdot f^2 \cdot BM \dots \dots \dots (2.40)$$

Keterangan:

Kh = nilai konstanta hysterisis

F = frekuensi jala-jala (Hz)

BM = kerapatan fluks maksimum (makswell/m²)

d) Fluks Bocor

Fluks bocor merupakan fluks yang lepas dari bagian inti primer dan sekunder trafo dan fluks mengalir ke belitannya sendiri sehingga menimbulkan *self-inductance* di bagian belitan trafo tersebut.

2.2.3.g) Beban Jaringan Distribusi

Beban merupakan suatu kebutuhan daya listrik dari peralatan yang terhubung pada sistem tenaga listrik untuk menyelesaikan tugas tertentu. Karakteristik beban beban berdasarkan kebutuhan daya dan tegangan yang digunakan secara umum dapat dikelompokkan dalam tiga kategori yaitu (Willis, 2004):

1. Constant power, kebutuhan daya selalu konstan berapapun nilai tegangan yang digunakan. Contoh : motor listrik, apabila terjadi jatuh tegangan maka beban akan menyerap arus yang lebih besar untuk mempertahankan daya yang diperlukan.
2. Constant Impedance, kebutuhan beban selalu menyesuaikan dengan tegangan yang digunakan. Contoh : lampu pijar, apabila terjadi jatuh tegangan maka arus yang diserap akan turun, sehingga daya yang diperlukan juga turun.
3. Constant Current: kebutuhan daya akan sebanding dengan tegangan yang digunakan. Contoh : peralatan las, apabila terjadi jatuh tegangan maka daya yang diperlukan juga turun

Karena jumlah beban yang bersifat *constant current* sangat sedikit, maka dapat diabaikan sehingga dalam melakukan analisis cukup digunakan gabungan antara *constant impedance* dan *constant power* untuk daerah industri 20/80, daerah perkotaan 40/60 dan daerah pedesaan 80/20 atau 10/80 (Willis, 2004).

Beban individu atau kelompok pelanggan sangat berpengaruh terhadap kondisi jaringan distribusi tenaga listrik. Setiap saat peralatan rumah tangga seperti lampu, televisi, AC dan lain-lain dinyalakan dan dimatikan. Perubahan tersebut sangat berdampak terhadap karakteristik beban jaringan distribusi listrik secara keseluruhan. Ada beberapa istilah yang digunakan dalam analisis jaringan distribusi tenaga listrik (Kersting, 2002):

1. *Demand*

Beban rata-rata dalam satuan kW, kVar, kVA, atau A dengan interval waktu tertentu (menit atau jam). Contoh: 100 kw dengan interval waktu 15 menit.

2. *Maximum demand*

Beban tertinggi terjadi selama periode waktu tertentu, yang meliputi interval, waktu dan unit. Contoh: beban maksimum 150 Kw dalam periode waktu sebulan dengan interval waktu pengukuran 15 menit.

3. *Average Demand*

Rata-rata beban dalam periode waktu tertentu (hari, minggu, bulan ataupun tahun) yang dihitung berdasarkan beban rata-rata dalam interval waktu tertentu (menit atau jam). Contoh : beban rata-rata 125 Kw dalam periode 1 bulan dengan interval pengukuran 15 menit.

4. *Load Faktor*

Rasio perbandingan *average demand* dengan *maximum demand* dalam periode waktu yang sama. *Load factor* digunakan untuk menghitung energi yang dikonsumsi dalam waktu tertentu.

2.2.3.h) Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya atau sering disebut *load flow analisis*, merupakan salah satu bagian penting dalam analisis sistem tenaga listrik. Analisis aliran daya sangat diperlukan dalam perencanaan, operasi, monitoring dan evaluasi sistem tenaga listrik. Studi aliran daya bertujuan untuk menghitung besaran dan sudut fase tegangan pada setiap bus, aliran daya dan susut daya baik daya aktif maupun daya reaktif pada saluran.

Berdasarkan besaran yang diketahui, bus dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu (Saadat, 1999):

1. Bus Berayun (*Swing/Slack/Reference Bus*)

Bus berayun merupakan bus yang dijadikan referensi pada perhitungan aliran daya. Bus ini merupakan bus pembangkit yang mempunyai kapasitas terbesar diantara pembangkit yang terpasang pada sistem yang dianalisis. Bus ini berfungsi untuk mengimbangi perbedaan antara besar beban yang dibutuhkan sistem dengan daya yang dibangkitkan karena adanya susut pada jaringan. Parameter yang harus ditentukan pada bus berayun adalah nilai magnitude dan sudut fase tegangan sedangkan nilai daya aktif (P_G) dan daya reaktif (Q_G) yang dibangkitkan dicari melalui perhitungan aliran daya.

2. Bus Beban (Bus PQ)

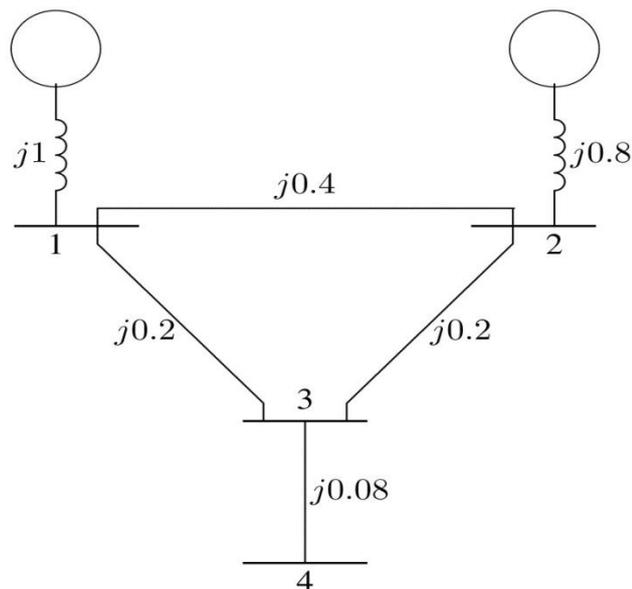
Bus beban adalah bus nilai daya aktif (P) dan daya reaktifnya (Q) telah ditentukan. Pembebanan (daya aktif dan daya reaktif) pada bus ini dianggap konstan. Adapun nilai magnitude tegangan dan sudut fase pada bus ini belum menggunakan asumsi nilai awal, kemudian diproses menggunakan iterasi sampai mendapat nilai konvergen dengan tingkat ketelitian tertentu yang telah ditentukan.

3. Bus Terkendali Tegangan (Voltage Controlled Bus/Bus PV)

Bus terkendali tegangan atau sering juga disebut bus generator adalah bus yang nilai tegangan dan beban aktif nilainya tetap. Nilai sudut fase tegangan dan daya reaktif belum diperoleh dan didapat melalui perhitungan aliran daya. Bus akan menyesuaikan keluaran daya reaktif untuk mempertahankan tegangan. Bus ini digunakan juga untuk mengatur nilai tegangan sistem tenaga listrik secara keseluruhan.

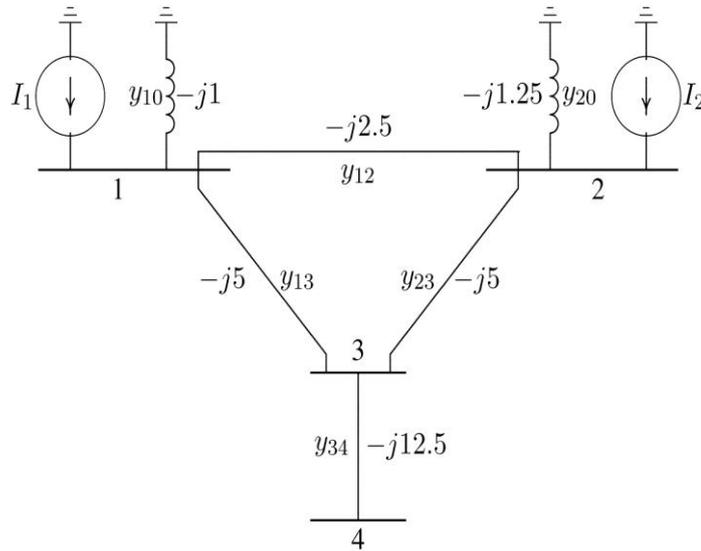
1) Matriks Admitansi

Untuk mendapatkan nilai admitansi, pertama harus menentukan persamaan-persamaan simpul tegangan dari sebuah sistem daya perhatikan contoh gambar 2.18 penyelesaian simpul berdasarkan pada hukum arus Kirchhoff, impedansi diubah menjadi admitansi.



Gambar 2.15. Diagram Impedansi Sistem Sederhana

Sumber : <https://imadudd1n.files.wordpress.com/2015/01/fig6-11.jpg>



Gambar 2.16. Diagram Admitansi Sistem

Sumber: <https://imadudd1n.files.wordpress.com/2015/01/fig6-11.jpg>

Gambar 2.15 menunjukkan nilai impedansi telah diubah menjadi admitansi dan transformasi ke sumber arus. Simpul 0 sebagai referensi. Dengan menerapkan hukum kirchoff arus. Didapat persamaan simpul,

$$I_1 = y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3)$$

$$I_2 = y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3)$$

$$0 = y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4)$$

$$0 = y_{34}(V_4 - V_3)$$

Dibentuk kembali menjadi,

$$I_1 = (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3$$

$$I_2 = -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3$$

$$0 = -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4$$

$$0 = -y_{34}V_3 + y_{34}V_4$$

Maka didapat nilai admittance,

$$Y_{11} = y_{10} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{22} = y_{20} + y_{12} + y_{23}$$

$$Y_{33} = y_{13} + y_{23} + y_{34}$$

$$Y_{44} = y_{34}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -y_{12}$$

$$Y_{13} = Y_{31} = -y_{13}$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -y_{23}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -y_{34}$$

Persamaan simpul menjadi,

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4$$

$$I_3 = Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4$$

$$I_4 = Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.41)$$

Atau disederhanakan menjadi

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \dots\dots\dots(2.42)$$

Dimana:

I_{bus} = vektor arus rel

V_{bus} = vektor tegangan rel yang diukur dari simpul referensi

Y_{bus} = matriks admitansi rel

Bila arus bernilai positif mengalir ke rel, bila arus negatif meninggalkan rel. Pada matriks Y_{bus} elemen diagonal merupakan jumlah admitansi yang terhubung, dinamakan elemen sendiri (*self-admittance*) atau admitansi titik penggerak (*driving point admittance*).

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.43)$$

Elemen-elemen matrik yang bukan elemen diagonal sama dengan negatif admitansi, dinamakan admitansi bersama (*mutual admittance*).

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \dots\dots\dots(2.44)$$

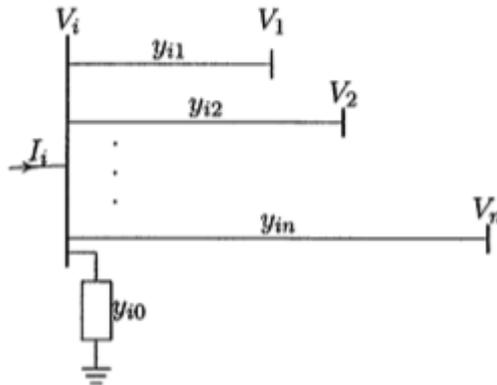
Bila arus rel diketahui, persamaan u bisa diselesaikan untuk tegangan sampai rel ke n.

$$V_{bus} = Y^{-1} I_{bus} \dots\dots\dots(2.45)$$

2) Persamaan aliran daya

Gambar 2.20 menunjukkan saluran model π , dimana impedansi telah diubah ke admitansi per unit pada dasar MVA. Dengan menerapkan hukum kirchoff arus, maka didapatkan,

$$\begin{aligned} I &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_{i1} - V_i) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots\dots\dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots\dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots\dots\dots - y_{in}V_n \\ I_i &= V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots(2.46) \end{aligned}$$



Gambar 2.17. Jenis Bus pada Sistem Tenaga Listrik
 Sumber: Saadat, Hadi (1999)

Daya real dan reaktif pada rel adalah,

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \dots\dots\dots (2.47)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots (2.48)$$

Mensubstitusikan I_i dalam persamaan persamaan k

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} V_j - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.49)$$

2.2.3.i) Analisis Aliran Daya Jaringan Distribusi Menggunakan Metoda Gauss-Seidel

Dari relasi yang dibahas sebelumnya, untuk menyelesaikan masalah aliran beban persamaan yang terbentuk adalah persamaan aljabar *nonlinear* yang mana harus diselesaikan dengan teknik iterasi ada beberapa metode yang bisa digunakan untuk perhitungan aljabar *nonlinear*, namun dalam penulisan ini hanya dibahas metoda gauss-seidel.

Studi aliran beban, perlu untuk menyelesaikan persamaan *nonlinear* untuk dua variabel yang tidak diketahui pada tiap simpul. Pada metoda gauss seidel persamaan (2.49) diselesaikan untuk V_i , dan urutan iterasi menjadi,

$$V_i^{(k+1)} = \frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch} + \sum y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum y_{ij}}, \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.50)$$

Dimana:

y_{ij} = admitansi (pu)

P_i^{sch} = daya aktif (pu)

Q_i^{sch} = daya reaktif (pu)

Dalam penulisan hukum arus kirchoff, arus memasuki rel i diasumsikan positif jadi, untuk rel-rel dimana daya aktif dan reaktif dimasukkan ke rel, seperti rel-rel generator, P_i^{sch} dan Q_i^{sch} mempunyai nilai negatif. Jika persamaan (2.49) diselesaikan untuk P_i dan Q_i , didapat:

$$P_i^{(k+1)} = \text{real } V_i^{*(k)} \left(V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{i=1}^n y_{ij} V_j^{(k)} \right), \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.51)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\text{imaginary } V_i^{*(k)} \left(V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{i=1}^n y_{ij} V_j^{(k)} \right), \quad j \neq i \dots (2.52)$$

Persamaan aliran daya berhubungan dengan elemen-elemen matrik admitansi rel. Persamaan menjadi,

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i^{sch} - jQ_i^{sch}}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j=i} Y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \dots\dots\dots(2.53)$$

$$P_i^{(k+1)} = real \left\{ V_i^{*(k)} \left(V_i^{(k)} Y_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \right\}, \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.54)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -imaginary \left\{ V_i^{*(k)} \left(V_i^{(k)} Y_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right) \right\} \quad j \neq i \dots\dots (2.55)$$

Y_{ii} memasukkan admitansi shunt cabang tiap rel dan dari elemen lain seperti transformator tapp.

Sejak dua komponen tegangan ditentukan pada rel *swing*, terdapat 2(n-1) persamaan yang harus diselesaikan dengan metode iterasi. Pada kondisi sistem beroperasi normal, besaran tegangan rel disekitar 1,0 atau mendekati besaran tegangan pada rel *swing*. *Magnitude* pada rel-rel tegangan sedikit lebih rendah dari pada tegangan pada rel *swing* tergantung pada permintaan daya reaktif, sedangkan tegangan terjadwal pada rel-rel sedikit lebih tinggi. Juga sudut fasa rel-rel beban sudut referensi sesuai dengan permintaan daya aktif, sedangkan sudut fasa rel-rel generator mungkin diatas nilai referensi tergantung pada jumlah daya aktif yang mengalir ke rel. Jadi metoda gauss-seidel, perkiraan tegangan awalnya 1,0 + j0,0 sudah cukup memadai, dan solusi konvergen berhubungan dengan keadaan operasi yang sebenarnya.

Untuk rel-rel P-Q, daya aktif dan reaktif P_i^{sch} dan Q_i^{sch} diketahui. Memulai dengan perkiraan awal, (2.53) menyelesaikan komponen real dan imajiner

tegangan. Untuk rel-rel pengontrol tegangan (rel-rel P-V) dimana P_i^{sch} dan $|V_i|$ ditentukan, pertama (2.55) diselesaikan untuk $Q_i^{(k+1)}$ kemudian digunakan dalam (2.53) menyelesaikan $V_i^{(k+1)}$. Namun demikian, sejak $|V_i|$ sudah ditetapkan hanya bagian imajiner yang dipakai, dan bagian relnya dipilih agar memenuhi

$$(e_i^{(k+1)})^2 + (f_i^{(k+1)})^2 = |V_i|^2 \quad \dots\dots\dots(2.56)$$

Atau

$$e_i^{(k+1)} = \sqrt{|V_i|^2 - (f_i^{(k+1)})^2} \quad \dots\dots\dots(2.57)$$

Dimana

$e_i^{(k+1)}$ = komponen real tegangan

$f_i^{(k+1)}$ = komponen imajiner tegangan

Dalam urutan iterasi, angka dinaikkan dengan menerapkan faktor percepatan untuk perkiraan penyelesaian didapat untuk tiap iterasi.

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \alpha(V_i^{(k)} - V_i^{(K)}) \quad \dots\dots\dots(2.58)$$

Tegangan baru ditempatkan pada nilai tegangan lama dalam penyelesaian, proses dilanjutkan hinggaperubahan komponen real dan imajiner tegangan rel sesuai dengan akurasi yang telah ditentukan, sebagai contoh.

$$|e_i^{(k+1)} - e_i^{(k)}| = \leq \epsilon \quad \dots\dots\dots(2.59)$$

$$|f_i^{(k+1)} - f_i^{(k)}| = \leq \epsilon$$

Untuk *mismatch* daya yang layak dan dapat diterima, toleransi yang sangat tinggi harus ditentukan pada kedua komponen tegangan. Akurasi tegangan sekitar 0,00001 hingga 0,00005 pu sudah cukup memuaskan. Iterasi berlanjut hingga

magnitude elemen yang paling besar dalam kolom delta P dan delta Q kurang dari nilai yang telah ditentukan. Akurasi *mismatch* daya 0,001 pu

2.2.4. Keandalan Jaringan Distribusi

Keandalan sistem distribusi tenaga listrik didefinisikan dengan kemampuan komponen-komponen dalam sistem distribusi untuk melakukan fungsinya (mendistribusikan energi listrik ke pelanggan) dalam kondisi maupun periode waktu yang telah ditentukan. (Mithulanathan, 2004).

Besar keandalan jaringan distribusi tenaga listrik tergantung pada komponen dan konfigurasi jaringan tersebut. Untuk menentukan keandalan jaringan distribusi, dapat menggunakan pendekatan probabilistik dengan menggunakan persamaan matematis. Dalam menentukan indeks keandalan, kita menggunakan tahapan sistematis guna menentukan indeks titik dan selanjutnya diintegrasikan untuk mendapatkan indeks keandalan sistem.

Beberapa indeks keandalan yang umum digunakan dalam menentukan nilai keandalan suatu sistem distribusi antara lain: SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI dan ASUI. Selain indeks keandalan berorientasi pada pelanggan juga terdapat indeks keandalan yang berorientasi pada energi dan beban yaitu ENS, AENS.

2.2.4.a) Indeks Keandalan Dasar

Indeks keandalan terdiri dari tiga parameter yaitu :

- a. Laju kegagalan (failure rate) = α
- b. Durasi pemutusan (outage duration) = r
- c. Ketidakterseediaan layanan (unavailability) = U

Hubungan antara laju kegagalan, durasi pemutusan dan ketidakterseediaan layanan, dapat dirumuskan dalam bentuk persamaan :

$$U = \alpha \cdot r \dots\dots\dots (2.60)$$

Pada pemodelan keandalan, empat keadaan, laju kegagalan (α) terdiri atas *failure rate aktif* (α_A), *failure rate pasif* (α_p) dan *maintenance rate* (α_m) sedangkan durasi pemutusan terdiri atas lama waktu yang diperlukan switching (s), durasi perbaikan (rd) serta durasi *maintenance* (rm).

Pemutusan terdiri atas pemutusan terpaksa karena ada gangguan serta pemutusan disengaja untuk tujuan pemeliharaan. Dilihat dari gangguan komponen pemutusan suatu beban, maka pemutusan ada dua jenis yaitu pemutusan aktif dan pemutusan total. Pemutusan aktif adalah pemutusan yang terjadi pada suatu beban karena terjadi pada karena terjadi gangguan pada komponen lain (gangguan aktif) yang sebenarnya tidak menyuplai daya ke beban tersebut. Pemutusan total adalah pemutusan pada suatu beban yang diakibatkan terjadinya gangguan pada komponen yang menyuplai daya ke beban tersebut serta pemutusan karena pemeliharaan.

1. Kegiatan orde pertama yaitu terjadinya pemutusan karena gangguan pada suatu komponen.

i. Untuk pemutusan aktif maka frekuensi pemutusan, durasi pemutusan dan ketidakterediaan suplai daya yang ditimbulkan adalah

$$\alpha_1 = \alpha_a \dots \dots \dots (2.61)$$

$$r_1 = s \dots \dots \dots (2.62)$$

$$U_1 = \alpha_1 \cdot r_1 = \alpha_A \cdot s \dots \dots \dots (2.63)$$

ii. Untuk pemutusan total (karena gangguan dan maintenance) maka frekuensi pemutusan, durasi pemutusan dan ketidakterediaan supali daya yang ditimbulkan adalah

$$\alpha_1 = \alpha_A + \alpha_p + \alpha_m \dots \dots \dots (2.64)$$

$$U_1 = (\alpha_A + \alpha_p) \cdot rd + \alpha_m \cdot rd \dots \dots \dots (2.65)$$

$$r_1 = U_1 / \alpha_1 \dots \dots \dots (2.66)$$

2. Kejadian orde kedua yaitu terjadinya pemutusan pada dua komponen secara bersamaan (overlapping). Overlapping yang mungkin terjadi adalah:
 - i. Pemutusan aktif dengan pemutusan aktif
 - ii. Pemutusan aktif dengan pemutusan total
 - iii. Pemutusan total dengan pemutusan aktif
3. Pemutusan aktif overlapping dengan pemutusan aktif

Apabila pemutusan aktif komponen 1 overlapping dengan pemutusan aktif komponen 2, indeks keandalan tiap komponen yang digunakan adalah

$$\alpha_1 = \alpha_{1A}, \alpha_2 = \alpha_{2A}, r_1 = s_1, r_2 = s_2 \dots \dots \dots (2.67)$$

persamaan indeks keandalan setelah overlapping menjadi :

$$\alpha_{aa} = \frac{\alpha_{1A} \alpha_{2A} (s_1 + s_2)}{1 + \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2} \dots \dots \dots (2.68)$$

$$\alpha_{aa} = \alpha_1 \alpha_2 (s_1 + s_2) \dots \dots \dots (2.69)$$

$$r_{aa} = \frac{\alpha_{1A} \alpha_{2A} (s_1 + s_2) s_1 s_2}{1 + \alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 s_1 + s_1} \dots \dots \dots (2.70)$$

$$U_{aa} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 s_1 s_2}{1 + \alpha_1 s_1 + \alpha_1 s_2} \dots \dots \dots (2.71)$$

4. Pemutusan aktif overlapping dengan pemiyusan total

Apabila pemutusan aktif komponen 1 overlapping dengan pemutusan total komponen 2, maka ada dua kemungkinan oberlapping yang terjadi yaitu :

- a) Pemutusan aktif komponen 1 overlapping dengan pemutusan total komponen 2 gangguan.

Persamaan indeks keandalannya adalah

$$\alpha_{at} = \alpha_{1A}(\alpha_{2t}s_1) + \alpha_{2t}(\alpha_{1A}r_2) \dots \dots \dots (2.72)$$

$$r_{at} = \frac{s_1s_2}{s_1+s_2} \dots \dots \dots (2.73)$$

- b) Pemutusan aktif komponen 1 overlapping dengan pemutusan total komponen 2 karena perawatan.

Persamaan indeks keandalannya adalah

$$\alpha = \alpha_{at} + \alpha_{am} \dots \dots \dots (2.74)$$

$$U = \alpha_{at}r_{at} + \alpha_{am}r_{am} \dots \dots \dots (2.75)$$

$$r = U/\alpha \dots \dots \dots (2.76)$$

5. Pemutusan total dengan overlapping dengan pemutusan total

Apabila pemutusan total komponen 1 overlapping dengan pemutusan total komponen 2, maka ada dua kemungkinan overlapping yang terjadi yaitu :

- a) Pemutusan total komponen 1 karena gangguan overlapping dengan pemutusan total komponen 2 karena perawatan atau sebaliknya.

Persamaan indeks keandalannya adalah :

$$\alpha_{tm} = \alpha_{1m}(\alpha_1 \cdot r_{1m}) + \alpha_{2m}(\alpha_2 \cdot r_{2m}) \dots \dots \dots (2.77)$$

$$U_{tm} = \alpha_{1m}(\alpha_1 \cdot r_{1m}) \frac{r_{1m}r_2}{r_{1m}+r_2} + \alpha_{2m}(\alpha_1 \cdot r_{2m}) \dots \dots \dots (2.78)$$

$$r = U/\alpha \dots \dots \dots (2.79)$$

- b) Pemutusan total komponen 1 karena gangguan overlapping dengan pemutusan total komponen 2 karena gangguan.

Persamaan keandalannya adalah :

$$\alpha = \frac{\alpha_1 \alpha_2 (r_1 + r_2)}{1 + \alpha_1 r_2 + \alpha_2 r_1} \dots \dots \dots (2.80)$$

jika $\alpha_1 r_1 \ll 1$, maka

$$\alpha = \alpha_1 \alpha_2 (r_1 + r_2) \dots \dots \dots (2.81)$$

$$r_{tt} = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \dots \dots \dots (2.82)$$

$$U_{tt} = \alpha \cdot r \approx \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot r_1 r_2 \dots \dots \dots (2.83)$$

Indeks keandalan keseluruhan a) dan b) adalah

$$\alpha = \alpha_{tt} + \alpha_{tm} \dots \dots \dots (2.84)$$

$$U = \alpha_{tt} r_{tt} + \alpha_{tm} r_{tm} \dots \dots \dots (2.85)$$

$$R = U / \alpha \dots \dots \dots (2.86)$$

2.2.4.b) Indeks keandalan berorientasi pada pelanggan

Indeks keandalan yang berorientasi terhadap pelanggan merupakan pengembangan dari indeks keandalan dasar dengan memasukan variable pelanggan pada tiap titik beban dalam menentukan keandalan jaringan distribusi tenaga listrik. Indeks keandalan berbasis pada pelanggan dapat menunjukkan tingkat pelayanan suatu perusahaan listrik terhadap para pelanggannya dengan membandingkan dengan indeks berbasis pada pelanggan yang dimiliki perusahaan listrik lain. Ada indeks keandalan berbasis pada pelanggan, sebagai berikut (Billington dan Allan, 1996):

1. ***System Average Interruption Frequency Index (SAIFI)***

SAIFI adalah besarnya frekuensi rata-rata pemadaman setiap pelanggan, besarnya SAIFI dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$SAIFI = \frac{\text{Total frekuensi pemadaman}}{\text{totaljumlah pelanggan yang dilayani}}$$

$$SAIFI = \frac{\sum \alpha Ni}{\sum Ni} \dots\dots\dots (2.87)$$

Dengan : α adalah failure rate

Ni adalah jumlah pelanggan yang dilayani pada titik i

Besarnya nilai SAIFI tergambar dari failure rate (α) sistem distribusi tenaga listrik keseluruhan yang masuk lingkup jaringan yang akan dianalisis.

2. **System Average Interruption Duration Index (SAIDI)**

SAIDI adalah indeks yang menggambarkan durasi atau lama pemadaman rata-rata yang terjadi pada pelanggan. Untuk mencari besarnya indeks keandalan tersebut dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$SAIDI = \frac{\text{Total durasi pemadaman}}{\text{Jumlah pelanggan yang dilayani}}$$

$$SAIDI = \frac{\sum Ui.Ni}{\sum Ni} \dots\dots\dots (2.88)$$

Ui adalah durasi pemadaman dalam satu tahun pada beban titik i

3. **Customer Average Interruption Duration Index (CAIDI).**

CAIDI adalah indeks yang menggambarkan lama waktu durasi setiap pemadaman. Untuk menentukan CAIDI, dapat menggunakan persamaan berikut:

$$CAIDI = \frac{\text{Total durasi pemadaman}}{\text{Total frekuensi pemadaman}}$$

$$CAIDI = \frac{\sum Ui.Ni}{\sum \alpha i.Ni} \dots\dots\dots (2.89)$$

Indeks ini sama dengan perbandingan antara SAIFI dan SAIDI.

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI}$$

4. Average Service Availability Index (ASAI).

ASAI adalah indeks yang menggambarkan tingkat ketersediaan layanan yang diterima oleh pelanggan, ASAI dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$ASAI = \frac{\text{Jumlah durasi ketersediaan suplai daya ke beban}}{\text{jumlah suplai daya yang dibutuhkan pelanggan}}$$

$$ASAI = \frac{\sum Ni \times 8760 - \sum Ui Ni}{\sum Ni \times 8760} \dots\dots\dots (2.90)$$

8760 = jumlah jam setiap tahun.

5. Average Service Unavailability In-dex (ASUI)

ASUI adalah indeks yang menggambarkan ketidakterediaan layanan atau suplai daya ke pelanggan. Indeks tersebut dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$ASUI = \frac{\text{jumlah ketidakterediaan suplai daya ke pelanggan}}{\text{jumlah durasi suplai daya yang dibutuhkan pelanggan}}$$

$$ASUI = \frac{\sum Ui.Ni}{\sum Ni.8760} \dots\dots\dots (2.91)$$

indeks ini juga dapat dicari dengan rumus:

$$ASUI = 1 - ASAI$$

2.2.4.c) Indeks Keandalan Berorientasi Pada Energi dan Beban

Menurut Billington dan Allan (1996), salah satu parameter penting yang diperlukan dalam melakukan evaluasi keandalan yang berorientasi pada energi dan beban adalah nilai rata-ratabeban pada tiapt titik beban. Beban rata-rata La diperoleh dengan persamaan:

$$La = Lp f \dots\dots\dots (2.92)$$

Dengan *Lp* merupakan kebutuhan beban maksimum (*Peak load demand*) dan *f* adalah faktor beban (*load factor*).

(i) Energy Not Supplied (ENS)

$$ENS = \text{total energy not supplied by the system} = \sum La (i) Ui \dots (2.93)$$

Dengan *La(i)* merupakan kebutuhan beban rata-rata yang terdapat pada suatu titik beban.

(ii) **Average Energy Not Supplied (AENS)**

$$AENS = \frac{\text{Total energy not supplied}}{\text{total number of}} = \frac{\sum La (i)Ui}{\sum Ni} \dots\dots\dots (2.94)$$

2.2.4.d) Metode Section Unit

Metode *section technique* merupakan metode sistematis yang terstruktur dalam menganalisis indek keandalan sistem jaringan distribusi. Besar kecilnya nilai keadalan menggunakan metode ini dapat dilihat dari kegagalan komponen dan pengaruhnya terhadap komponen lain dalam lingkup sistem kerjanya atau dalam konteks section yang sama. Dalam menganalisis indek keandalan, indeks keandalan setiap titik beban dianalisis satu per satu, selanjutnya mengintegrasikan atau mengabungkan menjadi indeks 1 section. Jika penyulang pada jaringan distribusi mempunyai banyak section, maka setiap section dievaluasi besar indeks keandalannya, selanjutnya mengintegrasikan atau menjumlahkan nilai indeks keandalan setiap section menjadi indeks keandalan total.

2.2.4.e) Indeks Keandalan Peralatan Sistem Distribusi Berdasarkan SPLN

No.59 : 1985

Ruang lingkup standar ini dimaksudkan untuk menjelaskan dan menetapkan tingkat keandalan sistem jaringan distribusi tenaga listrik. Selain itu SPLN No.59 : 1985 bertujuan untuk memberikan pegangan yang terarah dalam menampilkan dan menentukan tingkat keandalan sistem distribusi dan juga sebagai tolak ukur terhadap kemajuan atau menentukan proyeksi yang akan dicapai PLN.

Tabel 2.3. Data Indeks Keandalan Saluran Udara

Saluran Udara	
Sustained failure rate (α /km/yr)	0,2
r (repaire time) (jam)	3
rs (switch time) (jam)	0,15

Sumber: SPLN No.59 : 1985

Tabel 2.4. Indeks Kegagalan Peralatan

Komponen	α (failure rate)	r (repaire time) (jam)	rs (switching time) (jam)
Trafo Distribusi	0,005/unit/tahun	10	0,15
Circuit Breaker	0,004/unit/tahun	10	0,15
Sectionalizer	0,003/unit/tahun	10	0,15

Sumber: SPLN No.59 : 1985

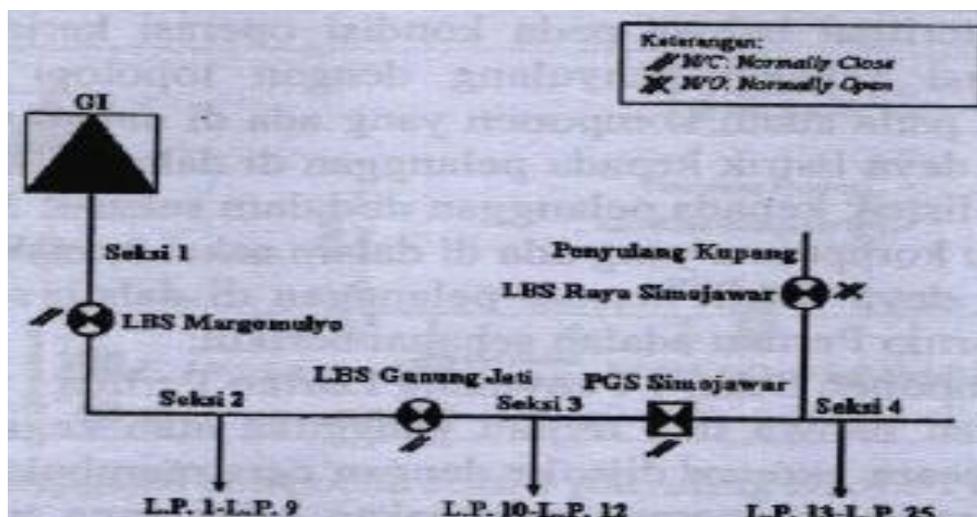
2.2.4.f) Operasi Distributed Generation Metode *Section Unit*

Total kapasitas pembangkitan maksimum *distributed generation* diperkirakan lebih kecil dari beban yang terpasang pada feeder kota surakarta. Dengan kondisi tersebut, maka saat terjadi gangguan *distributed generation* tidak mampu menopang semua beban yang terkoneksi pada feeder kota surakarta. Menurut Didik Hardianto (2011) Penelitiannya tentang Analisis penetrasi Distributed Generation terhadap Profil Tegangan Susut Daya dan keandalan Jaringan Distribusi Tenaga Listrik menyatakan dalam keadaan tersebut semua beban harus dilepas dari feeder terlebih dahulu, baru kemudian setelah 15 menit (waktu pensaklaran SPLN No. 59 :1985) beban dapat dihubungkan kembali dan menyuplai daya. Sebelum dioperasikan kembali, beban-baban pada jaringan distribusi harus dipisahkan sesuai kapasitas *Distributed Generation*. pemisahan beban berdasarkan pada *feeder section* yang ada pada jaringan distribusi. Proses pemisahan beban pada jaringan distribusi dapat dilakukan menggunakan recloser maupun ABSW. Hal sama terjadi ketika gangguan berakhir, *distributed generation* akan melepas beban terlebih dahulu, kemudian beban dihubungkan kembali ke jaringan distribusi dan selanjutnya *distributed generation* melakukan interkoneksi kembali dengan jaringan distribusi.

Namun dalam penelitian ini penulis mencoba untuk menerapkan mekanisme perlepasan beban otomatis pada jaringan distribusi, sehingga *distributed generation* akan langsung memilih beban yang mana saja yang dapat diambil oleh *Distributed Generation* secara otomatis sehingga tidak ada pemadaman beban yang terkoneksi pada *Distributed genetion*. Hal ini sesuai

dengan penelitian yang dikemukakan oleh Perlindungan D.S (2008) dalam tesisnya tentang Pengaruh *Distributed Generation* Terhadap Keandalan Sistem Distribusi. Dengan demikian dapat kita tentukan nilai Laju kegagalan (*failure rate*) = α , Durasi pemutusan (*outage duration*) = r Ketidakterseediaan layanan (*unavailability*) = U yang disuplai oleh DG dan PLN.

- 1) Mode operasi tipologi radial dengan *tie* dan *sectionalizing switch* (studi kasus penyulang Darmo Permai)

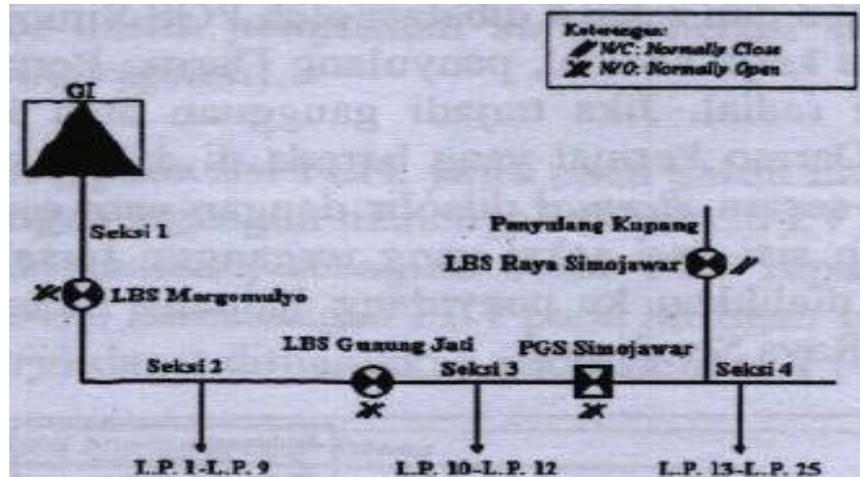


Gambar 2.18. Bentuk Penyederhanaan Topologi Penyulang Darmo Permai

Dari gambar 2.18 terlihat bahwa penyulang Darmo permai dibagi atas empat 4 seksi dan masing-masing seksi dibatasi oleh sectionalizing switch, yakni seksi 2 dan 3 dibatasi oleh LBS gunung jati; dan antara seksi 3 dan 4 dibatasi oleh PGS Simojawar.

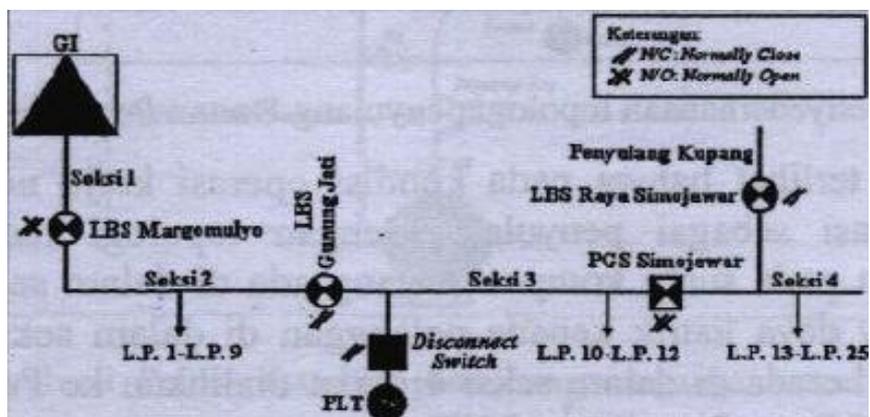
Pada kondisi normal, penyulang Darmo Permai beroperasi sebagai penyulang tipologi radial. Jika terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu komponen dari penyulang yang berada dalam salah satu seksi, maka seksi yang terganggu dapat secara otomatis membuka *sectionalizing switch* yang ada pada setiap sisi dari seksi yang terganggu tersebut. Seksi yang tidak terganggu kemudian dapat dialihkan ke penyulang kupang melalui tie switch (normally open), yaitu LBS Raya Simojawar.

menunggu sampai komponen yang terganggu atau gagal dalam seksi 1 selesai diperbaiki.



Gambar 2.20. Mode Kegagalan Komponen Seksi 1 Penyulang Darmo Permai

Sementara seksi 4 dapat dialihkan ke penyulang kupang dengan cara menutup LBS Raya Simojawar (N/C) secara otomatis, sehingga seluruh pelanggan di dalam seksi 4 (LP.13 – LP.25) tetap hidup.



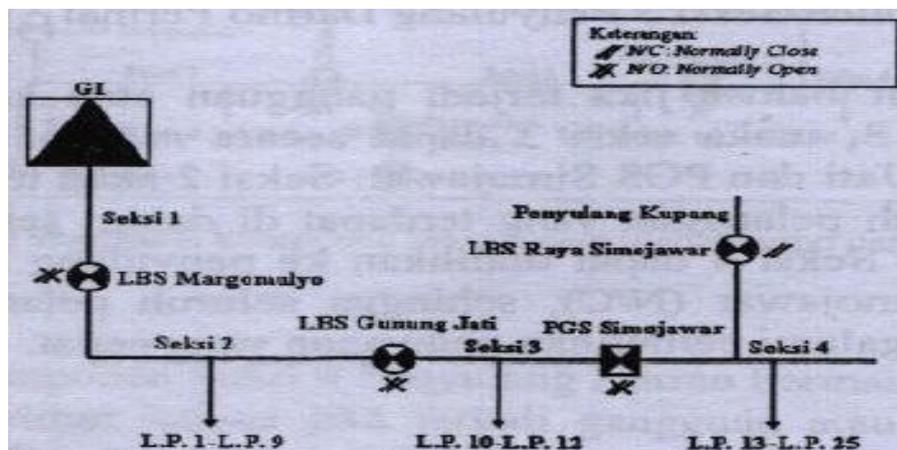
Gambar 2.21. Mode Kegagalan Komponen Seksi 1 Penyulang Darmo Permai Tekoneksi dengan Distributed Generation (DG)

Dari gambar 2.22. terlihat, jika terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu komponen seksi 1, maka disconnect switch dapat ditutup (N/C), sehingga daya dari *Generated Distribution* (DG) dapat diberikan ke pelanggan seksi 2 dan seksi 3. Seluruh pelanggan yang berada pada seksi 4 dapat dialihkan ke penyulang kupang dengan cara menutup LBS raya Simonjawar (N/C).

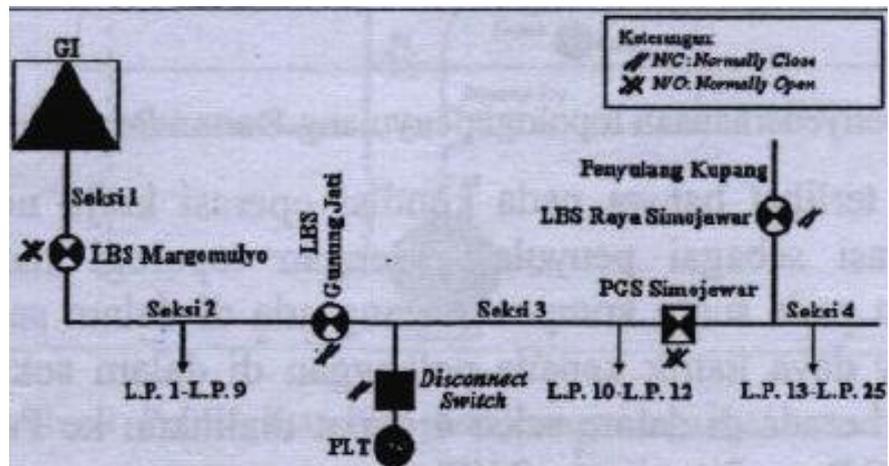
Setelah selesai diperbaiki, maka LBS Margomulyo dapat ditutup kembali (N/C) dan selanjutnya LBS Simonjavar (tie switch) dapat dibuka kembali (N/O) - sehingga penyulang Darmo Permai dapat beroperasi seperti kondisi normal lagi.

b) *Mode* kegagalan Komponen Seksi 2 Penyulang Darmo Permai

Dari gambar 2.21. terlihat bahwa jika terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu komponen dalam seksi 2, maka seksi 2 secara otomatis diisolir dengan membuka LBS Margomulyo dan LBS gunung jati. Seksi 3 yang sebenarnya merupakan seksi yang tidak teganggu tidak dapat dialihkan ke penyulang kupang karena batasan operasional penyulang kupang, sehingga seluruh pelanggan yang berada dalam seksi 3 juga ikut mengalami pemadaman bertahan bersama seluruh pelanggan yang berada dalam seksi 3, sampai komponen yang terganggu atau gagal di seksi 2 selesai diperbaiki. Seksi 4 dapat dialihkan ke penyulang kupang, dengan cara menutup LBS Raya Simonjavar (N/C), sehingga seluruh pelanggan yang terdapat dalam seksi 4 tidak mengalami pemadaman.



Gambar 2.22. *Mode* Kegagalan Komponen Seksi 2 Penyulang Darmo Permai

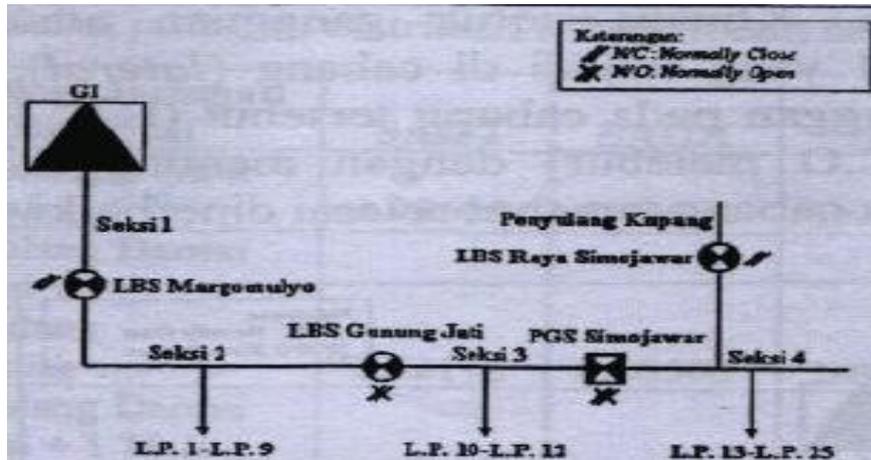


Gambar 2.23. Mode Kegagalan Komponen Seksi 2 Penyulang Darmo Permai Terkoneksi dengan *Distributed Generation* (DG)

Dari gambar 2.24. terlihat bahwa jika terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu komponen dalam seksi 2, maka *disconnect switch* dapat ditutup (N/C) sehingga *distributed generation* (DG) dapat memberikan suplai daya listrik kepada pelanggan dalam seksi 3. Seluruh pelanggan pada seksi 4 akan dialihkan ke penyulang kupang dengan cara menutup LBS Raya Simonjavar (N/C). Setelah selesai diperbaiki LBS Margomulyo dan LBS Gunung jati dapat ditutup kembali (N/C) selain itu LBS Raya Simonjavar (*tie switch*) dapat dibuka kembali (N/O) – sehingga penyulang Darmo Permai dapat beroperasi normal lagi.

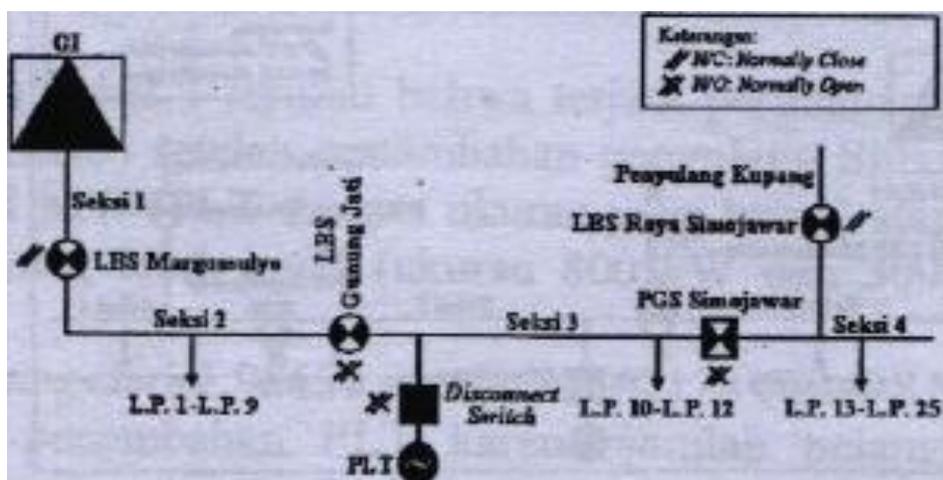
c) Mode Kegagalan Komponen Seksi 3 Penyulang Darmo Permai

Dari gambar 2.25. terlihat bahwa jika terjadi gangguan atau kegagalan pada seksi 3, maka seksi 3 secara otomatis diisolir dengan cara membuka LBS Gunung Jati dan PGS Simonjavar. Seksi 2 akan tetap menerima dari GI, sehingga pelanggan yang terdapat dalam seksi 2 tidak ikut mengalami pemadaman. Seksi 4 dapat dialihkan ke penyulang Kupang dengan cara menutup LBS Raya Simonjavar (N/C) sehingga pelanggan dalam seksi 4 tidak mengalami pemadaman.



Gambar 2.24. Mode Kegagalan Komponen Seksi 2 Penyulang Darmo Permai

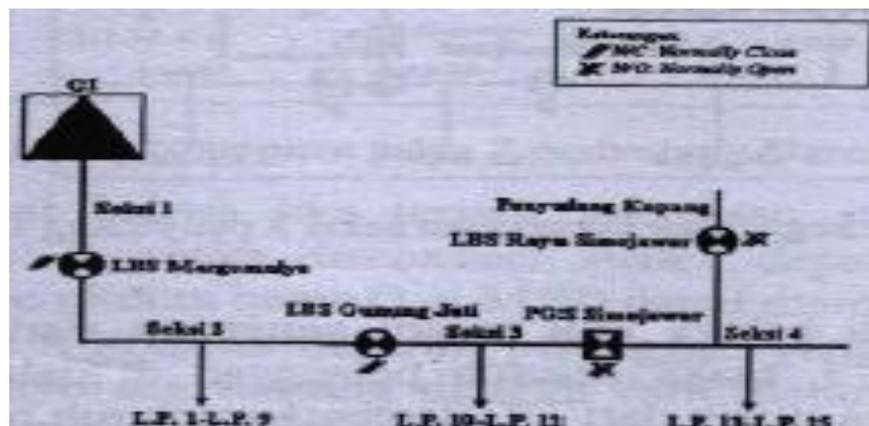
Dari gambar 2.26 terlihat jika terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu komponen dalam seksi 3 maka seluruh pelanggan dalam seksi 3 akan padam, tapi seluruh pelanggan dalam seksi 2 tetap mendapatkan suplai daya listrik dari GI dan *Distributed Generation* (DG). Sementara seluruh pelanggan dalam seksi 4 dapat dialihkan ke penyulang Kupang dengan cara menutup LBS Simojawar (N/C). Setelah dilakukan perbaikan maka LBS Gunung jati ditutup kembali (N/C) selain itu LBS Simojawar dibuka kembali sehingga, penyulang Darmo Permai dapat beroperasi normal kembali.



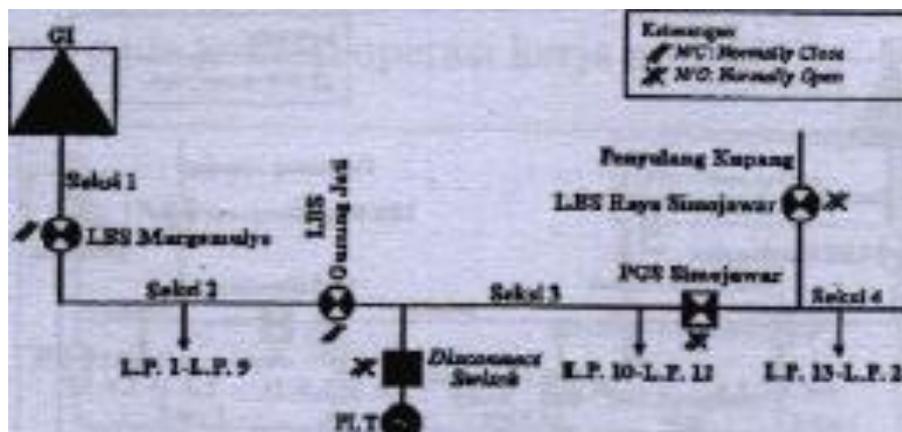
Gambar 2.25. Mode Kegagalan Komponen Seksi 3 Penyulang Darmo Permai Terkoneksi dengan *Distributed Generation* (DG)

d) *Mode* kegagalan Komponen Seksi 4 Penyulang Darmo Permai

Dari gambar 2.27. terlihat bahwa jika terjadi gangguan atau kegagalan pada komponen seksi 4, maka seksi 4 dapat secara otomatis diisolir dengan cara membuka LBS Simonjavar dan PGS Simonjavar. Seksi 2 dan seksi 3 akan tetap mendapatkan suplai daya listrik dari GI sehingga pelanggan dalam seksi 2 dan 3 tidak mengalami pemadaman. Khusus untuk gangguan atau kegagalan pada seksi 4 yang terjadi di cabang (*lateral*), dibelakang *fuse cutout* (C.O), maka hanya pelanggan tersebut (L.P. 14) yang akan mengalami pemadaman bertahan (C.O melebur) dengan menunggu sampai komponen yang terganggu atau gagal pada cabang tersebut selesai diperbaiki.



Gambar 2.26 *Mode* Kegagalan Komponen Seksi 4 Penyulang Darmo Permai



Gambar 2.27. *Mode* Kegagalan Komponen Seksi 4 Penyulang Darmo Permai Terkoneksi dengan *Distributed Generation* (DG)

Dari gambar 2.28 terlihat bahwa jika terjadi gangguan atau kegagalan pada suatu komponen dalam seksi 4 maka DG dan GI akan tetap memberi suplai daya ke seksi 1, seksi 2, dan seksi 3 sehingga seluruh pelanggan pada seksi 1, 2 dan 3 tidak mengalami pemadaman. Setelah gangguan atau kegagalan komponen diperbaiki maka PGS Simonjavar akan menutup kembali sehingga penyulang Darmo Permai beroperasi normal kembali.