

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan berkat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **”Desain Teknis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Dengan Generator Induksi Satu Fasa Sebagai Pemanfaatan Air Buangan Limbah Industri”**. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Penulisan karya tulis skripsi ini tidak dapat terselesaikan dengan baik dan lancar tanpa dukungan dan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Secara khusus penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Ayahanda Alm. Trilaksono Nugroho dan Ibunda Rositawati Indrati atas didikannya selama ini, kasih sayang, semangat serta doa yang tak henti – hentinya. Dan kakak Mirza Ghulam Indralaksana atas dukungan dan semangatnya.

Selain itu, tak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dan mendukung dalam penyelesaian skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak M. Azis Muslim, ST., MT., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Mochammad Rif’an S.T., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Bapak Ir. Wijono, MT Ph.D. selaku KKDK Konsentrasi Energi Elektrik Teknik Elektro.
5. Bapak Ir. Hari Santoso, MS. dan Bapak Ir. Hery Purnomo, MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini.

6. Bapak Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT. selaku kepala Laboratorium Tegangan Tinggi yang memberikan ilmu, pengalaman, dan nasehat di laboratorium.
7. Ibu Fitriana Suhartati, ST., MT. selaku dosen wali atas bimbingan, dukungan dan arahan selama perkuliahan.
8. PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto yang menjadi lokasi penelitian skripsi, terutama Pak Nurbuwana, Pak Anton, Pak Suwito yang telah banyak membantu saat pengambilan data.
9. Rekan-rekan di Laboratorium Mesin Elektrik dan laboran Mas Indra Setiawan telah banyak membantu selama proses pengerjaan skripsi di laboratorium.
10. Rekan-rekan di Laboratorium Tegangan Tinggi dan Laboran Bapak Endri yang telah membantu selama pengabdian di laboratorium.
11. M. Bayu Samodra, ST. yang telah memberikan semangatnya selama proses pengerjaan skripsi.
12. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Disadari bahwa skripsi ini belum sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu diharapkan adanya saran dan kritik mengenai penelitian ini agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan berguna. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Wassalammualaikum Wr. Wb.

Malang, Juli 2012

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	x
ABSTRAK	xi
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II	4
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH).....	4
2.2. Proses Konversi Energi Pada Sistem PLTMH.....	4
2.3. Kincir Air	5
2.3.1 Jenis-Jenis Kincir Air.....	6
2.3.1.1 Kincir Air <i>Over-Shot</i>	6
2.3.1.2 Kincir Air <i>Breast-Shot</i>	7
2.3.1.3 Kincir Air <i>Under-Shot</i>	7
2.4. Perancangan Kincir Air	8
2.4.1 Diameter Luar dan Diameter Dalam Kincir Air	8
2.4.2 Kecepatan Aliran Air	9
2.4.3 Sudu Kincir Air.....	10

2.5.	Sistem Transmisi Mekanik.....	11
2.5.1	<i>Pulley</i>	11
2.5.2	Sabuk V (<i>V-belt</i>)	12
2.5.3	Gardan	13
2.6.	Mesin Induksi Satu Fasa.....	13
2.6.1	Konstruksi Mesin Induksi Satu Fasa.....	13
2.6.2	Prinsip Kerja Generator Induksi	15
2.6.3	Kapasitor Eksitasi.....	16
2.6.4	Generator Induksi yang Dioperasikan Sendiri	17
2.6.5	Tegangan Keluaran Generator Induksi Satu Fasa.....	20
2.6.6	Tegangan dan Frekuensi pada Generator Induksi Satu Fasa	22
2.6.7	Beban Generator Induksi Satu Fasa	22
2.6.7.1	Beban Resistif	22
2.6.7.2	Beban Induktif.....	23
2.6.7.3	Beban Kapasitif.....	23
BAB III	.....	24
3.1	Objek Penelitian	24
3.2	Studi Literatur.....	24
3.3	Survey Lapangan	24
3.4	Pengumpulan Data	24
3.5	Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)	25
3.6	Pengujian dan Analisis Data.....	28
3.7	Penarikan Kesimpulan.....	29
3.8	Diagram Alir Penelitian.....	29
BAB IV	.....	30
4.1	Identifikasi Lokasi	30

4.2	Potensi Energi Aliran Air Buangan PT Ajinomoto <i>Factory</i> Mojokerto	32
4.3	Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro.....	37
4.3.1	Saluran Pembawa.....	37
4.3.2	Perancangan Kincir Air	38
4.3.3	Perancangan Transmisi Mekanik.....	43
4.4	Generator Induksi Satu Fasa.....	44
BAB V	.....	46
5.1	Umum.....	46
5.2	Tujuan Pengujian.....	46
5.3	Peralatan Pengujian	47
5.4	Prosedur Pengujian Generator Induksi Satu Fasa	50
5.5	Hasil dan Analisis Pengujian Generator Induksi Satu Fasa	52
BAB VI	.....	76
6.1	Kesimpulan.....	76
6.2	Saran.....	77
DAFTAR PUSTAKA	.....	78



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Teknis Tiga Jenis Kincir Air	25
Tabel 4.1 Hasil Pengamatan Debit Air Buangan PT. Ajinomoto Mojokerto	34
Tabel 5.1 Pengujian Rugi Mekanik Motor Penggerak Sebelum Dikopling.....	52
Tabel 5.2 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 49$ Hz.....	52
Tabel 5.3 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 49$ Hz	53
Tabel 5.4 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 49,5$ Hz.....	55
Tabel 5.5 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 49,5$ Hz	56
Tabel 5.6 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 50$ Hz.....	58
Tabel 5.7 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 50$ Hz	58
Tabel 5.8 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 50,5$ Hz.....	60
Tabel 5.9 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 50,5$ Hz	61
Tabel 5.10 Pengujian Rugi Mekanik Motor Penggerak Sebelum Dikopling.....	63
Tabel 5.11 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 51$ Hz.....	64
Tabel 5.12 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 51$ Hz	64
Tabel 5.13 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 51,5$ Hz.....	66
Tabel 5.14 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 51,5$ Hz	67
Tabel 5.15 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 52$ Hz.....	69
Tabel 5.16 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 52$ Hz	70
Tabel 5.17 Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 52,5$ Hz.....	72
Tabel 5.18 Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 52,5$ Hz	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kincir Air <i>Over-shot</i>	6
Gambar 2.2 Kincir Air <i>Breast-shot</i>	7
Gambar 2.3 Kincir Air <i>Under-shot</i>	8
Gambar 2.4 Diameter Luar dan Diameter Dalam Kincir Air.....	9
Gambar 2.5 Sudu Kincir Air	11
Gambar 2.6 Sistem Transmisi Mekanik <i>Pulley</i> dan Sabuk.....	12
Gambar 2.7 Kontruksi dan Ukuran Penampang Sabuk-V	13
Gambar 2.8 Kontruksi Mesin Induksi Satu Fasa	13
Gambar 2.9 Kumparan Pada Motor Induksi Satu Fasa.....	14
Gambar 2.10 Karakteristik Torsi-Kecepatan Putaran Pada Mesin Induksi	16
Gambar 2.11 Tegangan Terminal Generator Sebagai Fungsi Arus Magnetisasi.....	17
Gambar 2.12 Diagram Koneksi Generator Induksi Satu Fasa Beroperasi Sendiri	18
Gambar 2.13 Model Rangkaian Fasa Satu Generator Induksi dan Beroperasi Sendiri Pada Frekuensi Dasar	18
Gambar 2.14 Rangkaian Ekuivalen Tiap Fasa Generator Induksi Beroperasi Sendiri Tanpa Beban	18
Gambar 2.15 Penentuan Titik Operasi Generator Induksi Kondisi Tanpa Beban	20
Gambar 2.16 Rangkaian Ekuivalen Generator Induksi Penguatan Sendiri Dipengaruhi Frekuensi Berban Resistif	21
Gambar 3.1 Perancangan Kincir Air.....	26
Gambar 3.2 Perancangan Jari-Jari Sudu Kincir Air.....	27
Gambar 3.3 Perancangan Lebar Sudu Kincir Air	27
Gambar 3.4 Diagram Alir Pengaturan Frekuensi dan Tegangan	28
Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 4.1 Denah Lokasi Pabrik PT. Ajinomoto <i>Factory</i> Mojokerto	30

Gambar 4.2 Kawasan <i>Drain Pool</i> PT. Ajinomoto <i>Factory</i> Mojokerto	31
Gambar 4.3 Foto Pipa Pembuangan ke Sungai Brantas PT. Ajinomoto <i>Factory</i> Mojokerto.....	33
Gambar 4.4 Perancangan Talang Air.....	38
Gambar 4.5 Diameter Luar dan Diameter Dalam Kincir Air.....	39
Gambar 4.6 Sudu Kincir Air	42
Gambar 5.1 Pengujian Generator Induksi Satu Fasa di Laboratorium	48
Gambar 5.2 Rangkaian Pengujian Generator Induksi Satu Fasa Berbeban	51
Gambar 5.3 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 49$ Hz	54
Gambar 5.4 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 49$ Hz.....	54
Gambar 5.5 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 49$ Hz.....	55
Gambar 5.6 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 49,5$ Hz	56
Gambar 5.7 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 49,5$ Hz.....	57
Gambar 5.8 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 49,5$ Hz.....	57
Gambar 5.9 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 50$ Hz	59
Gambar 5.10 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 50$ Hz.....	59
Gambar 5.11 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 50$ Hz.....	60
Gambar 5.12 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 50,5$ Hz	61
Gambar 5.13 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 50,5$ Hz.....	62
Gambar 5.14 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 50,5$ Hz.....	62
Gambar 5.15 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 51$ Hz	65
Gambar 5.16 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 51$ Hz.....	65
Gambar 5.17 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 51$ Hz.....	66
Gambar 5.18 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 51,5$ Hz	67
Gambar 5.19 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 51,5$ Hz.....	68
Gambar 5.20 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 51,5$ Hz.....	69

Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 52$ Hz 70

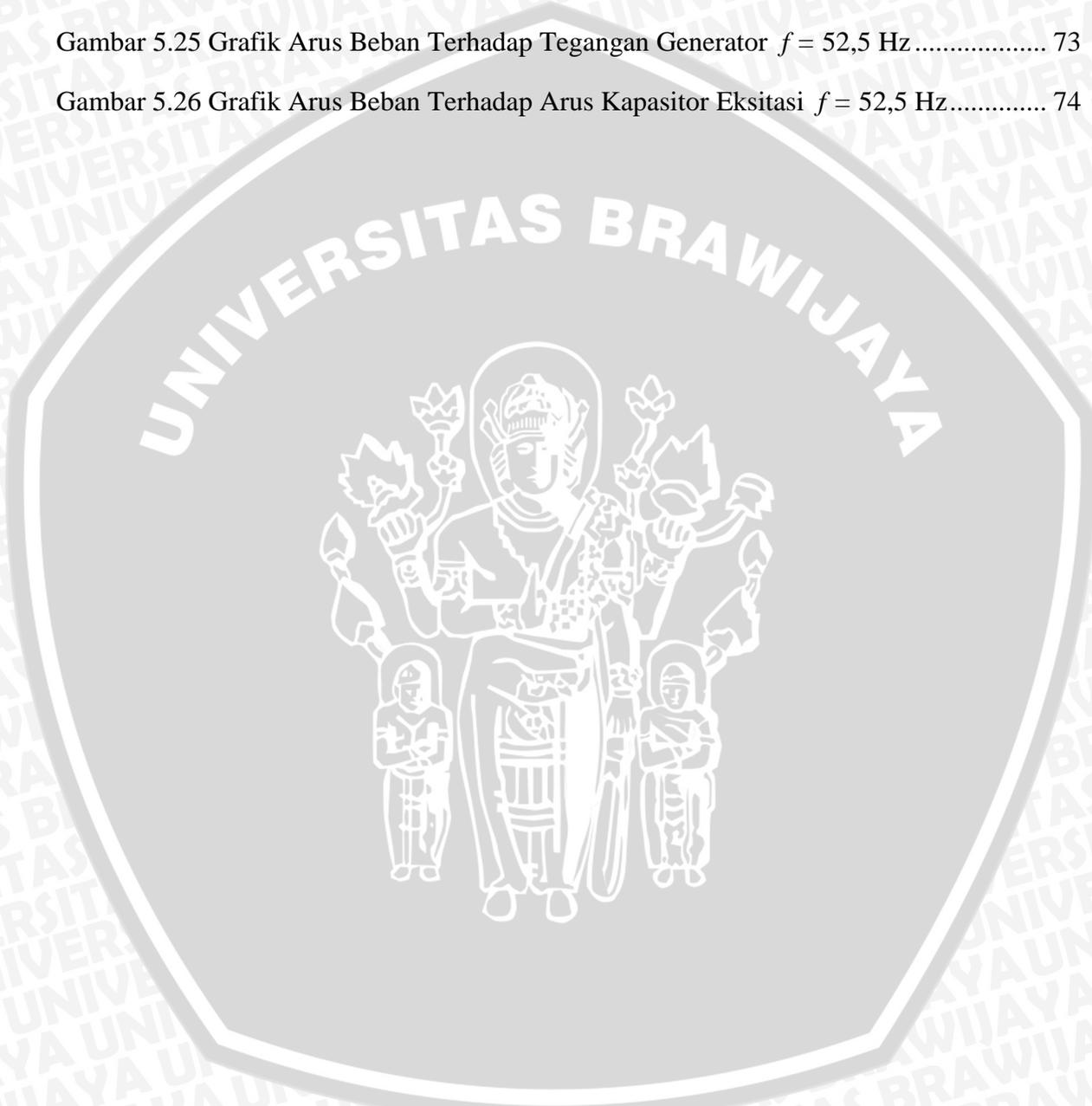
Gambar 5.22 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 52$ Hz 71

Gambar 5.23 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 52$ Hz 71

Gambar 5.24 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 52,5$ Hz 73

Gambar 5.25 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 52,5$ Hz 73

Gambar 5.26 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 52,5$ Hz 74



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Rekap Data Debit Air Buangan PT. Ajinomoto <i>Factory</i> Mojokerto pada Bulan Maret 2012.....	80
Lampiran 2: Foto Potensi Air Buangan PT. Ajinomoto <i>Factory</i> Mojokerto.....	83
Lampiran 3: Foto Pengambilan Data Potensi Air Buangan PT. Ajinomoto <i>Factory</i> Mojokerto.....	84
Lampiran 4 : Pengujian Parameter Motor Induksi Satu Fasa 1 HP	86
Lampiran 5: Merk dan Tipe Peralatan Untuk Pengujian	88
Lampiran 6: Foto Pengujian Generator Induksi Satu Fasa di Laboratorium Mesin Elektrik Teknik Elektro	89



RINGKASAN

Faradina Magistasari (0810630054), Jurusan Teknik Elektro, Konsentrasi Teknik Energi Elektrik, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Juli 2012, *Desain Teknis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Dengan Generator Induksi Satu Fasa Sebagai Pemanfaatan Air Buangan Limbah Industri*. Dosen Pembimbing: **Ir. Hari Santoso, MS. dan Ir. Hery Purnomo, MT.**

Upaya konservasi energi dapat dilakukan dengan memanfaatkan kembali energi yang terbuang. Potensi air buangan limbah pada PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto mempunyai debit andalan $0,1805 \text{ m}^3/\text{s}$ dan ketinggian 2,4 m yang dibuang menuju ke Sungai Brantas sehingga dapat dimanfaatkan menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan kapasitas daya pembangkitan sebesar 1.273,8 W. Penggunaan generator induksi satu fasa dinilai lebih murah dan mudah diperoleh dalam berbagai ukuran di pasaran. Namun generator induksi juga memiliki kelemahan berupa kebutuhan daya reaktif serta tegangan dan frekuensi yang tidak konstan saat beroperasi sendiri (*isolated system*). Sehingga penelitian ini ditujukan untuk mendapatkan karakteristik kerja generator induksi satu fasa dengan menentukan nilai kapasitor eksitasi yang dibutuhkan untuk mengubah motor induksi satu fasa sebagai generator induksi satu fasa.

Berdasarkan daya pembangkitan PLTMH di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto, dapat dipilih motor induksi yang dioperasikan sebagai generator dengan kapasitas motor sebesar 2 HP. Namun untuk keperluan pengujian disesuaikan dengan kapasitas yang tersedia di Laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yaitu dengan menggunakan motor induksi satu fasa jenis motor kapasitor dengan kapasitas daya sebesar 1 HP.

Pengujian generator induksi satu fasa dioperasikan pada beban resistif lampu pijar 100 watt kondisi rating frekuensi $49 \text{ Hz} \leq f \leq 52,5 \text{ Hz}$ dengan berbagai nilai kapasitor eksitasi untuk mendapatkan besaran-besaran seperti putaran, tegangan, arus, dan daya. Hasil pengujian di laboratorium dengan menggunakan generator induksi 1 HP menunjukkan bahwa tegangan dapat dijaga sesuai dengan tegangan rating dengan mengatur kapasitor eksitasi dan bergantung pada frekuensi kerja generator induksi satu fasa. Daya *output* yang dapat dicapai adalah 714 watt yaitu sebesar 95,7% dari kapasitas yang tertera pada *nameplate* saat bekerja sebagai motor induksi dan efisiensi tertinggi sebesar 98,2% yang mana keduanya pada frekuensi 51,5 Hz.

Kata Kunci : PLTMH, generator induksi satu fasa, karakteristik generator.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sektor energi mempunyai peran yang penting dalam mewujudkan pembangunan nasional berkelanjutan. Pengelolaan, penyediaan, dan pemanfaatan energi nasional perlu dilaksanakan secara optimal. Seperti yang diungkapkan oleh Dewan Energi Nasional (DEN), Eddie Widiono bahwa telah terjadi kelangkaan energi (gas dan listrik) di berbagai daerah serta subsidi energi yang terus meningkat sehingga diperlukan adanya suatu kebijakan untuk mengatasi kelangkaan tersebut dengan diterbitkannya Undang-Undang tentang Energi, dasar hukum pengembangan energi baru dan terbarukan. (Media Informasi dan Komunikasi Dewan Energi Nasional Edisi II, 2010:11). Dalam pelaksanaannya, upaya yang bisa dilakukan adalah konservasi energi yang merupakan suatu kegiatan pemanfaatan energi secara efisien dan rasional tanpa mengurangi penggunaan energi yang benar-benar diperlukan untuk menunjang pembangunan nasional. Salah satu upaya konservasi energi adalah dengan memanfaatkan kembali sumber-sumber energi terbuang.

PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto sebagai salah satu industri yang memproduksi bumbu masak, minyak masak, makanan, dan beberapa pupuk pertanian yang mana menggunakan air dari Sungai Brantas yang telah dijernihkan untuk proses produksi, air minum, dan air pendingin. Air akan dikembalikan lagi ke Sungai Brantas setelah digunakan melalui proses Pengolahan Air Limbah (PAL) atau juga biasa disebut *Waste Water Treatment* (WWT) sehingga kualitas airnya menjadi lebih baik dan bersih. Terdapat 4 pipa air buangan dari proses Pengolahan Air Limbah (PAL) berdiameter 12 inchi menuju Sungai Brantas. Melihat potensi air buangan yang disalurkan lagi ke Sungai Brantas dengan debit rata-rata sebesar $649,6774 \text{ m}^3/\text{h}$ atau $0,1805 \text{ m}^3/\text{s}$. dan tinggi jatuh yang tidak terlalu tinggi maka dipilih Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan menggunakan kincir air. (Mawardi,2002)

Untuk pembangkit listrik berskala kecil seperti PLTMH generator listrik yang digunakan adalah generator sinkron atau generator induksi. Dalam

perancangan ini PLTMH menggunakan motor induksi satu fasa yang dioperasikan sebagai generator induksi satu fasa yang pemakaiannya secara berdiri sendiri (*isolated system*).

Keunggulan generator induksi satu fasa yaitu mempunyai harga unit murah, konstruksi kuat dan sederhana, memerlukan sedikit perawatan, mempunyai keandalan yang tinggi, dan tersedia banyak dipasaran. Tentu saja generator induksi satu fasa ini mempunyai kelemahan antara lain masalah kebutuhan daya reaktif. Generator induksi hanya dapat beroperasi jika disuplai daya reaktif dari luar ataupun dari sistem interkoneksi. Selain itu, kelemahan generator induksi adalah tegangan dan frekuensi yang timbul ketika beroperasi sendiri (*isolated system*).

Oleh karena beberapa latar belakang di atas maka perlu dilakukan perancangan PLTMH dengan mengujikan generator induksi satu fasa. Pelaksanaannya adalah dengan memvariabelkan kapasitor eksitasi dan beban elektrik agar diperoleh keluaran tegangan dan frekuensi yang diinginkan.

1.2 Rumusan Masalah

Sesuai dengan latar belakang yang telah disampaikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Seberapa besarkah potensi energi yang terdapat pada buangan air limbah di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto.
2. Bagaimana cara merancang PLTMH dengan memanfaatkan energi air dari buangan air limbah industri sesuai dengan kondisi yang ada.
3. Bagaimana pengaruh variasi beban terhadap unjuk kerja generator induksi satu fasa yang dilaksanakan di Laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya..

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan mengarah sesuai dengan tujuan, maka pembahasan penelitian ini dibatasi hal-hal sebagai berikut :

1. Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) menggunakan air buangan limbah industri secara teknis.
2. Pembangkit ini direncanakan beroperasi sendiri (*isolated system*).

3. Penentuan jenis kincir air dalam perancangan didapatkan dari studi literatur.
4. Pengujian generator induksi satu fasa berdasarkan peralatan yang tersedia di Laboratorium Mesin Elektrik, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Kontrol tegangan dan frekuensi pada generator induksi satu fasa diatur secara manual (*hand regulated*).

1.4 Tujuan

Tujuan pembahasan dalam penelitian ini adalah untuk merancang Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dengan memanfaatkan air buangan limbah PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto menggunakan generator induksi satu fasa.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan dari penelitian ini terdiri dari :

BAB I Pendahuluan, meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan pustaka, meliputi dasar teori sebagai dasar perancangan PLTMH beserta pembangkitannya meliputi pemilihan jenis kincir air, transmisi mekanik, dan generator induksi satu fasa.

BAB III Metodologi Penelitian, meliputi penjelasan metode pengambilan data serta metode analisis data hasil pengujian.

BAB IV Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), meliputi pembahasan mengenai potensi energi yang ada di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto sebagai dasar perancangan pembangkit dengan menggunakan generator induksi satu fasa.

BAB V Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dan Analisis Data, meliputi pembahasan tata cara pengujian dari pengaruh perubahan kondisi beban terhadap unjuk kerja generator induksi satu fasa.

BAB VI Penutup, meliputi kesimpulan dan saran dari tujuan penelitian yang akan dibuat serta saran dari penulis.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) merupakan suatu pembangkit berskala kecil yang dapat mengubah energi potensial dari jatuhnya air menjadi suatu kerja mekanis, memutar kincir dan generator untuk menghasilkan daya listrik skala kecil yaitu sekitar 1 kW sampai dengan 200 kW. (Subekti, 1997)

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang mana jumlah energi yang dibangkitkan relatif terbatas, maka desain dari PLTMH ini memerlukan konsep tersendiri dengan tidak mengikatkan diri pada standar yang dipakai bagi suatu PLTA besar. Tujuannya adalah agar biaya pembangunan dapat ditekan seminim mungkin dan waktu untuk desain maupun pembangunannya dapat dipersingkat.

2.2 Proses Konversi Energi Elektrik Pada Sistem PLTMH

Prinsip suatu PLTMH yang terpenting adalah debit air dan ketinggian jatuh untuk menghasilkan tenaga yang bermanfaat. Hal ini merupakan suatu sistem konversi tenaga, menyerap tenaga dari bentuk ketinggian dan aliran dan menyalurkan tenaga dalam bentuk daya listrik dan daya mekanik. Tidak ada sistem konversi daya yang dapat mengirim sebanyak yang diserap dikurangi sebagian daya yang hilang oleh sistem itu sendiri dalam bentuk gesekan, panas, atau *noise*. (Harvey, 1993: 4)

Dari energi potensial dari berat air yang ada pada tiap sudu yang aktif akan diubah menjadi energi kinetik berupa hantaman air terhadap sudunya, sehingga besarnya daya hidrolis (P_h) dapat ditentukan dengan persamaan :

$$P_h = 9,81 \cdot Q_p \cdot \rho \cdot H_n + \frac{1}{2} \cdot Q_p \cdot \rho \cdot v^2 \quad \text{W}$$

$$P_h = 9,81 \cdot Q_p \cdot H_n + \frac{1}{2} \cdot Q_p \cdot v^2 \quad \text{kW} \quad (2.1)$$

Keterangan :

P_h : daya hidrolis (kW)

Q_p : debit air (m^3/s)

- H_n : tinggi jatuh air efektif (m)
 ρ : massa jenis air (=1000 kg/m³)
 v : kecepatan air yang menumbuk sudu (m/s)

Perlu diketahui pula daya mekanik dari kincir air, dengan menggunakan efisiensi kincir (η_k). Maka untuk mendapatkan daya mekanik kincir adalah dengan persamaan :

$$P_k = \eta_k \cdot P_h \quad \text{kW} \quad (2.2)$$

Dalam proses konversinya maka terdapat sistem transmisi mekanik dari kincir ke generator dengan efisiensi transmisi mekanik (η_{tm}), selain itu perlu mempertimbangkan efisiensi generator (η_g). Maka akan diperoleh daya kelaran generator sesuai dengan persamaan :

$$P_{out} = \eta_k \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_g \cdot P_h \quad \text{kW} \quad (2.3)$$

Atau :

$$P_{out} = \eta_{total} \cdot P_h \quad \text{kW} \quad (2.4)$$

$$P_{out} = \eta_{total} \cdot (9,81 \cdot Q_p \cdot H_n + \frac{1}{2} \cdot Q_p \cdot v^2) \quad \text{kW} \quad (2.5)$$

2.3 Kincir Air

Kincir air dapat berputar ketika memperoleh energi potensial dari berat air pada tiap-tiap sudu yang aktif serta akan menghasilkan energi kinetik yang berasal dari hantaman air terhadap tiap-tiap sudunya yang mana juga digunakan untuk mengkopel rotor generator. Dengan prinsip tersebut perlu diperhatikan kecepatan air yang akan mengalir pada sudu-sudu kincir air. Kecepatan air yang dihasilkan harus kecil agar ketika air melalui sudu air tidak akan melimpah ke luar atau terdapat energi yang hilang percuma.

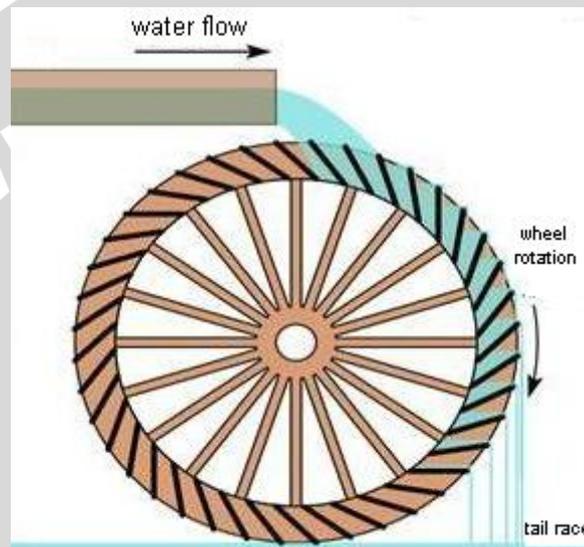
Kapasitas air dan ketinggian lokasi akan menentukan jenis kincir air yang digunakan. Untuk kapasitas 0,1 - 1.0 m³/s dan ketinggian 3 - 12 m maka dipilih kincir dengan jenis *over-shot*, untuk kapasitas 0.3 - 3.0 m³/s dan ketinggian 2 - 5 m dipilih kincir dengan jenis *breast-shot*, sedangkan kapasitas air 0.2 - 5.0 m³/s dan ketinggian 0.4 - 3.0 m menggunakan kincir dengan jenis *under-shot*. (Müller, 2002:

2)

2.3.1 Jenis-Jenis Kincir Air

2.3.1.1 Kincir Air *Over-Shot*

Kincir air *over-shot* merupakan kincir yang prinsip kerjanya apabila terdapat air yang mengalir dan jatuh ke dalam sudu-sudu sisi bagian atas, akibat adanya gaya berat air maka roda kincir akan berputar. Diameter dari roda harus pas, yang mana jika pada posisi di atas sudu harus dapat terisi air dan pada posisi di bawah air harus terbuang semua ke saluran pembuangan, yang digambarkan sesuai dengan Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Kincir Air Over-Shot

Sumber : Soto, 1994:197

Adapun kelebihan dari kincir air over-shot ini sebagai berikut :

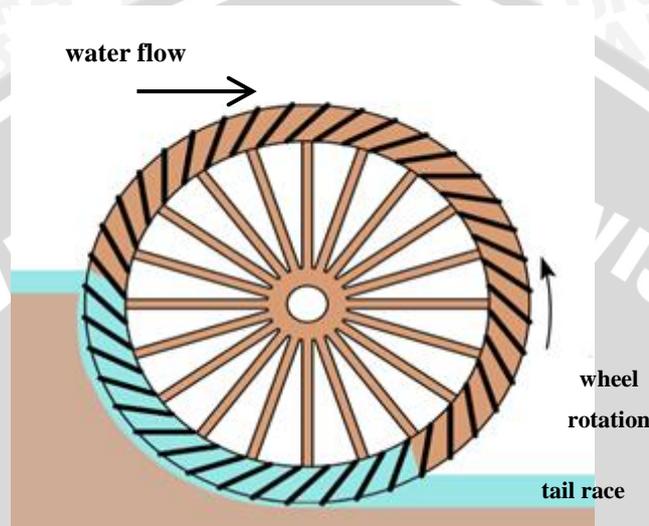
- 1) Tingkat efisiensi yang tinggi.
- 2) Tidak membutuhkan aliran yang deras.
- 3) Konstruksi yang sederhana.
- 4) Mudah dalam perawatan.

Sedangkan kerugiannya adalah sebagai berikut :

- 1) Karena aliran air berasal dari atas maka biasanya diperlukan reservoir air atau bendungan air, sehingga memerlukan investasi yang lebih banyak.
- 2) Membutuhkan ruang yang lebih luas untuk penempatan kincir air.
- 3) Daya mekanik yang dihasilkan relatif kecil.

2.3.1.2 Kincir Air *Breast-Shot*

Kincir air *breast-shot* merupakan kincir air yang digunakan untuk ketinggian jatuh 2 sampai dengan 5 m. Jarak tinggi jatuhnya tidak melebihi diameter kincir, arah aliran air yang menggerakkan kincir air di sekitar sumbu poros dari kincir air (Gambar 2.2). Sehingga aliran air akan menabrak sudu yang berdekatan dengan bagian tengah dari kincir.



Gambar 2.2. Kincir Air Breast-Shot

Sumber : Soto, 1994: 197.

Adapun kelebihan dari kincir air *breast-shot* ini sebagai berikut :

- 1) Tipe ini lebih efisien dari tipe *under-shot*.
- 2) Apabila dibandingkan dengan kincir air tipe *over-shot*, tinggi jatuhnya lebih pendek.
- 3) Dapat diaplikasikan pada sumber air yang alirannya datar.

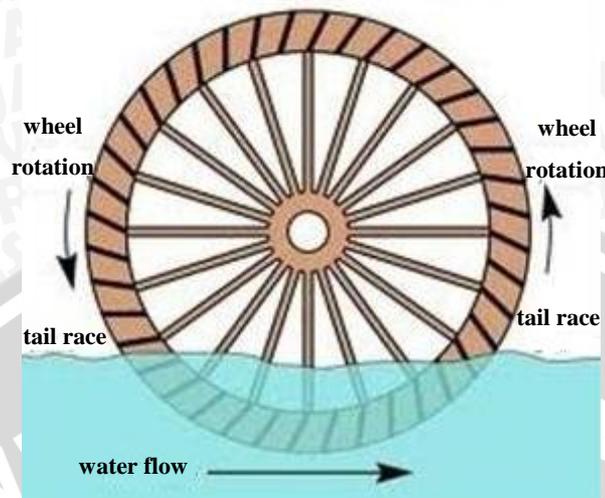
Sedangkan kerugiannya adalah sebagai berikut :

- 1) Sudu-sudu dari tipe ini tidak rata seperti tipe *under-shot* (lebih rumit).
- 2) Diperlukan dam pada arus aliran datar.
- 3) Efisiensi lebih kecil dari pada tipe *over-shot*.

2.3.1.3 Kincir Air *Under-Shot*

Kincir air *under-shot* ini dapat bekerja bila air yang mengalir, menghantam dinding sudu yang terletak pada bagian bawah dari kincir air. Kincir air tipe ini

tidak mempunyai tambahan keuntungan head yang tampak pada Gambar 2.3. Tipe ini cocok dipasang pada perairan dangkal pada daerah yang rata.



Gambar 2.3. Kincir Air Under-Shot

Sumber : Soto, 1994: 197.

Adapun kelebihan dari kincir air *under-shot* ini sebagai berikut :

- 1) Konstruksi lebih sederhana.
- 2) Lebih ekonomis.
- 3) Mudah untuk dipindahkan.

Sedangkan kerugiannya adalah sebagai berikut :

- 1) Efisiensinya kecil.
- 2) Daya yang dihasilkan relatif kecil.

2.4 Perancangan Kincir Air

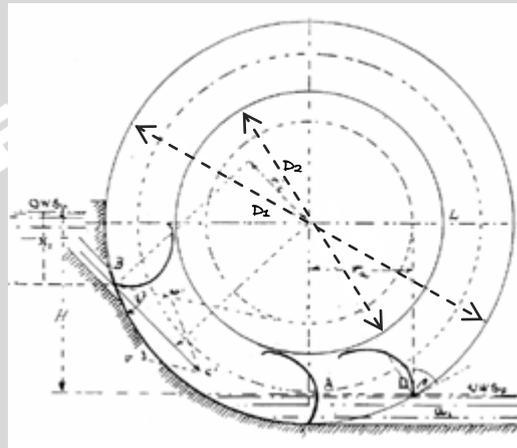
Untuk melakukan perancangan kincir air perlu memperoleh dimensi kincir air. Seperti yang diketahui bahwa kincir air ini merupakan penggerak generator sebagai pembangkit listrik. Dalam perancangan ini terdapat parameter-parameter desain yang dilihat dari tinggi jatuh (H_n) dan debit air (Q) yang dapat ditentukan oleh data potensi air yang tersedia.

2.4.1 Diameter Luar dan Diameter Dalam Kincir Air

Diameter kincir air terdapat dua yaitu diameter luar (D_1) dan diameter dalam (D_2) yang keduanya ditentukan pertimbangan yang tersendiri.

Diameter luar (D_1) ditentukan berdasarkan ketinggian lokasi yang diperoleh sebagai tempat dibangunnya kincir air tersebut. Selain itu perlu dipertimbangkan jarak antara sisi bagian atas kincir dengan ujung saluran air apabila ditambahkan saluran pengarah air menuju sudu, serta jarak antara sisi bawah kincir dengan saluran pembuang. (Gambar 2.4)

Sedangkan diameter dalam (D_2) perlu mempertimbangkan volume air yang dapat ditampung oleh tiap sudu yang akan dipasang berdasarkan debit air dan disesuaikan dengan lebar kincir pada perancangan. (Gambar 2.4)



Gambar 2.4 Diameter Luar dan Diameter Dalam Kincir Air

Sumber : Müller, 2002: 5

2.4.2 Kecepatan Aliran Air

Untuk menentukan kecepatan aliran air disesuaikan dengan jenis salurannya. Untuk kondisi saluran tertutup (*pipe flow*) dalam mencari kecepatan aliran air dapat dengan menggunakan persamaan : (Patty,1995:80)

$$Q = A \cdot v \quad (2.6)$$

Dengan penampang saluran tertutup berupa lingkaran, maka :

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.7)$$

Keterangan :

- Q : debit air (m^3/s)
- A : luas permukaan saluran (m^2)
- v : kecepatan rata-rata aliran (m/s)
- D : diameter saluran tertutup (m)

Namun untuk mendapatkan kecepatan aliran air ketika menumbuk sudu kincir sebesar U_1 sehingga dapat menggerakkan kincir atau disebut sebagai kecepatan keliling kincir air, sesuai dengan persamaan : (Sutikno, 1997:21)

$$N = \frac{60 \cdot U_1}{\pi \cdot D_1} \quad (2.8)$$

$$U_1 = \frac{v \cdot \cos \alpha_1}{2} \quad (2.9)$$

Keterangan :

D_1 : diameter luar kincir (m)

U_1 : kecepatan keliling kincir air (m/s)

N : kecepatan putaran kincir air (rpm)

v : kecepatan rata-rata aliran (m/s)

α_1 : sudut masuk pancaran air pada sudu-sudu kincir dalam derajat

2.4.3 Sudu Kincir Air

Dalam perancangan lebar dan panjang lengkungan sudu adalah menggunakan pendekatan volume sepertiga tabung dengan alas lingkaran yang mana tinggi tabung sama dengan lebar sudu dan jari-jari tabung sama dengan jari-jari sudu. Dengan catatan bahwa tiap-tiap sudu yang aktif harus mampu dalam menampung debit air yang dibebankan terhadapnya untuk memperoleh berat air. Sehingga untuk menghitung lebar sudu perlu debit yang dapat ditampung oleh tiap sudu, sesuai dengan persamaan :

$$V = \frac{Q}{i} \quad \text{m}^3 \quad (2.10)$$

Perhitungan lebar sudu juga mempertimbangkan dengan diameter saluran tertutup yang digunakan, maka :

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l \quad \text{m}^3 \quad (2.11)$$

Untuk mendapatkan panjang busur lingkaran sudu dengan persamaan:

$$L_n = \frac{1}{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \quad \text{m} \quad (2.12)$$

Keterangan :

V : volume air yang mampu ditampung oleh sudu kincir (m^3)

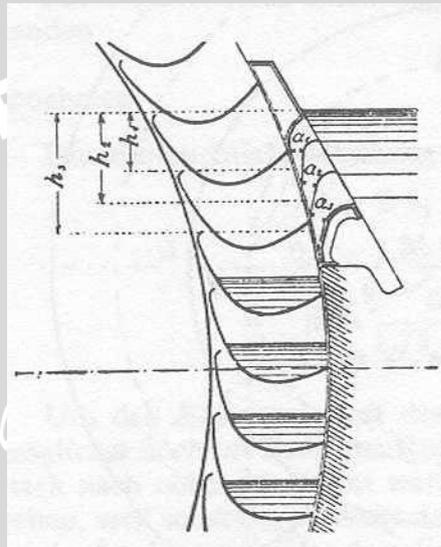
i : jumlah sudu yang terisi oleh air

r : jari-jari sudu (m)

Q : debit air (m^3/s)

L_n : panjang lengkung sudu (m)

Sehingga penjelasan dari sudu dari kincir air dapat dilihat seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sudu Kincir Air

Sumber : (Müller, 2002: 5)

2.5 Sistem Transmisi Mekanik

Sistem transmisi mekanik berfungsi untuk memindahkan daya dari putaran kincir ke generator. Transmisi mekanik menggunakan *V belt* dan *pulley* dengan rasio tertentu untuk menaikkan putaran sehingga generator dapat bekerja pada putaran operasinya. Apabila kecepatan kincir air berbeda dengan kecepatan putar generator, maka dalam pengkopelannya dapat digunakan transmisi mekanik.

2.5.1 Pulley

Pulley merupakan salah satu elemen mesin yang berfungsi mentransmisikan daya. Sifat elastisitas daya dari sabuk untuk menampung kejutan dan getaran pada saat transmisi. Bentuk *pulley* adalah bulat dengan ketebalan tertentu, di tengah-tengah puli terdapat lubang poros. Sehingga dalam sistem transmisi ini berlaku persamaan : (Hagendoorn, 1989:20)

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad (2.13)$$

Keterangan :

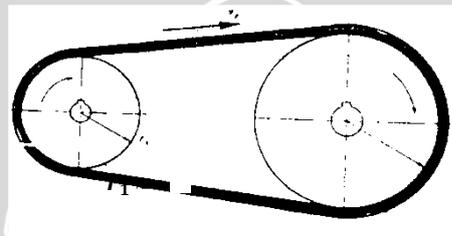
n_1 : kecepatan putar *pulley* 1 (rpm)

n_2 : kecepatan putar *pulley* 2 (rpm)

r_1 : jari-jari *pulley* 1 (m)

r_2 : jari-jari *pulley* 2 (m)

Dengan menggunakan sistem transmisi *pulley* dan sabuk, maka kecepatan putar generator dapat diatur pada nilai tertentu berdasarkan kecepatan putar kincir. Dengan mengubah perbandingan jari-jari *pulley* sistem transmisi seperti Gambar 2.6, maka akan didapatkan nilai kecepatan putar yang berbeda-beda tergantung dengan nilai perbandingannya.

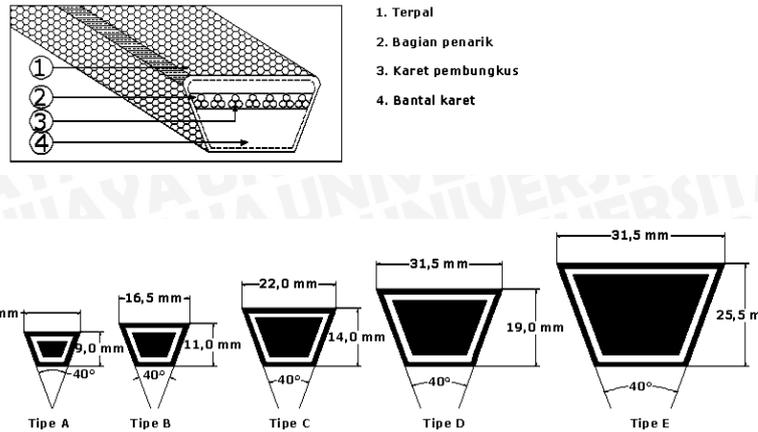


Gambar 2.6 Sistem Transmisi *Pulley* dan Sabuk

Sumber : Hagendoorn, 1989: 23

2.5.2 Sabuk V (*V-belt*)

Jarak yang jauh antara dua buah poros sering tidak memungkinkan transmisi langsung dengan roda gigi. Dalam hal demikian, cara transmisi putaran atau daya yang lain dapat di terapkan, di mana sebuah sabuk luwes dibelitkan sekeliling puli. Sebagian besar transmisi sabuk – V mudah penanganannya dan harganya murah dengan konstruksi seperti Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Konstruksi dan Ukuran Penampang Sabuk-V
 Sumber : Sularso, 1994:164

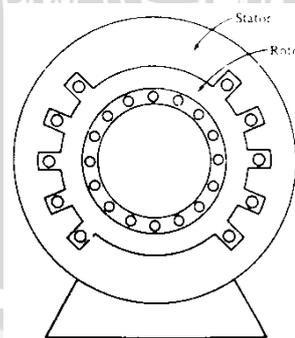
2.5.3 Gardan

Gardan merupakan suatu elemen mesin yang terdiri dari susunan roda gigi yang berfungsi untuk merubah putaran poros penggerak menjadi putaran poros roda yang selanjutnya akan diteruskan ke roda. Selain itu gardan ini juga untuk membedakan putaran antara roda sisi kiri dan kanan pada saat kendaraan berbelok.

2.6 Mesin Induksi Satu Fasa

2.6.1 Konstruksi Mesin Induksi Satu Fasa

Konstruksi mesin (motor) induksi satu fasa hampir sama dengan mesin (motor) induksi tiga fasa rotor sangkar, yang membedakannya pada kumparan stator yang berupa kumparan satu fasa yang diperlihatkan pada Gambar 2.8.



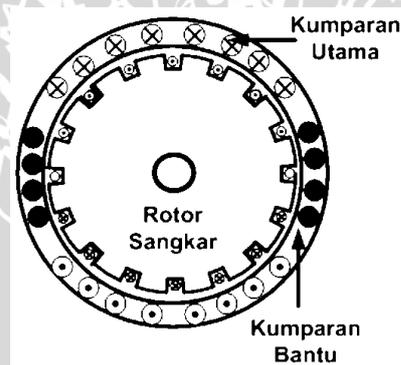
Gambar 2.8 Konstruksi Mesin Induksi Satu Fasa
 Sumber: Chapman, 2006: 635

Mesin induksi satu fasa mendapat suplai dari sumber satu fasa bolak balik yang diberikan kepada kumparan stator tidak menghasilkan medan magnet yang berputar sehingga motor induksi satu fasa tidak mempunyai torsi start yang

sebenarnya. Apabila medan magnet stator tidak berputar maka tidak akan dihasilkan gerak relatif antara medan stator dan batang-batang rotor. Akibatnya seolah-olah tidak ada tegangan yang diinduksikan pada rotor, tidak ada arus yang mengalir pada batang rotor.

Padahal pada kenyataannya tegangan tetap diinduksikan pada batangan rotor (seperti pada prinsip kerja transformator), dan selama rotor dalam keadaan hubung-singkat maka akan timbul arus yang mengalir pada batang rotor. Jadi sebenarnya sudah ada medan magnet yang ditimbulkan oleh kumparan stator tetapi tetap saja tidak dihasilkan torsi *start* yang dapat memutar stator.

Pada inti stator mesin induksi ini dibuat berlapis-lapis pelat baja beralur. Agar mesin ini dapat melakukan *start* sendiri maka mesin induksi harus diubah menjadi dua fasa. Yang mana kumparan utama (*main stator winding*) ditambah dengan kumparan bantu (*auxiliary stator winding*) dan antara kedua kumparan ini harus mempunyai beda fasa sebesar 90° listrik yang sesuai dengan Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Kumparan Pada Motor Induksi Satu Fasa

Sumber : Sumardjati,2008:455

Pada saat motor berputar maka akan terdapat slip yang besarnya tergantung dari kecepatan dan arah putaran dari motor masing-masing slip yang dihasilkan dapat dijelaskan sebagai berikut : (Sumardjati,2008:454)

- 1) Slip pada saat motor beputar arah maju :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} = 1 - \frac{N_r}{N_s} \quad (2.14)$$

- 2) Slip pada saat motor beputar arah mundur :

$$S_i = \frac{N_s - (-N_r)}{N_s} = 1 + \frac{N_r}{N_s} \quad (2.15)$$

$$S_i = 1 + (1 - S) = (2 - S) \quad (2.16)$$

Keterangan :

s : slip

N_s : kecepatan medan putar atau kecepatan sinkron (rpm)

N_r : kecepatan putar rotor (rpm)

2.6.2 Prinsip Kerja Generator Induksi

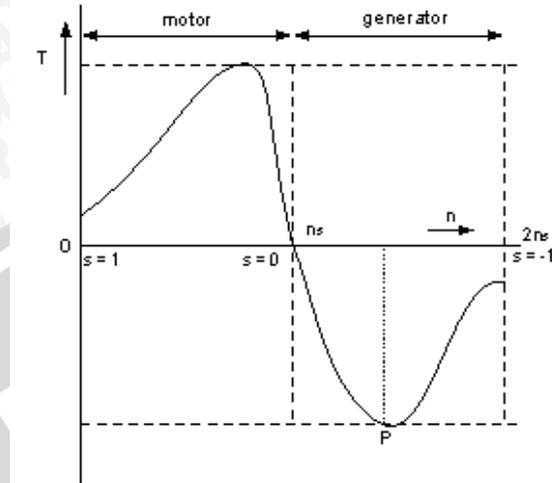
Mesin induksi yang dioperasikan tanpa beban dan terhubung dengan jala-jala, rotornya akan berputar sedikit lebih rendah dari kecepatan sinkronnya. Hal ini terjadi karena torsi mesin dipakai untuk melawan rugi-rugi mekanis yang ditimbulkan oleh gesekan bantalan (*bearing*) dan angin. Bila dipasang suatu beban mekanis pada porosnya, maka mesin tersebut berfungsi sebagai motor dan rotor berputar dengan slip s yang besarnya tergantung dari torsi yang dibutuhkan beban.

Akibat adanya slip, medan magnet putar yang ditimbulkan oleh belitan stator akan terpotong oleh batang-batang tembaga (konduktor) rotor, sehingga mengakibatkan rotor selalu dipotong oleh medan magnet putar. Dengan demikian akan timbul tegangan induksi pada rotor. Karena konduktor rotor antara yang satu dengan yang lain terhubung singkat, maka timbul arus rotor. Interaksi antara medan magnet putar pada stator dan arus pada rotor akan menghasilkan torsi. Torsi ini digunakan untuk memikul beban dan melawan rugi-rugi.

Apabila rotor mesin induksi dihubungkan suatu mesin penggerak dengan arah putaran yang sama tetapi putarannya sedikit lebih cepat dari putaran sinkronnya, maka mesin induksi beroperasi sebagai generator. Pada operasi sebagai generator, seolah-olah medan magnetnya diam dan rotornya yang bergerak memotong medan magnet putar tersebut. Untuk melawan torsi yang ditimbulkan oleh hasil interaksi antara medan magnet stator dengan arus rotor, diperoleh dari torsi mesin penggerak.

Gambar 2.10 menunjukkan bahwa saat putaran rotor mulai dari 0 sampai pada putaran n_s (putaran sinkron) mempunyai nilai s (slip) positif dan nilai τ (torsi) positif. Saat torsi positif berarti mesin mengeluarkan (memberikan) torsi yang mana bekerja sebagai motor. Sedangkan untuk putaran di atas kecepatan sinkron, nilai torsi negatif yang berarti mesin membutuhkan torsi. Hal ini

menunjukkan mesin bekerja sebagai generator yang membutuhkan torsi dari mesin penggerak mula. Saat perkalian antara torsi dan kecepatan putar bernilai negatif, maka motor induksi akan bekerja sebagai generator induksi (Kadir, 1981:20)



Gambar 2.10 Karakteristik Torsi-Kecepatan Putaran Pada Mesin Induksi

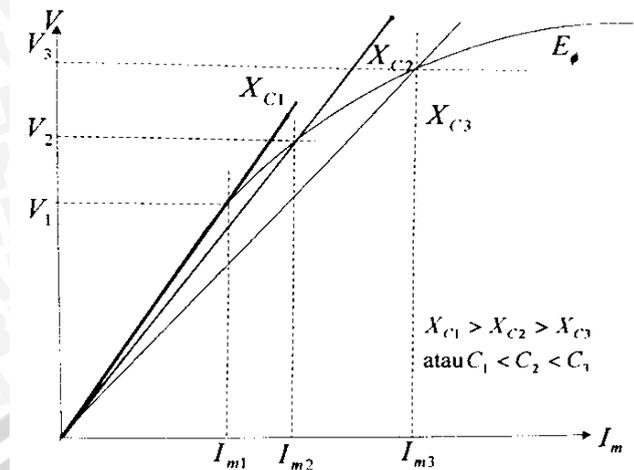
Sumber: Bhattacharya, 1986:65

Mesin induksi beroperasi sebagai generator pada $s < 0$, meskipun mesin induksi tersebut telah menyerap daya dari jala-jala sewaktu beroperasi sebagai motor ($0 < s < 1$). Dengan demikian, tenaga mekanis diubah menjadi tenaga listrik. Slip negatif pada Gambar 2.10 hanya berlaku saat mesin induksi beroperasi sebagai generator induksi yang terhubung dengan jala-jala.

Jika penguat mesin induksi diperoleh dari jala-jala sewaktu beroperasi sebagai generator, maka generator induksi tersebut tidak dapat membangkitkan daya tanpa terhubung dengan jala-jala. Sedangkan untuk generator induksi yang beroperasi sendiri, rangkaian bank kapasitor (*capasitor bank*) diperlukan untuk memberikan daya reaktif. (Santoso, 1984)

2.6.3 Kapasitor Eksitasi

Generator induksi yang beroperasi sendiri membutuhkan daya reaktif dari kapasitor untuk dapat membangkitkan tegangan. Kapasitansi kapasitor sangat menentukan terjadinya eksitasi sendiri yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Tegangan Terminal Generator Sebagai Fungsi Arus Magnetisasi

Sumber: Mc. Pherson, 1990:309

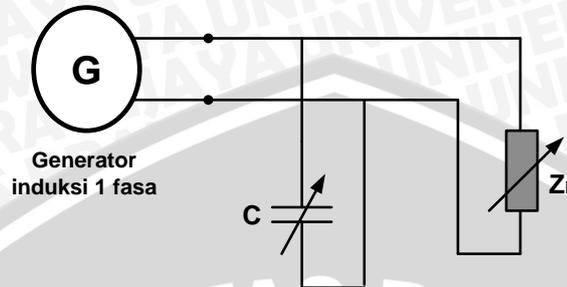
Agar terjadi eksitasi sendiri maka membutuhkan kapasitansi minimum (kritis). Pada keadaan ini garis reaktansi menyinggung kurva magnetisasi seperti pada Gambar 2.11. makin kecil kapasitansi dari kapasitansi kritis maka garis impedansi tidak lagi memotong kurva magnetisasi, sehingga eksitasi sendiri tidak dapat dicapai dan generator induksi tidak dapat membangkitkan tegangan. Kurva magnetisasi sebanding dengan frekuensi, tetapi kemiringan garis X_c berbanding terbalik dengan frekuensi, sehingga pada saat kecepatan berkurang diperlukan kapasitansi kapasitor eksitasi yang lebih besar agar tegangan dapat dibangkitkan. Pada keadaan ini garis X_c memotong kurva magnetisasi. (Mc. Pherson, 1990:305)

Makin besar kapasitansi kapasitor maka akan menyebabkan tegangan terminal generator induksi juga menjadi besar. Pembebanan akan menyebabkan penurunan tegangan pada generator dan penurunan arus eksitasi. Oleh sebab itu, kapasitansi kapasitor harus lebih besar dari nilai sebelumnya agar tegangan terminal generator meningkat. (Budiono, 2002:12)

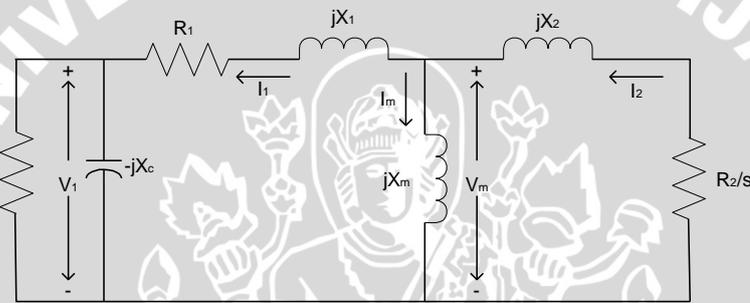
2.6.4 Generator Induksi yang Dioperasikan Sendiri

Analisis generator induksi dioperasikan terisolasi lebih rumit dibandingkan saat generator dihubungkan dengan jala-jala. Hal ini dikarenakan frekuensinya tidak tetap dan eksitasi harus disediakan dengan menghubungkan kapasitor pada terminal keluaran generator. (Mc. Pherson, 1990:304)

Frekuensi tidak hanya bergantung pada kecepatan dari penggerak namn juga bergantung pada slip dari mesin ini, yang mana dapat diatur tergantung dari besarnya daya yang diperlukan oleh beban elektrik.(Mc. Pherson, 1990:304)



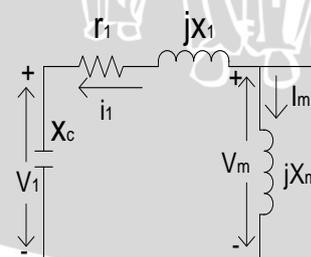
Gambar 2.12 Diagram Koneksi Generator Induksi 1 Fasa Beroperasi Sendiri



Gambar 2.13 Model Rangkaian Fasa Satu Generator Induksi dan Beroperasi Sendiri Berbeban Pada Frekuensi Dasar

Sumber: Mc. Pherson, 1990:305

Pada Gambar 2.13, reaktansi rangkaian generator induksi beroperasi sendiri diukur pada frekuensi dasar. Rangkaian ekivalen generator induksi beroperasi sendiri tanpa beban ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Rangkaian Ekivalen Tiap Fasa Generator Induksi Beroperasi Sendiri Tanpa Beban

Sumber: Mc. Pherson, 1990:308

Keterangan Gambar 2.14:

- V_m : tegangan magnetisasi
- X_m : reaktansi magnetik
- I_m : arus magnetisasi
- V_1 : tegangan terminal generator
- r_1 : resistansi stator
- x_1 : reaktansi stator
- r_2 : resistansi stator
- x_2 : reaktansi stator
- s : slip

Pada keadaan tanpa beban R akan bernilai tak hingga dan slip bernilai kecil hampir mendekati nol, sehingga mengakibatkan R_2/s menjadi *open circuit*. Besarnya tegangan magnetisasi adalah: (Mc. Pherson, 1990:310)

$$|V_m| = X_m I_m = \left[\left(\frac{V_1^2}{I_m^2} - r_1 \right)^{1/2} - x_1 \right] I_m \quad (2.17)$$

Sama seperti yang telah dibahas sebelumnya bahwa generator induksi satu fasa yang beroperasi sendiri (*isolated system*) dapat beroperasi salah satunya adalah rotor harus mempunyai fluks remanensi yang cukup. Pada keadaan tanpa beban, arus yang mengalir melalui kapasitor adalah:

$$i_c = v_1 \cdot \omega \cdot C = \frac{v_1}{X_c} \quad (2.18)$$

Reaktansi stator x_1 sangat kecil dibandingkan reaktansi magnetik X_m . Maka arus yang melewati kapasitor seperti pada persamaan (2.18) adalah sama dengan arus magnetisasi pada kecepatan sinkron.

$$i_c \cdot X_c = i_m \cdot X_c \quad (2.19)$$

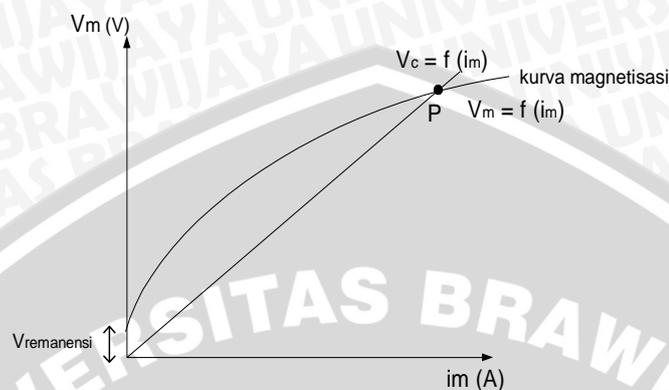
sehingga,

$$i_m = \frac{v_m}{X_m} \approx \frac{v_1}{X_m} \quad (2.20)$$

Pada operasi keadaan mantap, garis $i_m X_c$ harus memotong kurva magnetisasi yang merupakan fungsi v_m terhadap i_m seperti dalam Gambar 2.15,

Dari persamaan (2.20) terlihat bahwa besar v_m besarnya sebanding dengan v_1 . Titik operasi P dapat ditentukan, sehingga didapat:

$$v_1 = i_m \cdot X_c \quad (2.21)$$



Gambar 2.15 Penentuan Titik Operasi Generator Induksi Kondisi Tanpa Beban

Sumber: Nasar, 1995: 183

Karena :

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.22)$$

Maka,

$$i_m = 2\pi f C v_1 \quad (2.23)$$

dari persamaan (2.23) frekuensi operasi diberikan oleh persamaan:

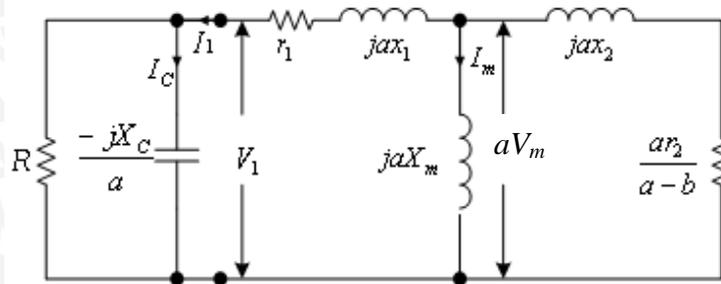
$$f = \frac{i_m}{2\pi f C v_1} \quad (2.24)$$

Frekuensi operasi pada umumnya telah ditetapkan, maka persamaan (2.24) akan diperoleh besarnya kapasitor yang diperlukan untuk memberikan daya reaktif pada generator induksi yang beroperasi sendiri. (Nasar, 1995:184)

2.6.5 Tegangan Keluaran Generator Induksi Satu Fasa

Tegangan terminal akan muncul pada generator induksi beroperasi sendiri yang berputar jika inti rotor mempunyai remanensi magnet dan kapasitor eksitasi terhubung dengan terminal keluaran. Mesin yang pernah diputar terlebih dahulu memiliki remanensi magnet yg diperlukan rotornya. (Mc. Pherson, 1990:307)

Model rangkaian fasa tunggal generator induksi beroperasi sendiri yang dipengaruhi frekuensi ditunjukkan seperti pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Rangkaian Ekuivalen Generator Induksi Penguatan Sendiri Dipengaruhi Frekuensi Berbeban Resistif

Sumber: Mc. Pherson, 1990:306

Perbandingan antara frekuensi yang dibangkitkan generator dengan frekuensi dasar, yaitu: (Mc. Pherson, 1990:306)

$$a = \frac{f}{f_b} \tag{2.25}$$

Keterangan :

f : frekuensi yang dibangkitkan generator

f_b : frekuensi dasar

Perbandingan antara kecepatan generator yang sedang beroperasi ω dengan kecepatan sinkron ω_s , adalah : (Mc. Pherson, 1990:305)

$$b = \frac{\omega}{\omega_s} \tag{2.26}$$

Keterangan :

ω : kecepatan generator yang beroperasi

ω_s : kecepatan dasar

Tegangan terinduksi pada celah udara diberikan pada persamaan: (Mc. Pherson, 1990:314)

$$V_m = aV_{mo} \tag{2.27}$$

Keterangan :

V_m : Tegangan terinduksi celah udara

V_{mo} : Tegangan terinduksi celah udara pada frekuensi dasar



Tegangan pada terminal keluaran generator ditunjukkan oleh persamaan:
(Mc. Pherson, 1990:315)

$$V_1 \approx \frac{\alpha V_{mo}}{1 - \alpha^2 (X_1/X_C)} \quad (2.28)$$

2.6.6 Tegangan dan Frekuensi pada Generator Induksi Satu Fasa

Parameter yang dipakai untuk menilai mutu listrik adalah variasi tegangan, variasi frekuensi, serta besar harmonisa. Karena generator induksi satu fasa ini beroperasi sendiri (*isolated system*) maka dapat dikarakteristikan dengan mode pengoperasiannya pada variabel frekuensi. Untuk mendapatkan frekuensi yang diinginkan maka dapat dengan mengatur kecepatan putar poros generator, karena frekuensi generator sebanding dengan kecepatan putar porosnya.

Yang mana ditunjukkan pada persamaan : (Mc. Pherson, 1990:307)

$$f = \frac{p \cdot \omega_s}{4 \cdot \pi} = \frac{p}{4 \cdot \pi} \frac{\omega}{1-s} \quad (2.29)$$

Keterangan :

f : frekuensi keluaran generator (Hz)

p : jumlah kutub

ω_s : kecepatan dasar (rpm)

ω : kecepatan generator yang beroperasi (rpm)

s : slip

Pengaturan tegangan dan frekuensi dilakukan dengan melakukan pengecekan kecepatan putaran poros generator. Kemudian apabila frekuensi telah nominal, dilakukan pengecekan tegangan. Apabila tegangan masih belum nominal maka dilakukan pengaturan tap kapasitor yang terhubung pada terminal generator.

2.6.7 Beban Generator Induksi Satu Fasa

2.6.7.1 Beban Resistif

Beban resistif hanya menyerap daya nyata. Kenaikan beban akan memperbesar tegangan jatuh pada stator dan memperbesar fluksi bocor. Akibatnya tegangan generator akan turun, padahal tegangan terminal generator induksi satu fasa sangat menentukan arus eksitasi. Untuk kapasitor yang besarnya konstan, penurunan tegangan akan mengurangi besarnya arus eksitasi. Akibatnya,

tegangan yang terinduksi pada rotor juga menurun, sehingga tegangan pada terminal generator juga menurun. (Budiono, 2002:12)

2.6.7.2 Beban Induktif

Beban induktif yang terhubung pada terminal generator akan menyerap daya reaktif yang dihasilkan oleh kapasitor eksitasi, sehingga generator akan kehilangan sebagian suplai daya reaktifnya. Daya reaktif ini sebagian akan mengalir ke beban induktif dan sebagian lagi digunakan untuk membangkitkan tegangan generator, akibatnya tegangan generator akan turun sesuai dengan suplai daya reaktif yang tersisa. (Budiono, 2002:12)

Pembebanan induktif sangat tidak menguntungkan untuk generator induksi, sebab penurunan tegangannya akan menjadi sangat tajam. Hal ini disebabkan oleh mengalirnya sebagian daya reaktif yang dihasilkan kapasitor ke beban sehingga generator kekurangan arus eksitasi. Penurunan tegangan dengan beban induktif akan lebih cepat dibandingkan pembebanan dengan beban resistif. (Gatut Budiono, 2002:15)

2.6.7.3 Beban Kapasitif

Untuk pembebanan generator induksi satu fasa dengan beban kapasitif, generator akan seolah-olah mendapatkan arus eksitasi tambahan dari beban, sehingga besarnya kapasitor eksitasi menjadi :

$$C_{\text{eksitasi sekarang}} = C_{\text{awal}} + C_{\text{beban}} \quad (2.29)$$

Keterangan :

$C_{\text{eksitasi sekarang}}$: kapasitansi kapasitor yang digunakan sekarang (Farad)

C_{awal} : kapasitansi kapasitor sebelum penambahan (Farad)

C_{beban} : kapasitansi kapasitor beban (Farad)

Jika generator induksi diberi beban kapasitif yang cukup besar, maka tegangan generator akan naik melebihi tegangan pada keadaan tanpa beban. Bila besarnya daya reaktif dari generator dan beban cukup besar untuk mengimbangi tegangan jatuh pada kumparan stator dan fluksi bocor, maka tegangan terminal generator akan seimbang. (Budiono, 2002:12)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam metode penelitian untuk melakukan perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) dapat dilihat seperti dibawah ini :

3.1 Objek Penelitian

Objek penelitian dalam skripsi ini adalah perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) sebagai pemanfaatan aliran air pipa pembuangan limbah PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto menuju Sungai Brantas dengan mengetahui unjuk kerja generator induksi satu fasa.

3.2 Studi Literatur

Untuk mendukung penelitian perlu dilakukan studi literatur sebagai dasar dalam mempelajari dan memahami konsep yang terkait, yaitu mengenai :

1. Teori dasar mengenai proses konversi energi pada PLTMH.
2. Teori dasar perancangan kincir air dan transmisi mekanik pada PLTMH.
3. Teori dasar mengenai generator induksi satu fasa.

3.3 Survey Lapangan

Survey lapangan dilakukan untuk mengamati dan mengetahui kondisi secara riil di lapangan, apakah lokasi yang dipilih merupakan lokasi yang terbaik untuk perencanaan pembangkit berskala mikro dengan tinggi jatuh dan debit air yang cukup. Selain itu dengan survey lapangan ini dapat memperoleh berbagai macam informasi berupa data yang terkait dengan perancangan teknis PLTMH.

3.4 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan untuk memudahkan proses pengerjaan penelitian. Data-data yang diambil merupakan data-data terkait berupa potensi aliran air yang ada pada PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto, sehingga diketahui apakah dimungkinkan untuk pengembangan pembangkit dan dapat menentukan jenis maupun konstruksi pembangkit yang dirancang. Data-data yang diperlukan dalam perancangan meliputi :

1) **Debit Air**

Pengambilan data debit air dilakukan dengan melihat alat ukur yang terpasang pada tiap-tiap saluran pembuangan air limbah. Alat ini disebut dengan *flow meter* yang merupakan alat ukur debit air dan total volume keluaran air buangan. Pengukuran ini dilakukan dalam beberapa waktu dalam sehari sehingga dapat diperkirakan rata-rata debit air tiap harinya.

2) **Tinggi Jatuhan Air**

Tinggi jatuhan air ini dilakukan dengan menggunakan meteran yaitu mengukur ketinggian dari pipa terbawah hingga permukaan Sungai Brantas. Serta dengan melakukan pengukuran terhadap elevasi kemiringan pipa pembuangan yang dimungkinkan untuk penambahan ketinggian.

3) **Kondisi Fisik**

Data mengenai kondisi fisik PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto dilakukan proses *interview*, observasi, dan dokumentasi perusahaan yang berhubungan dengan data-data yang lain sehingga akan mendukung pelaksanaan perancangan.

3.5 **Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)**

Dengan data-data berupa debit air, tinggi jatuh air dan kondisi fisik dari perusahaan maka dapat dilakukan perhitungan terhadap potensi air buangan yang akan memperoleh daya keluaran generator induksi. Selanjutnya dapat melakukan perancangan dimensi kincir air dan perhitungan perbandingan rasio transmisi mekanik. Untuk pemilihan generator induksi satu fasa, menyesuaikan dari daya yang dihasilkan kincir air dengan mempertimbangkan segala rugi-rugi sistem. Apabila seluruh konsep sudah diperoleh, maka dibuat detail perancangan dengan menggunakan Autocad 2007.

Untuk detail yang akan dibuat yaitu terutama bentuk dari perancangan kincir air yang disesuaikan dengan kondisi air buangan yang ada di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto, yang mana perancangan kincir ini meliputi :

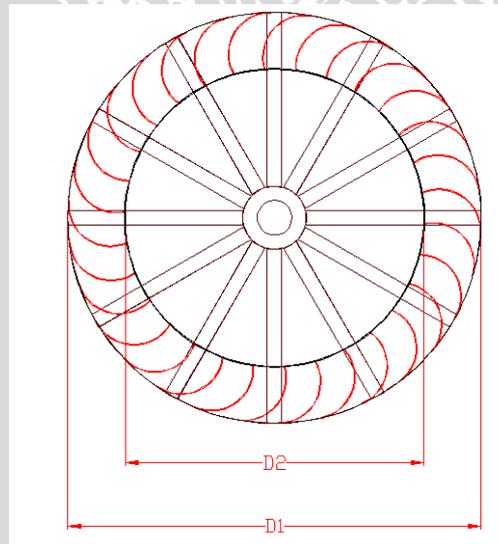
- 1) Pemilihan jenis dan penentuan diameter luar D_1 atau luar D_2 suatu kincir air yaitu dengan menggunakan Tabel 3.1 ini akan dapat dijadikan salah satu dasar pertimbangan perancangan.

Tabel 3.1. Spesifikasi Teknis Tiga Jenis Kincir Air

Spesifikasi	<i>Over-shot</i>	<i>Breast-shot</i>	<i>Under-shot</i>
Ketinggian jatuh air (m)	3 - 12	2 - 5	0.4 - 3.0
Debit air (m ³ /s)	0.1 - 1.0	0.3 - 3.0	0.2 - 5.0
Diameter kincir D (m)	2.0 - 10	5.5 - 8.5 ($D = H + 3.5$)	2 - 9 $D = (3h \text{ s/d } 5h)$
Kecepatan Peripheral U(m/detik)	1.5 - 2.0	1.4 - 2.0	1.0 - 2.0
RPM	3 - 25	3 - 7	2 - 12
Efisiensi Maksimum (%)	25 - 80	20 - 75	20 - 70

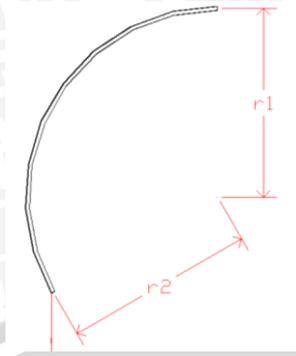
Sumber: Shannon, 1997: 3

Dengan data-data yang ada maka dipilih jenis kincir dengan melihat Tabel 3.1. Ilustrasi dari perancangan diameter luar D_1 dan luar D_2 suatu kincir air sesuai dengan Gambar 3.1.



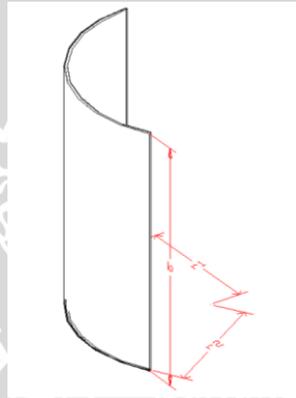
Gambar 3.1 Perancangan Kincir Air

- Perancangan sudu meliputi perhitungan jari-jari sudu r_1 dan r_2 disesuaikan dengan perancangan diameter kincir air dan volume air buangan yang dapat ditampung oleh tiap-tiap sudu. Bentuk dari sudu-sudu kincir air ini berbentuk sepertiga dari luas lingkaran. Yang diilustrasikan pada Gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Perancangan Jari-Jari Sudu Kincir Air

- 3) Lebar kincir atau lebar sudu kincir air sebesar b yang juga disesuaikan dengan debit air buangan dan diameter saluran pembuangan air limbah yang ada. (Gambar 3.3)



Gambar 3.3 Perancangan Lebar Sudu Kincir Air

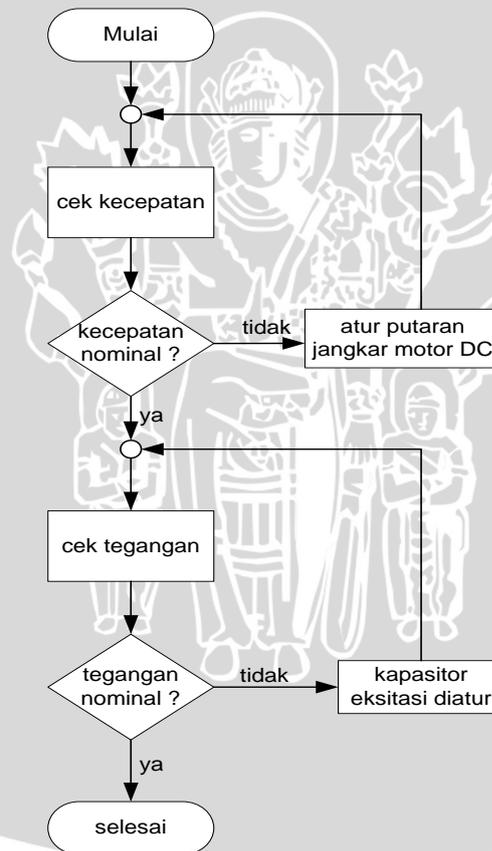
Dalam perancangan pembangkit ini perlu diketahui rasio transmisi mekanik. Transmisi mekanik diperhitungkan dengan menyesuaikan putaran kincir air dan putaran generator yang diinginkan.

Setelah dilakukan perhitungan keluaran daya dari potensi air buangan, maka dapat dipilih daya keluaran generator induksi satu fasa yang digunakan yaitu dengan mengoperasikan motor induksi satu fasa sebagai generator. Dengan melihat tabel efisiensi dan faktor daya motor induksi satu fasa (A. K. Sawhney, 1990:692) maka akan diperoleh perhitungan kapasitas kapasitor pada keadaan beban penuh, untuk beban resistif. Perlu diperhatikan bahwa nilai kapasitansi ini harus lebih besar daripada nilai kapasitor minimum yang diperlukan untuk proses eksitasi.

3.6 Pengujian dan Analisis Data

Setelah dilakukannya perancangan komponen-komponen PLTMH, maka dilakukan pengujian untuk memodelkan operasi generator induksi di Laboratorium Mesin Elektrik, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dengan menggunakan semua peralatan yang tersedia di Laboratorium. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian pengaruh kapasitansi kapasitor terhadap tegangan dan frekuensi keluaran generator induksi satu fasa. Pengujian ini dilakukan pada beberapa keadaan beban resistif yaitu berupa lampu pijar 100 Watt pada tiap-tiap frekuensi keluaran generator.

Prosedur dalam pengujian generator induksi ini diperlihatkan dengan diagram alir di bawah ini :



Gambar 3.4 Diagram Alir Pengaturan Frekuensi dan Tegangan

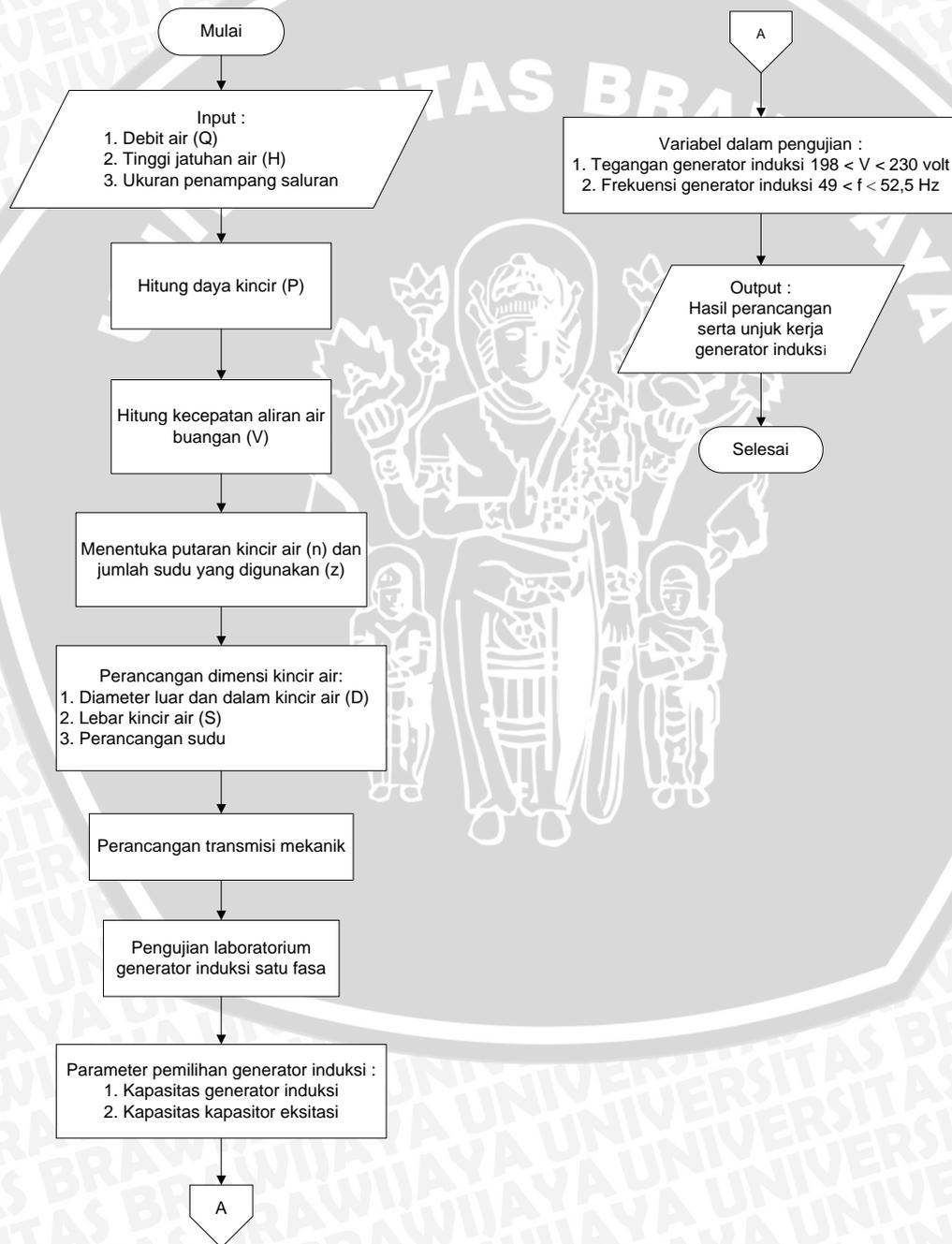
Setelah dilakukannya pengujian terhadap performa generator induksi satu fasa maka dapat dilakukan analisis sesuai dengan metode yang telah ada sehingga akan diketahui jawaban dari masing-masing tujuan dari pengujian.

3.7 Penarikan Kesimpulan

Dari hasil perancangan dan analisis dapat ditarik suatu kesimpulan dalam perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) serta dapat dilakukan pemberian saran dari penulis untuk pengembangan penelitian ini ke depan.

3.8 Diagram Alir Penelitian

Untuk diagram alur penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

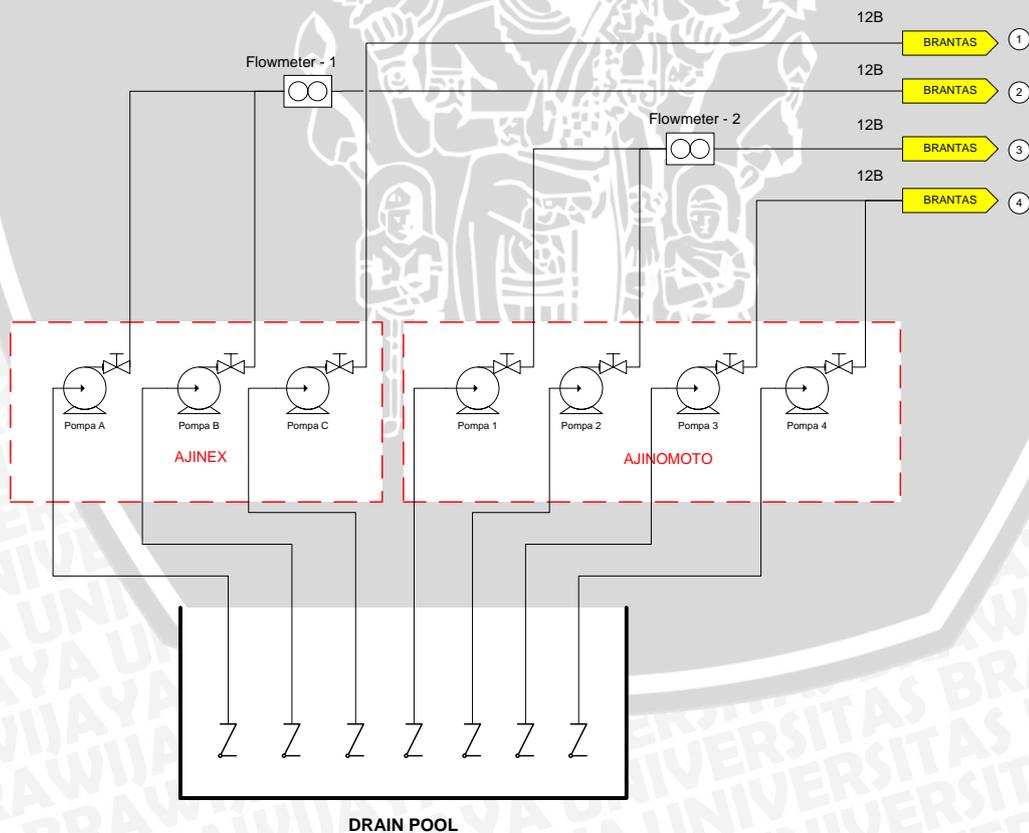


Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian

Drain pool yang berada di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto merupakan suatu kawasan penampungan dan pengontrolan aliran air yang masuk dari Sungai Brantas dan keluar menuju Sungai Brantas yang mana dapat dikatakan semua aliran air ini merupakan aliran paksa.

Jadi air diambil dari Sungai Brantas melalui proses penjernihan digunakan untuk proses produksi, air minum, dan air pendingin. Selanjutnya air yang sudah digunakan dalam proses produksi dan air pendingin, sebagian akan dikeluarkan untuk dikembalikan ke Sungai Brantas setelah diproses dalam unit *Waste Water Treatment* untuk menjamin kualitas air buangan yang bagus. Air ini ditampung dulu di *drain pool* dan masih diukur pH dan konduktivitasnya secara *online* kemudian secara terus menerus dikeluarkan ke Sungai Brantas..

Kawasan ini terdapat beberapa pompa yang dilengkapi *flow meter* sebagai alat ukur total volume air dan debit air yang masuk atau keluar, pH meter dan *electrical conductivity* meter untuk diketahui kualitas air yang akan dikembalikan menuju Sungai Brantas. Yang dapat digambarkan seperti Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Kawasan *Drain Pool* PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto

Sumber : Departement *Utility* PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto

Pada Gambar 4.2 tampak bahwa terdapat 3 pompa milik PT. Ajinex Internasional (inisial A, B, dan C). Ketiga pompa ini dioperasikan secara terus menerus selama proses produksi yang mana tiap minggunya digunakan secara bergantian. Dengan bergantinya pompa yang bekerja maka keluaran air pada pipa pembuangan akan berpindah juga. Untuk mengetahui total volume air dan debit air pada pompa A dan B milik PT. Ajinex Internasional maka dapat dilihat pada *flow meter* 1.

Masih terdapat 4 pompa milik PT. Ajinomoto *Factory* (inisial 1, 2, 3, dan 4). Pompa-pompa ini dioperasikan pada saat kondisi tertentu, misal ketika musim hujan untuk menghindari masuknya air ke kawasan industri. Dan untuk mengetahui total volume air dan debit air pada pompa 1 dan 2 milik PT. Ajinomoto *Factory* ini dapat dilihat pada *flow meter* 2.

Pada keseluruhan pompa (Gambar 4.2), baik pompa milik Ajinomoto dan pompa milik Ajinex, terdapat sebuah pengontrolan keluaran air dengan menggunakan *valve*. Dengan adanya *valve* ini maka dimungkinkan untuk dilakukannya pengaturan debit air buangan limbah menuju ke Sungai Brantas pada pipa yang aktif.

4.2 Potensi Energi Aliran Air Buangan PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto

Dalam perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) ini perlu dilakukan perhitungan terhadap beberapa parameter, antara lain :

- 1) Tinggi terjun efektif (H_n) dalam meter, (diperoleh dengan metode pengukuran ketinggian secara langsung menggunakan meteran).
- 2) Debit andalan (Q_p) sebagai dasar perancangan dalam m^3/s , (diperoleh dengan melakukan pengamatan pada *flow meter* yang aktif).
- 3) Kecepatan aliran air (v) dalam m/s, (diperoleh dengan persamaan kapasitas aliran fluida, menggunakan debit andalan dan diameter pipa yang aktif).

Ketiga parameter ini yang akan digunakan sebagai dasar perancangan dimensi kincir air sebagai penggerak mula generator, sehingga dapat digunakan pada kondisi sebenarnya.

Sehingga untuk memperoleh nilai dari beberapa parameter yang telah disebutkan, perlu dilakukan pengambilan data di *drain pool* sampai dengan pipa pembuangan ke Sungai Brantas, PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto.

1) Tinggi Terjun Efektif Pipa Pembuangan (H_n)

Untuk mendapatkan tinggi terjun efektif (H_n) dilakukan pengukuran di pipa pembuangan menuju Sungai Brantas. Dari keempat pipa yang terpasang memiliki ketinggian yang sama sehingga pengukuran ketinggian terjun efektif air buangan (tanggal 15 Maret 2012) dilakukan di pipa pembuangan yang aktif pada saat pengukuran yaitu pipa dengan nomor 3 (sesuai Gambar 4.2).



Gambar 4.3 Foto Pipa Pembuangan ke Sungai Brantas PT. Ajinomoto

Pengukuran dilakukan secara langsung dengan menggunakan meteran yang diukur dari pipa terbawah sampai permukaan air, yang mana menunjukkan ketinggian 1,1 m. Apabila dilihat dari bentuk pipa pembuangan (sesuai Gambar 4.3), dapat dilakukan peningkatan daya keluaran elektriknya dengan cara memotong lengkungan pipa sehingga menambah ketinggian jatuhnya airnya. Dengan memotong lengkungan pipa, ketinggian terjun efektifnya menjadi 2,4 m dari permukaan air.

2) Debit andalan (Q_p)

Pengukuran debit aliran air buangan di lapangan dilakukan dengan mengamati pompa yang bekerja dan *flow meter* yang aktif. Sesuai dengan

pengukuran yang dilakukan dari pihak PT. Ajinomoto *Factory*, debit air buangan ini diukur setiap hari tiap 8 jam sekali yaitu pada jam 08.00, 16.00, dan 00.00. Sehingga dengan pengukuran tersebut diketahui karakteristik debit air buangan ke Sungai Brantas tiap harinya apakah terjadi perubahan yang signifikan. Data rekap debit air buangan selama bulan Maret 2012 yang mewakili debit air buangan dalam setahun, yang mana data ini diperoleh dari PT. Ajinomoto *Factory* dan dapat dilihat pada **lampiran**.

Data yang ditampilkan dalam bentuk tabel, diambil contoh pengukuran baik pada *flow meter* 1 dan *flow meter* 2 pada tanggal 14 – 16 Maret 2012 sesuai dengan Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengamatan Debit Air Buangan PT. Ajinomoto Mojokerto

Maret 2012	Pengukuran pada pukul	Drain pool NE			Drain pool NEX		
		Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Rata-rata Debit Harian (m ³ /h)	Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Rata-rata Debit Harian (m ³ /h)
14	08.00	27.169	-	3,67	927.351	510	583
	16.00	27.180	11		927.440	890	
	00.00	27.180	-		927.475	350	
15	08.00	27.283	103	57,67	927.583	1080	736
	16.00	27.353	70		927.628	450	
	00.00	27.353	-		927.696	680	
16	08.00	27.358	50	1,67	927.777	810	730
	16.00	27.358	-		927.846	690	
	00.00	27.358	-		927.915	690	

Sumber : Departement *Utility* PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto

Dengan melihat Tabel 4-1 ini pompa yang bekerja terus menerus adalah pompa milik Ajinex dengan rata-rata keluaran per harinya yang relatif sama. Hal ini dikarenakan jadwal produksi PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto operasi 24 jam sepanjang tahun.

Berbeda halnya dengan pompa milik Ajinomoto, pengoperasiannya tidak terus menerus dan debit air buangan yang kecil. Pompa ini hanya dioperasikan pada kondisi tertentu saja, misalkan saja pada kondisi hujan ataupun kondisi

dimana produksi meningkat yang berpengaruh banyaknya pembuangan air yang berasal dari proses produksi ataupun air pendinginan mesin-mesin yang ada di kawasan PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto.

Untuk mendukung pengoperasian PLTMH secara terus menerus maka perancangan PLTMH ini dititikberatkan pada pipa pembuangan yang selalu aktif yaitu pipa pembuangan nomor 2 (sesuai Gambar 4.2) milik Ajinex. Dengan data yang diperoleh yaitu data air buangan menuju Sungai Brantas selama bulan Maret 2012 dapat dikatakan bahwa debit air buangan di pipa milik Ajinex inisial A relatif sama dan aktif terus menerus selama proses produksi dengan debit andalan (Q_p) rata-rata tiap harinya selama satu bulan ini sebesar $649,6774 \text{ m}^3/\text{h}$ atau $0,1805 \text{ m}^3/\text{s}$.

3) Kecepatan Aliran Air Buangan (V)

Untuk mencari kecepatan aliran air buangan ke Sungai Brantas pada saluran tertutup dapat dengan menggunakan persamaan kapasitas aliran fluida sesuai dengan persamaan (2.6) sebagai berikut : (Patty O,1995)

$$Q_p = A \cdot v$$

Dengan :

$$D = 12 \text{ inchi} = 0,3048 \text{ m}$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi \cdot (0,3048)^2}{4} = 0,0729 \text{ m}^2$$

Maka :

$$v = \frac{Q_p}{A}$$

$$v = \frac{0,1805}{0,0729} = 2,4745 \text{ m/s}$$

Maka kecepatan aliran air yang dihasilkan oleh pipa pembuangan, apabila dianggap rata-rata debit pada tiap harinya adalah $0,1805 \text{ m}^3/\text{s}$ adalah sebesar $2,4745 \text{ m/s}$.

Dengan menitikberatkan perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) pada pipa yang aktif terus menerus, yaitu pipa pembuangan air limbah dari pompa A, B dan C, maka berdasar data-data yang diperoleh melalui pengamatan dan perhitungan diketahui bahwa aliran air yang bersumber dari buangan limbah PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto ini memenuhi untuk kondisi yang dibutuhkan untuk perancangan PLTMH :

- 1) Tinggi terjun efektif (H_n) sebesar 2,4 meter, memenuhi standart yang dibutuhkan untuk membangkitkan listrik dan penggunaan kincir dengan jenis *over-shot*.
- 2) Debit andalan sebagai dasar perancangan (Q_p) sebesar 0,1805 m³/s.
- 3) Kecepatan aliran air (v) 2,4745 m/s sebagai pertimbangan tumbukan air dengan sudu-sudu kincir air.

Berdasarkan parameter-parameter yang sudah didapatkan, maka dapat diketahui besarnya daya hidrolik (P_h) dari Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) yang akan dirancang di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto sebagai berikut :

$$P_h = 9,81 \cdot Q_p \cdot H_n + \frac{1}{2} \cdot Q_p \cdot v^2 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 9,81 \cdot 0,1805 \cdot 2,4 + \frac{1}{2} \cdot 0,1805 \cdot (2,4745)^2 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 4,2489 + 0,5525 \quad \text{kW}$$

$$P_h = 4,8014 \quad \text{kW}$$

Perlu adanya pertimbangan terhadap penggunaan kincir yang akan digunakan. Dilihat dari ketinggian jatuhnya air 2,4 meter maka kincir yang digunakan adalah kincir *over-shot* yang memiliki efisiensi maksimum hingga 80% yang tidak memerlukan pipa pesat dari pipa pembuangan pada 25% diameter kincir. Namun dengan mempertimbangkan adanya rugi-rugi mekanik dan rugi-rugi volumetrik air pada sudu kincir air maka efisiensi kincir (η_k) yang digunakan menjadi 60%. Sehingga daya mekanik kincir:

$$P_k = \eta_k \cdot P_h \quad \text{kW}$$

$$P_k = 0,6 \cdot 4,8014 \quad \text{kW}$$

$$P_k = 2,8809 \quad \text{kW}$$

Dari kincir menuju ke generator terdapat suatu perangkat sistem transmisi mekanik, yang akan berpengaruh terhadap daya keluaran elektrik generator. Efisiensi generator sesuai dengan penggunaan generator induksi satu fasa adalah sebesar 0,72%. Sementara sistem transmisi yang digunakan dalam perancangan dengan menggunakan gardan mobil dan truk untuk masing-masing nilainya 85%. Selain itu *pulley* dan *belt* yang efisiensinya 85% dengan pertimbangan adanya rugi-rugi mekanik. Sehingga dengan efisiensi generator (η_g) dan efisiensi transmisi mekanik (η_{tm}) yang sudah diketahui tersebut dapat diketahui daya keluaran generator sebesar :

$$P_{out} = \eta_{tm} \cdot \eta_g \cdot P_k \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 0,85 \cdot 0,85 \cdot 0,85 \cdot 0,72 \cdot 2,8809 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 1,2738 \quad \text{kW}$$

$$P_{out} = 1.273,8 \quad \text{W}$$

Sehingga diperoleh besarnya potensi daya yang dapat dibangkitkan pada perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Kincir Air (PLTKA) di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto adalah sebesar 1.273,8 W, maka dipilih penggunaan generator induksi satu fasa dengan kapasitas daya sebesar 1,7078 HP \approx 2 HP.

Dalam pengoperasiannya Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) ini tidak akan mengganggu proses produksi dari PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto dan merupakan pembangkit yang beroperasi sendiri (*isolated system*). Pembangkit ini dirancang dengan menggunakan generator induksi satu fasa yang digunakan untuk penerangan beberapa lampu penerangan jalan umum karena daya yang dibangkitkan cukup kecil serta bentuk *Corporate Social Responsibility* (CSR) perusahaan kepada masyarakat sekitar.

4.3 Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

4.3.1 Saluran Pembawa

Dalam perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) ini, menggunakan suatu saluran pembawa berupa saluran tertutup. Saluran pembawa ini merupakan pipa pembuangan air menuju ke Sungai Brantas yang mana hanya menekankan pada saluran pembuangan dari pipa milik Ajinex. Untuk

mengarahkan air menuju sudu kincir maka pada ujung saluran sebelum air menumbuk kincir dipasang sebuah talang dengan kemiringan tertentu. Ukuran dari talang ini disesuaikan dengan volume air yang akan menumbuk sudu-sudu kincir selain itu juga dengan diameter dari saluran pembuangan menuju ke Sungai Brantas.

Seperti yang telah dituliskan bahwa spesifikasi dari saluran pembuangan menuju Sungai Brantas berdasarkan hasil pengukuran ketinggian pipa memiliki spesifikasi (Gambar 4.4) :

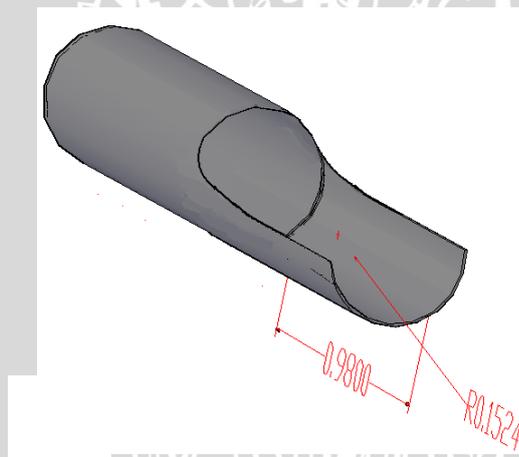
Diameter : 12 inchi = 0,3048 m

Ketinggian : 2,4 m

Sehingga talang dirancang dengan memotong pipa pembuangan menjadi setengah bagian dengan spesifikasi sebagai berikut :

Panjang talang : 0,98 m

Jari-jari talang : 0,1524 m



Gambar 4.3 Perancangan Talang Air

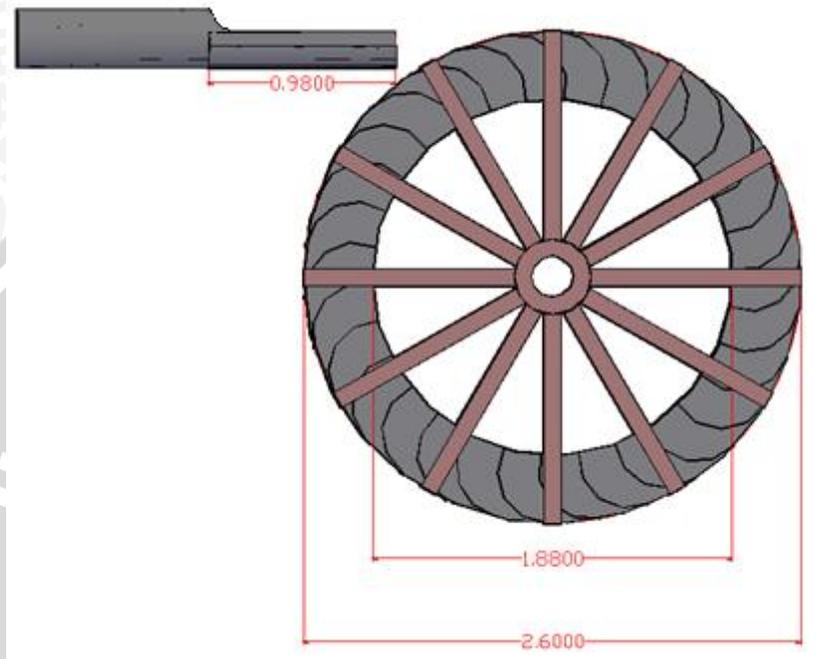
4.3.2 Perancangan Kincir Air

Dalam perancangan kincir air ini harus sesuai dengan kondisi lapangan. Pipa pembuangan air limbah (sesuai Gambar 4.3) terdapat 4 pipa buangan limbah. Yang menjadi fokus perancangan ini adalah pada pipa yang selalu aktif terus menerus yaitu pipa nomor 2 (sesuai Gambar 4.2) pipa pembuangan milik Ajinex.

a) Diameter Luar (D_1) dan Dalam (D_2) Kincir

Untuk perancangan diameter luar kincir perlu dipertimbangkan ketinggian jatuhnya air serta jarak antara sisi bagian atas kincir dan ujung saluran air dan jarak antar sisi bagian bawah kincir dengan saluran buang. Dengan ketinggian

terjun efektif (H_n) sebesar 2,4 meter, maka dipilih meter diameter luar kincir (D_1) adalah sebesar 2,6 meter dengan tujuan air pancaran dari pipa pembuangan akan menumbuk pada seperempat bagian atas dari kincir air, agar pancaran air dapat menumbuk kincir air sesuai dengan Gambar 4.6 dibawah ini.



Gambar 4.4 Diameter Luar dan Diameter Dalam Kincir Air

Sedangkan untuk diameter dalam kincir (D_2) adalah sebesar 1,88 meter dengan mempertimbangkan volume air yang dapat ditampung oleh tiap sudu serta lebar kincir air dari hasil perancangan.

b) Perancangan Sudu

Untuk perancangan sudu kincir air dipertimbangkan berdasarkan diameter luar dan dalam, dan sudut pancaran air yang menumbuk kincir. Apabila perancangan diameter luar dan dalam seperti pada Gambar 4.4 maka dapat diperoleh kecepatan aliran di ujung saluran berdasarkan persamaan (2.9) : (Sutikno, 1997:21)

$$U_1 = \frac{v \cdot \cos \alpha_1}{2}$$

Dengan :

$$V = 2,4745 \text{ m/s}$$

$$\alpha_1 = 0^\circ \text{ (dengan sudut pancaran air menumbuk kincir air lurus)}$$

Maka :

$$U_1 = \frac{2,4745 \cdot \cos 0^\circ}{2}$$

$$U_1 = \frac{2,4745}{2} = 1,2373 \text{ m/s}$$

Dengan diketahuinya kecepatan air yang ada di ujung saluran 1,2373 m/s maka akan diperoleh putaran kincir dihasilkan berdasarkan debit andalannya dengan menggunakan persamaan (2.8) : (Sutikno, 1997:21)

$$N = \frac{60 \cdot U_1}{\pi \cdot D_1}$$

Dengan :

$$D_1 = 2,6 \text{ m}$$

$$U_1 = 1,2373 \text{ m/s}$$

Maka :

$$N = \frac{60 \cdot 1,2373}{\pi \cdot 2,6}$$

$$N = 9,0931 \text{ rpm} \approx 10 \text{ rpm}$$

Berdasarkan perhitungan, putaran kincir dipengaruhi dengan debit air buangan menuju Sungai Brantas. Dengan adanya *valve* pada kesemua pompa di kawasan *drain pool* ini sangat menguntungkan. Dalam pengaturan putaran kincir air dapat dilakukan dengan memutar *valve* pada pompa yang aktif (khususnya pada pompa milik Ajinex) hingga mendapatkan debit air buangan yang diinginkan.

Putaran kincir yang diperoleh tersebut masih dalam satuan rpm, sehingga apabila diubah dalam satuan rps didapat :

$$N(\text{dalam sekon}) = \frac{10}{60} = \frac{1}{6} \text{ rps}$$

Telah diperoleh putaran kincir $\frac{1}{6}$ rps yang mana dapat dikatakan bahwa pada tiap 1 sekon, terdapat $\frac{1}{6}$ bagian dari keseluruhan kincir yang akan terisi oleh air berasal dari saluran. Dengan jumlah sudu z sebanyak 30 buah sebagai

pertimbangan putaran kincir yang lebih halus, maka jumlah sudu yang terisi oleh air pada saat satu putaran per sekonnnya adalah :

$$i = N \times z$$

$$i = \frac{1}{6} \times 30 = 5$$

Selanjutnya dapat diketahui volume air yang mampu ditampung oleh sudu kincir air dengan melihat jumlah sudu yang terisi oleh air per sekonnnya dapat dengan menggunakan persamaan (2.10) :

$$V = \frac{Q_p}{i} \text{ m}^3$$

Dengan :

$$Q_p = 0,1805 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$i = 5$$

Maka :

$$V = \frac{0,1805}{5}$$

$$V = 0,0361 \text{ m}^3$$

Sehingga diperoleh tiap sudu kincir air ini mampu menampung air buangan dari saluran sebesar $0,0361 \text{ m}^3$.

Perancangan terhadap sudu kincir air ini menggunakan tabung yang dipotong menjadi tiga bagian. Maka dengan menggunakan volume air yang mampu ditampung oleh sudu akan didapatkan nilai r_1 dan r_2 sesuai dengan persamaan (2.11) :

$$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l$$

Dengan :

$$V = 0,0361 \text{ m}^3$$

$$l = 0,5 \text{ m (dengan mempertimbangkan lebar talang air } 0,3048 \text{ m)}$$

Maka :

$$0,0361 = \frac{1}{3} \pi \cdot r^2 \cdot 0,5$$

$$r^2 = \frac{0,0361 \cdot 3}{\pi \cdot 0,5}$$

$$r^2 = 0,0689$$

$$r_1 = r_2 = r = 0,2626 \text{ m}$$

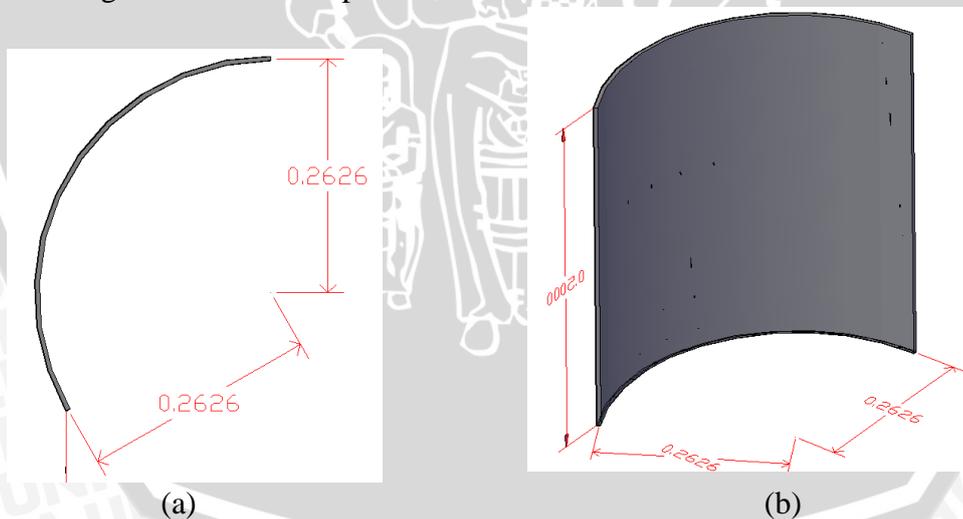
Karena menggunakan sepertiga tabung, maka panjang busur lingkaran sudu kincir air dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (2.12) :

$$L_n = \frac{1}{3} 2 \cdot \pi \cdot r \text{ m}$$

$$L_n = \frac{1}{3} 2 \cdot \pi \cdot 0,2626 \text{ m}$$

$$L_n = 0,5497 \text{ m}$$

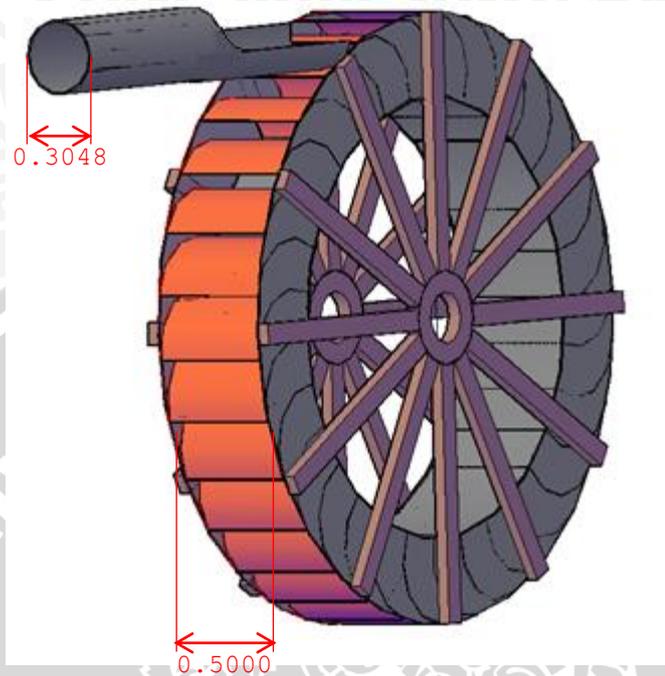
Dengan didapatkannya $r_1 = r_2 = r = 0,2626 \text{ m}$, yang mana memenuhi standar dilihat dari selisih antara diameter luar dan diameter dalam dari perancangan kincir air tersebut. Sehingga perancangan sudu kincir air ini akan sesuai dengan Gambar 4.5 seperti di bawah ini.



Gambar 4.5 Sudu Kincir Air

Lebar sudu atau lebar kincir air ini ditentukan berdasarkan lebar talang air dan sesuai juga dengan diameter pipa pembuangan yaitu sebesar 0,3048 meter, dengan mempertimbangkan pancaran air buangan yang berasal dari pipa pembuangan dan ketebalan pipa maka lebar kincir l adalah sebesar 0,5 meter.

Gambar 4.6 menunjukkan lebar sudu atau lebar kincir air yang telah disesuaikan dengan diameter pipa pembuangan air limbah berasal dari pompa Ajinex.



Gambar 4.6 Lebar Sudu Kincir Air

4.3.3 Perancangan Transmisi Mekanik

Sistem transmisi mekanik ini digunakan untuk menghubungkan suatu poros pada kincir dan poros generator dengan melihat perbandingan terhadap rasio putarannya. Dalam perhitungan putaran kincir air didapatkan 10 rpm yang diperoleh pada debit andalannya, sedangkan generator induksi satu fasa yang direncanakan mempunyai putaran nominal 1500 rpm menghasilkan rasio total dari sistem transmisi mekanik ini sebesar :

$$\text{rasio putaran} = \frac{1500}{10} = 150$$

Dengan perbandingan rasio yang besar ini, apabila menggunakan sistem transmisi *pulley* dan *belt* saja akan dibutuhkan ruangan yang cukup besar. Untuk mengatasi hal tersebut maka digunakan kombinasi antara sistem transmisi *pulley* dan *belt* ditambahkan dengan gardan. Gardan yang digunakan ini kombinasi gardan truk yang memiliki rasio 37 : 6 dan gardan mobil dengan rasio 36 : 6. Sehingga rasio total dari gardan adalah sebesar 1296 : 42. Yang mana diperoleh :

$$\text{Total rasio gardan} = \frac{1296}{42} = 30,85$$

Berdasarkan pada perhitungan sebelumnya, maka rasio *pulley* yang digunakan dalam perancangan ini adalah :

$$\text{rasio pulley} = \frac{150}{30,85} = 4,9$$

4.4 Generator Induksi Satu Fasa

Dengan kapasitas keluaran daya elektrik sebesar 1.273,8 W (berdasarkan pada perhitungan potensi energi di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto) maka dipilih motor induksi satu fasa dengan keluaran daya 2 HP.

Agar motor induksi ini dapat membangkitkan tegangan agar beroperasi sebagai generator, maka perlu diperhitungkan terlebih dahulu kapasitor eksitasi yang digunakan untuk kapasitas maksimum dari generator induksi satu fasa. Dalam pengoperasiannya sebagai generator kumparan utama saja yang difungsikan sehingga dapat diparalelkan dengan kapasitor eksitasi. Hal ini dipengaruhi oleh jumlah lilitan kumparan utama dan kumparan bantu yang berbeda. Sehingga perhitungan nilai kapasitor eksitasi motor ini sebagai berikut:

Dengan kapasitas keluaran daya generator induksi satu fasa yang diinginkan P_{out} sebesar 2 HP, untuk mendapatkan nilai kapasitor eksitasi dengan :

$$P_{out} = 2 \text{ HP} = 1492 \text{ W}$$

Menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Dengan :

$$\eta = 0,72 \text{ (A. K. Sawhney, 1990:692)}$$

$$\cos \varphi = 0,8 \text{ (A. K. Sawhney, 1990:692)}$$

Maka :

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

$$P_{in} = \frac{1492}{0,72} = 2072,22 \text{ W}$$

Untuk mendapatkan daya reaktif maka dengan menggunakan :

$$\cos \varphi = 0,8 \text{ maka } \cos^{-1} \varphi = 36,87^\circ$$

$$\begin{aligned} Q &= P_{in} \cdot \tan 36,87^\circ \\ &= 2072,22 \cdot 0,75 \\ &= 1554,17 \text{ VAR} \end{aligned}$$

Sehingga dengan daya reaktif sebesar 1554,17 VAR, maka kapasitas eksitasi ini dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan: (Chapallaz, 1992)

$$Q = \frac{V^2}{X_c}$$

Dengan :

$$Q = 1554,17 \text{ VAR}$$

$$V = 220 \text{ volt}$$

Maka :

$$X_c = \frac{(220)^2}{1554,17} = 31,142 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 31,14}$$

$$C = 1,0221 \times 10^{-4} \text{ F}$$

$$C = 102,21 \mu\text{F}$$

Untuk kumparan utama didapatkan nilai kapasitor eksitasi sebesar 102,21 μF

BAB V

PENGUJIAN GENERATOR INDUKSI SATU FASA DAN ANALISIS DATA

5.1 Umum

Pengujian generator induksi satu fasa ini dilaksanakan di Laboratorium Mesin Elektrik, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Peralatan pengujian yang digunakan disesuaikan dengan kapasitas peralatan yang ada di laboratorium. Generator induksi satu fasa yang diujikan ini dikondisikan beroperasi sendiri sesuai dengan PLTMH yang dirancang di PT. Ajinomoto Factory Mojokerto. Pengujian yang dilakukan berupa pengaruh kapasitansi kapasitor eksitasi terhadap tegangan dan frekuensi keluaran generator induksi satu fasa. Pengujian ini menggunakan beban resistif berupa lampu pijar 100 watt pada tiap-tiap frekuensi keluaran generator.

Tegangan keluaran generator induksi satu fasa diusahakan sesuai standar PLN, bahwa tegangan di titik suplai diijinkan bervariasi di atas maupun di bawah pada sistem tegangan rendah (JTR) tegangan nominal sistem sebesar 220 volt. Tegangan pada titik suplai konsumen diijinkan bervariasi maksimum +5% dan minimum -10% dari nilai nominalnya. Maka tegangan keluaran generator antara $198 \text{ volt} \leq V_{out} \leq 231 \text{ volt}$.

Pengujian juga tergantung dari frekuensi keluaran generator. Dalam pengaturan nilai frekuensi keluaran listrik tidak diatur dalam bentuk standar tetapi lebih banyak merupakan sasaran atau petunjuk operasi. Untuk generator induksi satu fasa yang berdiri sendiri dikarakteristikan dengan mode pengoperasiannya pada variabel frekuensi sehingga pengujian ini dilakukan pada beberapa keadaan beban pada tiap-tiap frekuensi yaitu dari $49 \leq f \leq 52,5 \text{ Hz}$.

5.2 Tujuan Pengujian

Tujuan dari pengujian pengaruh kapasitor eksitasi generator induksi satu fasa pada tiap-tiap frekuensi adalah untuk mengetahui unjuk kerja dari generator induksi pada kondisi beban yang berubah-ubah sehingga tegangan keluaran generator induksi ini tetap pada nilai nominal

5.3 Peralatan Pengujian

Dalam pengujian generator induksi satu fasa ini menggunakan peralatan-peralatan sebagai berikut : (Sesuai dengan Gambar 5.1)

- 1) Generator induksi satu fasa
- 2) Mesin penggerak mula berupa motor DC penguat terpisah
- 3) Beban lampu pijar 100 watt
- 4) Voltage regulator dengan *rectifier*/penyearah
- 5) Kapasitor eksitasi
- 6) Amperemeter
- 7) Voltmeter
- 8) Frekuensimeter
- 9) Tachometer

Penjelasan Peralatan Pengujian

Dengan beberapa peralatan tersebut terdapat mesin penggerak mula berupa motor DC penguat terpisah dengan spesifikasi sebagai berikut :

Type	: Gf 180/170
Daya (P_{out})	: 5 kW
Tegangan (V)	: 220 volt
Arus (I)	: 22,7 ampere
Err	: 220 volt, 071 A
Frekuensi (f)	: 50 Hz
Putaran (n)	: 1400 rpm
Kelas isolasi	: F

Dari motor DC penguat terpisah di kopel ke motor induksi satu fasa yang dioperasikan sebagai generator. Motor induksi satu fasa yang digunakan disesuaikan dengan kapasitas daya yang ada di laboratorium, dengan spesifikasi sebagai berikut :

Type	: JY2A-4
Daya (P_{out})	: 1 HP
Tegangan (V)	: 110/220 volt
Arus (I)	: 14,6 / 7,3 ampere

Frekuensi (f) : 50 Hz

Putaran (n) : 1430 rpm

Kelas isolasi : B

Pemindahan daya dari putaran motor DC penguat terpisah ke generator induksi satu fasa ini dengan menggunakan sistem transmisi mekanik berupa *pulley* dan *belt*. Sistem pemodelan PLTMH di laboratorium ini diperlihatkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Pengujian Generator Induksi Satu Fasa Di Laboratorium

Seperti pada bahasan perhitungan kapasitor eksitasi sebelumnya, untuk motor induksi satu fasa 1 HP ini perlu dilakukan perhitungan kembali karena dengan keluaran daya yang berbeda akan menghasilkan nilai kapasitor eksitasi yang berbeda pula. Perhitungan terhadap kapasitor eksitasi ini adalah sebagai berikut :

Sesuai dengan *nameplate* motor induksi satu fasa yang terdapat di Laboratorium Mesin Elektrik, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, daya keluaran sebesar 1 HP sehingga nilai kapasitor yang dibutuhkan adalah berdasarkan perhitungan di bawah ini :

$$P_{out} = 1 \text{ HP} = 746 \text{ W} \approx 750 \text{ W}$$

Menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Dengan :

$$\eta = 0,69 \text{ (A. K. Sawhney, 1990:692)}$$

$$\cos \varphi = 0,65 \text{ (A. K. Sawhney, 1990:692)}$$

Maka :

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{\eta}$$

$$P_{in} = \frac{750}{0,69} = 1086,96 \text{ W}$$

Untuk mendapatkan daya reaktif maka dengan menggunakan :

$$\cos \varphi = 0,65 \text{ maka } \cos^{-1} \varphi = 49,5^\circ$$

$$Q = P_{in} \cdot \tan 49,5^\circ \text{ VAR}$$

$$= 1086,96 \cdot 1,1708$$

$$= 1272,61 \text{ VAR}$$

Sehingga dengan daya reaktif sebesar 1272,61 VAR, maka kapasitas eksitasi ini dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan: (Chapallaz, 1992)

$$Q = \frac{V^2}{X_c}$$

Dengan :

$$Q = 1272,61 \text{ VAR}$$

$$V = 220 \text{ volt}$$

Maka :

$$X_c = \frac{(220)^2}{1272,61} = 38,032 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c}$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 38,032}$$

$$C = 8,369 \times 10^{-5} \text{ F}$$

$$C = 83,69 \mu\text{F}$$

Agar generator induksi dapat membangkitkan tegangan maka kapasitor eksitasi yang dipasang harus lebih besar daripada nilai kapasitor minimum yang diperlukan untuk proses eksitasi. Maka kapasitor yang diperlukan sesuai dengan perhitungan adalah beberapa buah kapasitor sebesar $16 \mu\text{F}$ yang ditambahkan secara digit hingga mencapai ekivalen $83,69 \mu\text{F}$ hingga diperoleh tegangan keluaran yang diinginkan.

5.4 Prosedur Pengujian Generator Induksi Satu Fasa

Pengujian generator induksi ini dilakukan dengan cara mengkopel sebuah motor induksi satu fasa dengan sebuah penggerak mula berupa motor DC penguat terpisah. Generator dikondisikan pada keadaan terbebani dengan beban resistif yang mana dengan menggunakan lampu pijar 100 watt. Prosedur pengujian sebagai berikut :

- 1) Generator induksi dikopel dengan mesin penggerak mula.
- 2) Motor DC shunt dihubungkan dengan 2 buah DC voltage regulator pada terminal kumparan jangkar ($1B_1-2B_2$) dan kumparan medan (F_1-F_2) yang keluarannya dihubungkan dengan amperemeter dan voltmeter.
- 3) Menyalakan mesin penggerak mula dengan memasukkan tegangan pada kumparan medan hingga tegangan nominal dan kumparan jangkar diubah step demi step.
- 4) Terminal keluaran generator dihubungkan dengan kapasitor eksitasi dan beban secara paralel. Dengan awal beban 2 lampu pijar dalam keadaan saklar ON.
- 5) Tegangan jangkar pada motor DC penguat terpisah dinaikkan hingga putaran generator induksi mencapai kecepatan nominal.

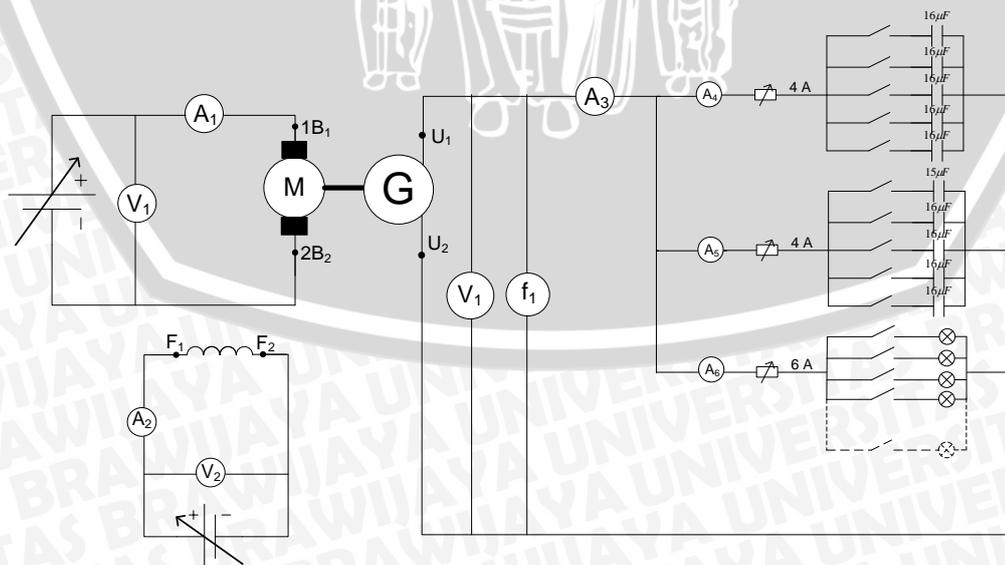
- 6) Saklar yang menghubungkan kapasitor eksitasi dengan ekivalen nilai sebesar $48 \mu\text{F}$ diposisikan ON agar generator induksi dapat menyalakan 2 lampu 100 W yang telah terpasang.

Catatan :

Prosedur penyalakan kapasitor dan beban perlu diperhatikan, yang mana didahului dengan penyalakan MCB kapasitor eksitasi kemudian MCB beban.

- 7) Setelah generator induksi menghasilkan tegangan, beban dinaikkan secara bertahap.
- 8) Setiap penambahan beban diikuti dengan penambahan besarnya nilai kapasitor yang dipasang untuk menaikkan tegangan generator sebesar tegangan nominalnya.
- 9) Setiap kenaikan tegangan yang dihasilkan oleh generator, ukur putaran yang dihasilkan dengan menggunakan tachometer (n), arus jangkar motor (I_a), arus medan motor (I_f), arus generator (I_g), arus kapasitor (I_c), arus beban (I_b), tegangan jangkar (V_a), tegangan medan (V_f), tegangan keluaran generator (V_g), frekuensi keluaran generator (f) dan kapasitor eksitasi yang terpasang (C).
- 10) Mengulangi langkah 5 sampai dengan langkah 8 untuk setiap terjadi perubahan beban dan pada frekuensi $49 \leq f \leq 52,5 \text{ Hz}$.

Pengujian dilakukan sesuai dengan rangkaian pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Rangkaian Pengujian Generator Induksi Satu Fasa Berbeban

5.5 Hasil Pengujian dan Analisis Generator Induksi Satu Fasa

Untuk mendapatkan hasil pengujian generator induksi satu fasa yang akurat, maka diperlukan pengujian rugi mekanik pada mesin-mesin yang dipakai. Pengamatan dilakukan pada kondisi motor penggerak sebelum dikopling dengan motor induksi. Hasil pengujian terhadap rugi mekanik mesin ditampilkan pada Tabel 5.1.

Dengan tegangan medan (V_f) = 188 Volt

Arus medan (I_f) = 0,7 ampere

Tabel 5.1. Pengujian Rugi Mekanik Motor Penggerak Sebelum Dikopling

No.	Putaran, n (rpm)	V_a (volt)	I_a (ampere)
1.	725	120	0,50
2.	836	130	0,50
3.	911	140	0,50
4.	940	150	0,55
5.	1002	160	0,55

Dengan data hasil pengujian (tanggal 18 Juni 2012) pengaruh perubahan kapasitor eksitasi pada generator induksi untuk beberapa keadaan beban dilihat pada Tabel 5.2 sampai dengan Tabel 5.9 di bawah ini.

Tabel 5.2. Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 49$ Hz.

No.	Motor DC Penguat Terpisah					Generator Induksi Satu Fasa						
	V_f (volt)	I_f (amp)	V_a (volt)	I_a (amp)	n_r (rpm)	n_r (rpm)	C (μF)	V_g (volt)	I_g (amp)	I_c (amp)	Beban	I_l (amp)
1	173	0,7	135	4,5	784	1470	95	220,5	6,0	5,8	2 lampu	0,9
2			135	4,5	787	1473	95	220	5,9	5,9	3 lampu	1,2
3			135	5,5	796	1497	95	210	5,8	5,7	4 lampu	1,7
4			135	5,8	796	1489	95	190,5	5,6	5,3	5 lampu	2,0
5			135	8,0	822	1498	111	230	7,4	7,2	6 lampu	2,2

Pada pengujian dengan frekuensi $f = 49$ Hz, pembebanan hanya sampai 5 lampu pijar 100 watt saja yang dapat menghasilkan kondisi mesin yang sesuai. Dapat dilihat pada tabel, dengan menambahkan beban dan diikuti oleh kapasitor eksitasi (untuk meningkatkan tegangan) maka arus kapasitor eksitasi akan meningkat dan arus generator juga meningkat hingga 7,4 A yang melebihi arus

nominal pada *nameplate*. Sehingga dengan arus generator tersebut, tidak dimungkinkan untuk menambahkan beban lagi.

Melihat karakteristik pengujian rugi mekanik pada motor penggerak sebelum dikopling dengan motor induksi pada Tabel 5-1, yang sesuai dengan kondisi pengujian generator induksi adalah ketika putaran motor penggerak sebesar 836 rpm. Maka diperoleh rugi mekanik sebesar :

$$\begin{aligned} \text{Rugi mekanik} &= (V_f \times I_f) + (V_a \times I_a) \\ &= (188 \times 0,7) + (130 \times 0,5) = 196,6 \text{ watt} \end{aligned}$$

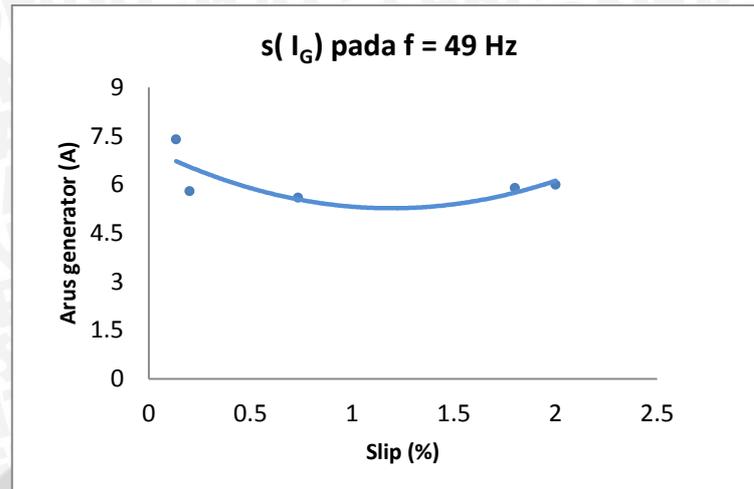
Berdasarkan hasil yang diperoleh, maka dapat diperhitungkan daya beban (P_L), daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) untuk mengetahui karakteristik dari generator induksi satu fasa. Perhitungan ini diperlihatkan pada Tabel 5.3 dibawah ini.

Tabel 5.3. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 49$ Hz

No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1470	95	2 lampu	198,5	728,6	532	37,3	2,0
2		1473	95	3 lampu	264,0	728,6	532	49,6	1,8
3		1497	95	4 lampu	357,0	863,6	667	53,5	0,2
4		1489	95	5 lampu	381,0	904,1	707,5	53,9	0,7
5		1498	111	6 lampu	506,0	1201,1	1004,5	50,4	0,1

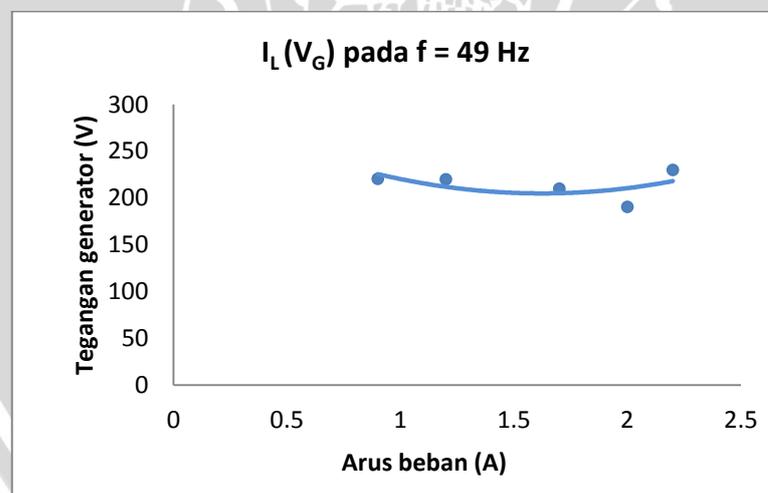
Dengan putaran yang rendah ini frekuensi sudah tercapai, sedangkan dibutuhkan kapasitor eksitasi yang cukup besar melebihi kapasitor minimum berdasar hasil perhitungan sebelumnya. Pada saat pengujian frekuensi yang rendah ini maka efisiensi generator juga masih rendah hanya mencapai 53,5%.

Karakteristik dari generator induksi ini dapat dilihat dari slip yang dihasilkan tiap perubahan arus generator. Pada frekuensi $f = 49$ Hz ini slip yang dihasilkan masih bernilai positif yang mana kecepatan putar rotor masih dibawah kecepatan sinkronnya, namun motor sudah bisa berfungsi sebagai generator seperti terlihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 49$ Hz

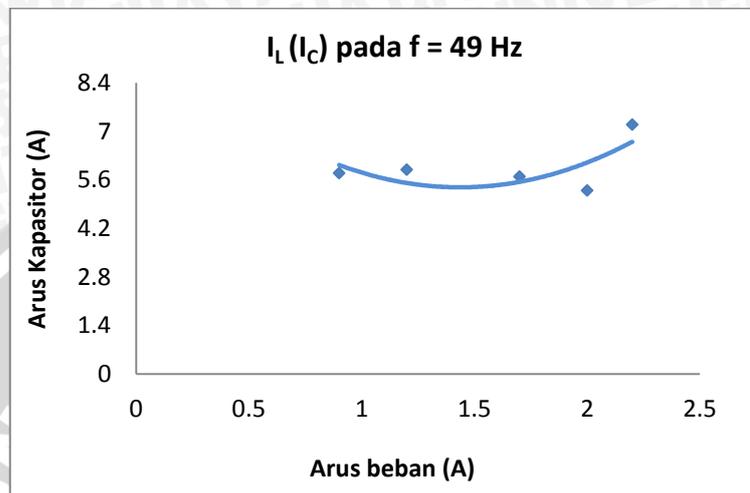
Meskipun slip belum mencapai nilai negatif, namun pada Gambar 5.3 ini setiap terjadinya penambahan arus generator maka slip akan turun. Seiring dengan meningkatnya arus beban, maka tegangan generator induksi tetap pada nilai yang nominal pada frekuensi 49 Hz ini seperti pada Gambar 5.4. Untuk mendapatkannya adalah dengan mengatur putaran poros generator ataupun menambahkan arus kapasitor eksitasi.



Gambar 5.4 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 49$ Hz

Namun ada pengujian dengan frekuensi 49 Hz ini, peningkatan arus beban hingga 5 lampu pijar tidak diikuti dengan penambahan kapasitor eksitasi sehingga pada saat arus beban 2 ampere terjadi drop tegangan. Apabila penambahan arus beban (ditambah menjadi 6 lampu) diikuti dengan penambahan kapasitor eksitasi

maka terlihat pada grafik bahwa tegangan keluaran generator akan meningkat. Sehingga diperoleh pula karakteristik pengaruh arus beban terhadap arus kapasitor eksitasi yang tampak pada Gambar 5.5. Pada gambar tersebut seiring dengan bertambahnya arus beban maka diikuti dengan kenaikan arus kapasitor eksitasi.



Gambar 5.5 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 49$ Hz

Tabel 5.4. Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 49,5$ Hz

No.	Motor DC Penguat Terpisah					Generator Induksi Satu Fasa						
	Vf (volt)	If (amp)	Va (volt)	Ia (amp)	nr (rpm)	nr (rpm)	C (μ F)	Vg (volt)	Ig (amp)	Ic (amp)	Beban	Ii (amp)
1	173	0,7	130	4,7	791	1494	95	230,0	6,2	6,2	2 lampu	0,9
2			135	5,2	797	1506	95	220,0	6,1	6,0	3 lampu	1,3
3			135	5,9	806	1519	95	210,5	5,8	5,9	4 lampu	1,7
4			135	6,2	810	1520	95	200,0	5,6	5,5	5 lampu	2,0
5			140	9,0	882	1534	111	220,5	7,5	5,6	6 lampu	2,6
6			185	9,3	1058	1551	79	220,5	7,3	6,9	7 lampu	3,0

Sama halnya dengan pengujian pada frekuensi $f = 49$ Hz, untuk $f = 49,5$ Hz penambahan beban yang dimungkinnnya hanya sampai 5 lampu pijar saja sehingga didapatkan kondisi yang sesuai. Berdasarkan Tabel 5.4, dengan menambahkan kapasitor eksitasi menyebabkan arus generator meningkat pula yang mana melebihi nilai arus nominal. Meskipun diikuti dengan penambahan beban (7 lampu pijar) dan pengurangan kapasitor eksitasi, arus generator pada nilai nominal yang mana kondisi ini tidak diperbolehkan.

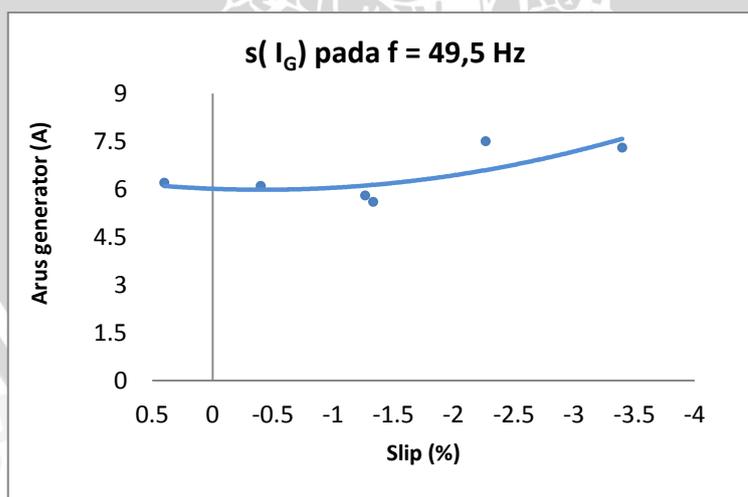
Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh, diperhitungkan daya beban (P_L) daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) generator induksi satu fasa sesuai dengan Tabel 5.5 dibawah ini.

Tabel 5.5. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 49,5$ Hz

No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1494	95	2 lampu	207,0	732,1	535,5	38,7	0,4
2		1506	95	3 lampu	286,0	823,1	626,5	45,6	-0,4
3		1519	95	4 lampu	357,9	917,6	721,0	49,6	-1,3
4		1520	95	5 lampu	400,0	958,1	761,5	52,5	-1,3
5		1534	111	6 lampu	573,3	1381,1	1184,5	48,4	-2,3
6		1551	79	7 lampu	661,5	1841,6	1645,0	40,2	-3,4

Karena frekuensi ditingkatkan sedikit menjadi 49,5 Hz, maka putaran poros generator juga akan meningkat. Peningkatan nilai frekuensi ini, belum menghasilkan efisiensi generator yang baik yaitu masih menunjukkan 52,5%.

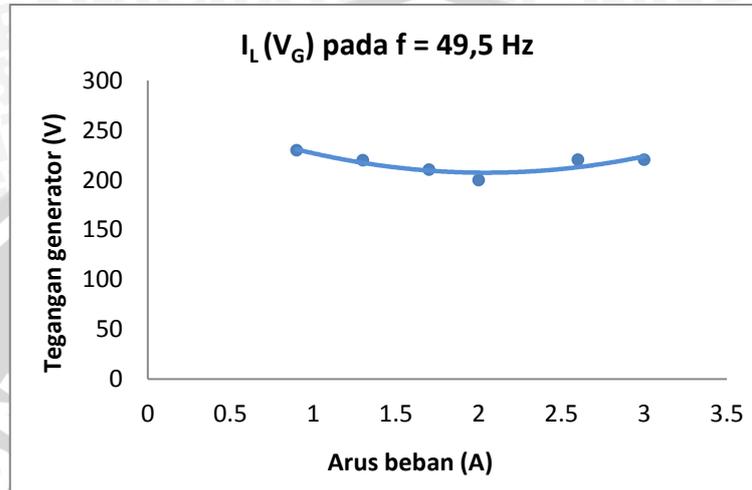
Dilihat pada Gambar 5.6 yang mengacu pada Gambar 2.8, slip mesin menjadi negatif yang mana sesuai dengan karakteristik dari mesin induksi yang bekerja sebagai generator. Hal ini dikarenakan adanya peningkatan kecepatan putaran pada poros generator yang melebihi kecepatan sinkronnya.



Gambar 5.6 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 49,5$ Hz

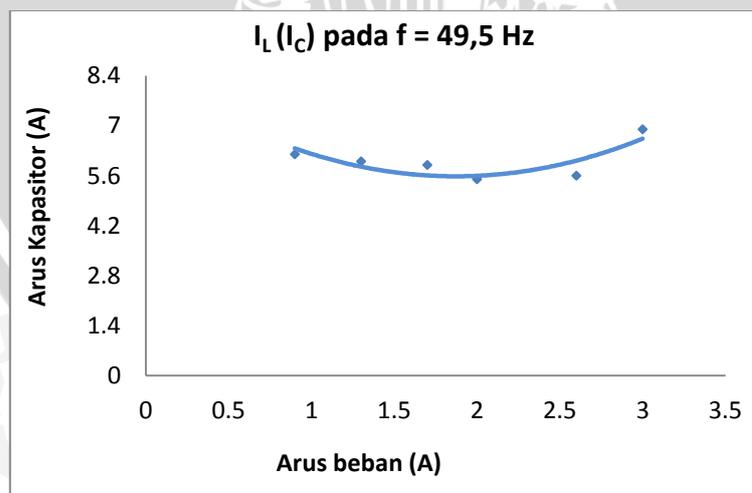
Slip akan menurun seiring dengan penambahan arus generator, dengan bertambahnya arus generator maka slip generator induksi menjadi negatif pada frekuensi 49,5 Hz ini (Gambar 5.7). Perubahan arus generator ini juga dipengaruhi

oleh perubahan arus beban dan arus eksitasi. Dengan bertambahnya arus beban, tegangan keluaran generator induksi yang dicapai mendekati nominal dan cenderung tidak ada penurunan tegangan yang drastis sesuai dengan Gambar 5.7. Hal ini diperoleh dengan mengatur nilai arus kapasitor eksitasi untuk mendapatkan tegangan yang sesuai standar.



Gambar 5.7 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 49,5$ Hz

Seperti yang telah disampaikan bahwa penambahan arus beban ini perlu diikuti dengan penambahan arus kapasitor eksitasi. Dengan bertambahnya arus beban maka diperlukan penambahan arus kapasitor eksitasi untuk memperoleh tegangan keluaran yang diinginkan, sehingga diperoleh karakteristik pada Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 49,5$ Hz

Tabel 5.6. Hasil pengujian generator induksi satu fasa dengan $f = 50$ Hz

No.	Motor DC Penguat Terpisah					Generator Induksi Satu Fasa						
	Vf (volt)	If (amp)	Va (volt)	Ia (amp)	nr (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Vg (volt)	Ig (amp)	Ic (amp)	Beban	I _L (amp)
1	173	0,7	135	3,5	802	1521	63	200	4,3	4,4	2 lampu	0,8
2			135	5,6	812	1516	79	230	6,1	6,3	3 lampu	1,3
3			135	6,1	820	1519	79	220	6,1	6,0	4 lampu	1,7
4			135	6,6	840	1544	79	210	6,1	5,9	5 lampu	2,1
5			150	9,6	942	1565	95	230	8,0	7,5	6 lampu	2,7

Pengujian pada frekuensi $f = 50$ Hz, juga hanya bisa menambah beban hingga 5 lampu pijar untuk mendapatkan kondisi yang sesuai. Untuk mendapatkan frekuensi 50 Hz maka yang dilakukan adalah menambah kecepatan putaran pada poros generator induksi. Namun ketika ditambahkan beban maka diikuti dengan penambahan kapasitor eksitasi sehingga arus keluaran generator akan melebihi arus nominal pada *nameplate*, sehingga tidak diperbolehkan untuk melakukan penambahan beban lagi pada kondisi ini.

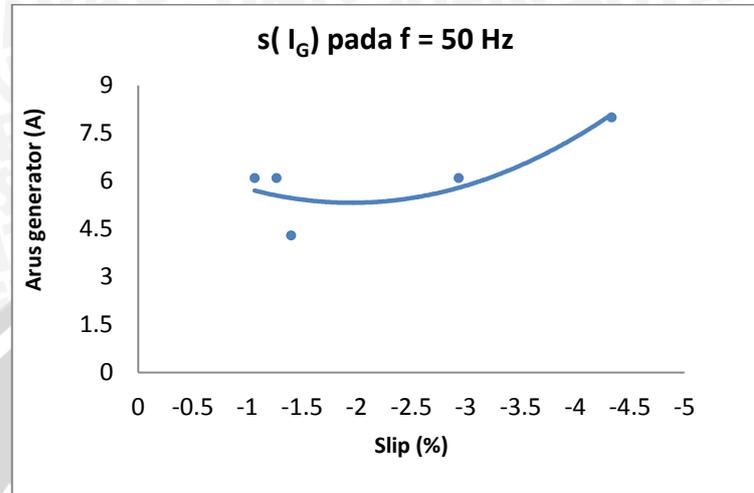
Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh dapat diperhitungkan daya beban (P_L) daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) generator induksi satu fasa sesuai dengan Tabel 5.7 dibawah ini.

Tabel 5.7. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 50$ Hz

No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1521	63	2 lampu	160	593,6	397,0	40,3	-1,4
2		1516	79	3 lampu	299	877,1	680,5	43,9	-1,1
3		1519	79	4 lampu	374	944,6	748,0	50,0	-1,3
4		1544	79	5 lampu	441	1012,1	815,5	54,1	-2,9
5		1565	95	6 lampu	621	1561,1	1364,5	45,5	-4,3

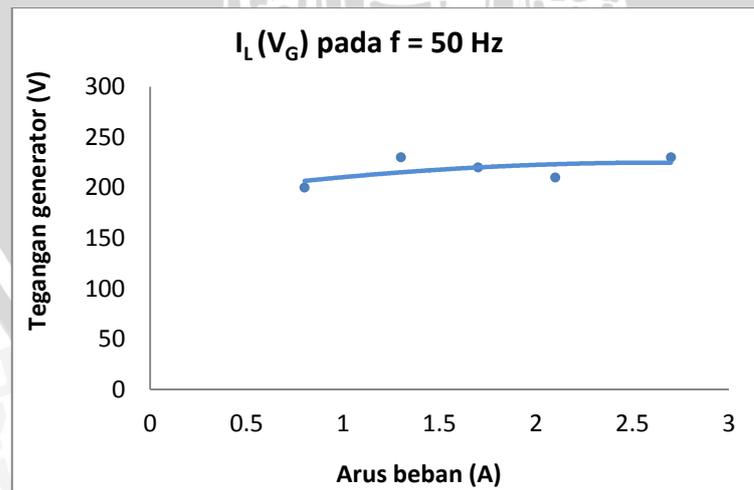
Pada pengujian generator induksi satu fasa dengan frekuensi 50 Hz sesuai dengan Tabel 5.7 ini masih belum terjadi peningkatan efisiensi dari generator induksi. Efisiensi generator menunjukkan 54,1% pada kondisi pembebanan 5 lampu pijar dengan daya beban sebesar 441 watt.

Karakteristik dari generator induksi tampak pada Gambar 5.9, bahwa mesin telah bekerja sebagai generator yaitu ketika slip sudah bernilai negatif. Slip generator akan mengalami penurunan ketika arus generator meningkat.



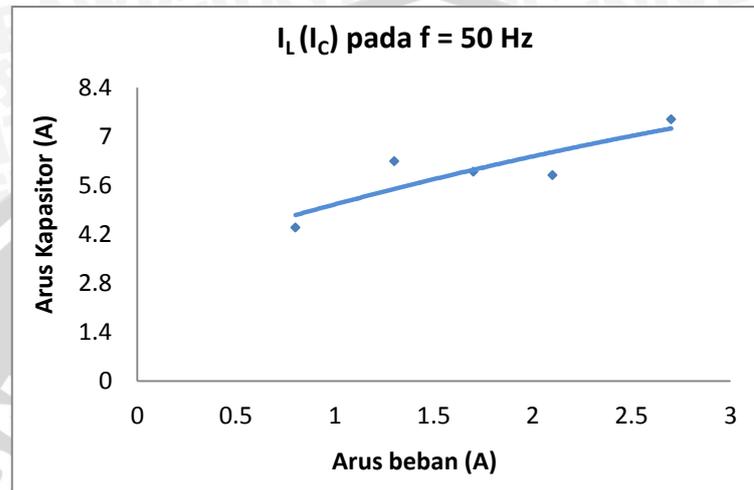
Gambar 5.9 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 50$ Hz

Peningkatan arus generator dipengaruhi adanya peningkatan arus beban dan arus kapasitor eksitasinya. Dengan mengatur arus kapasitor eksitasi, meskipun dilakukan penambahan arus beban pada pengujian maka masih menghasilkan tegangan keluaran generator yang nominal sesuai standar, tampak pada Gambar 5.10. Dalam gambar tersebut tidak terjadi penurunan tegangan yang cukup signifikan, hal ini dikarenakan tepatnya pengaturan kapasitor eksitasi.



Gambar 5.10 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 50$ Hz

Tidak terjadinya penurunan tegangan keluaran yang signifikan disebabkan karena penambahan arus eksitasi yang tepat tiap penambahan beban, yang mana antara antara arus beban dan arus kapasitor eksitasi berbanding lurus. Sehingga arus kapasitor eksitasi akan meningkat seiring dengan penambahan beban yang mana dapat dilihat pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 50$ Hz

Tabel 5.8. Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 50,5$ Hz

No.	Motor DC Penguat Terpisah					Generator Induksi Satu Fasa						
	Vf (volt)	If (amp)	Va (volt)	Ia (amp)	nr (rpm)	nr (rpm)	C (μ F)	Vg (volt)	Ig (amp)	Ic (amp)	Beban	I _l (amp)
1	173	0,7	135	3,6	806	1534	63	200	4,3	4,4	2 lampu	0,8
2			140	5,8	826	1534	79	230	6,1	6,3	3 lampu	1,2
3			140	6,4	830	1546	79	220	6,2	6,1	4 lampu	1,7
4			140	6,8	842	1540	79	220	6,1	5,9	5 lampu	2,1
5			140	7,1	857	1560	79	200	6,1	5,6	6 lampu	2,5
6			145	6,5	867	1567	63	190	5,7	5,3	7 lampu	2,7

Berbeda halnya dengan pengujian pada frekuensi $f = 50,5$ Hz, dengan meningkatkan putaran poros generator dan kapasitor eksitasi dengan nilai antara $63 - 79 \mu\text{F}$ dapat melayani beban hingga 7 lampu pijar 100 watt. Arus keluaran generator terlihat masih jauh untuk mencapai nilai nominal 7,3 A. Namun pada pembebanan ini terjadi penurunan tegangan menjadi 190 volt. Untuk mencapai tegangan standar maka dilakukan penambahan kapasitor eksitasi sebesar $16 \mu\text{F}$, namun perlakuan tersebut menyebabkan *over voltage* pada keluaran generator dan

arus generator akan melebihi dari nilai nominal *nameplate*. Sehingga kondisi pembebanan 7 lampu pijar yang tampak pada Tabel 5.8 dapat dicapai.

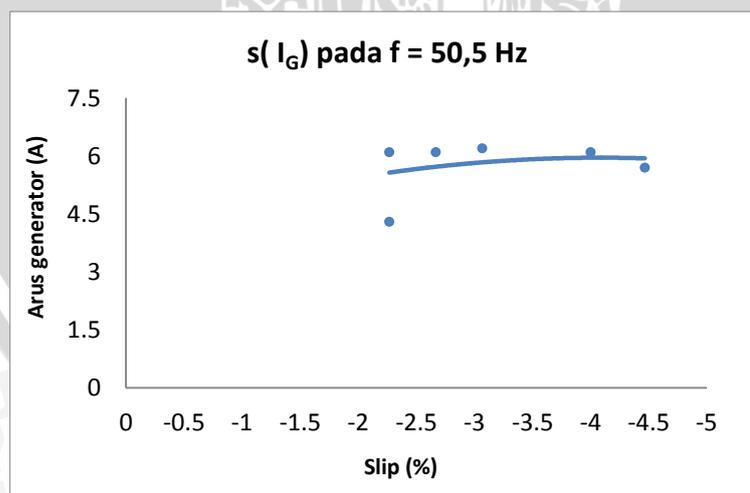
Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh diperhitungkan daya beban (P_L) daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) generator induksi satu fasa sesuai dengan Tabel 5.9 dibawah ini.

Tabel 5.9. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 50,5$ Hz

No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1534	63	2 lampu	160	607,1	410,5	38,9	-2,3
2		1534	79	3 lampu	276	933,1	736,5	37,5	-2,3
3		1546	79	4 lampu	374	1017,1	820,5	45,6	-3,1
4		1540	79	5 lampu	462	1073,1	876,5	52,7	-2,7
5		1560	79	6 lampu	500	1115,1	918,5	54,4	-4,0
6		1567	63	7 lampu	513	1063,6	867,0	59,2	-4,8

Semakin ditingkatkannya frekuensi keluaran generator, yang mana frekuensi mencapai 50,5 Hz, efisiensi generator induksi ini berangsur-angsur meningkat. Pada pengujian ini efisiensi tertinggi dicapai pada saat pembebanan 7 lampu pijar dengan daya 513 watt dan menghasilkan efisiensi 59,2%.

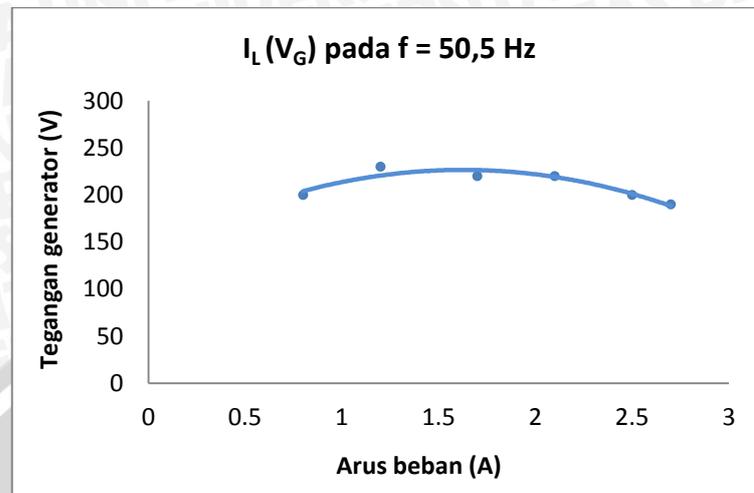
Untuk melihat karakteristik generator induksi satu fasa saat frekuensi 50,5 dilihat pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 50,5$ Hz

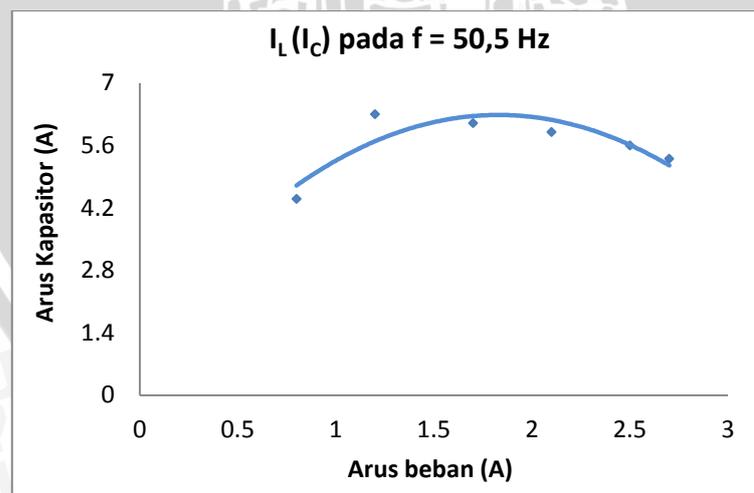
Pada frekuensi 50,5 Hz ini, mesin bekerja pada slip negatif yaitu berkisar antara -2,8% sampai dengan -4,5%. Slip generator induksi ini terpengaruh dari

arus keluarannya. Penurunan slip generator ini diikuti dengan meningkatnya arus keluaran generator induksi.



Gambar 5.13 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 50,5$ Hz

Pada setiap penambahan arus beban, diusahakan tegangan keluaran generator induksi tetap pada tegangan ratingnya. Seperti pada Gambar 5.13, tegangan pada arus beban tidak terjadi penurunan yang signifikan. Hanya saja terjadi penurunan tegangan terjadi pada pembebanan 7 lampu diakibatkan keterbatasan alat pengujian berupa kapasitor eksitasi. Perubahan arus beban ini juga perlu diiringi dengan penambahan kapasitor eksitasi, sehingga apabila arus beban semakin besar maka arus kapasitor eksitasi akan besar juga (Gambar 5.14)



Gambar 5.14 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 50,5$ Hz

Dikarenakan pengujian terhadap frekuensi 51 Hz sampai dengan 52,5 Hz dilakukan pada hari yang berbeda, maka perlu melakukan pengujian rugi mekanik mesin, seperti pada Tabel 5.10.

Dengan tegangan medan (V_f) = 182 Volt

Arus medan (I_f) = 0,7 ampere

Tabel 5.10. Pengujian Rugi Mekanik Motor Penggerak Sebelum Dikopling

No.	Putaran, n (rpm)	V_a (volt)	I_a (ampere)
1.	815	80	0,35
2.	835	85	0,35
3.	850	90	0,40
4.	868	95	0,48
5.	920	100	0,48
6.	965	105	0,50
7.	1020	110	0,50
8.	1185	115	0,48
9.	1215	120	0,50
10.	1240	125	0,50

Dengan data hasil pengujian (tanggal 19 Juni 2012) pengaruh perubahan kapasitor eksitasi pada generator induksi untuk beberapa keadaan beban dilihat pada Tabel 5.11 sampai dengan Tabel 5.16 di bawah ini.

Tabel 5.11. Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 51$ Hz

No.	Motor DC Penguat Terpisah						Generator Induksi Satu Fasa					
	V_f (volt)	I_f (amp)	V_a (volt)	I_a (amp)	n_r (rpm)	n_r (rpm)	C (μ F)	V_g (volt)	I_g (amp)	I_c (amp)	Beban	I_l (amp)
1	184	0,7	80	3,1	790	1540	47	210	4,4	4,3	2 lampu	0,7
2			85	3,6	820	1545	47	200	4,3	4,2	3 lampu	1,1
3			85	5	830	1550	55	220	5,4	5,4	4 lampu	1,6
4			85	5,2	820	1545	55	200	5,3	4,9	5 lampu	2,0
5			90	6,8	860	1570	63	220	6,0	5,9	6 lampu	2,5
6			90	6,9	850	1580	63	200	5,9	5,5	7 lampu	2,8

Dengan ditingkatkannya frekuensi generator induksi, maka putaran pada poros generator juga akan meningkat sedangkan kapasitor eksitasi yang digunakan akan turun dibandingkan dengan frekuensi dibawahnya. Pada pengujian frekuensi

ini beban yang dapat ditanggung hingga 7 lampu pijar. Apabila beban ditambah maka tegangan terminal generator akan menurun maka perlu ditambahkan kapasitor eksitasi. Akibatnya tegangan sudah tercapai namun frekuensi akan turun, maka keluaran generator tidak bisa mencapai tegangan dan frekuensi yang diharapkan.

Melihat karakteristik pengujian rugi mekanik pada Tabel 5.10, yang sesuai dengan kondisi pengujian generator induksi adalah ketika putaran motor penggerak sebesar 835 rpm. Maka diperoleh rugi mekanik sebesar :

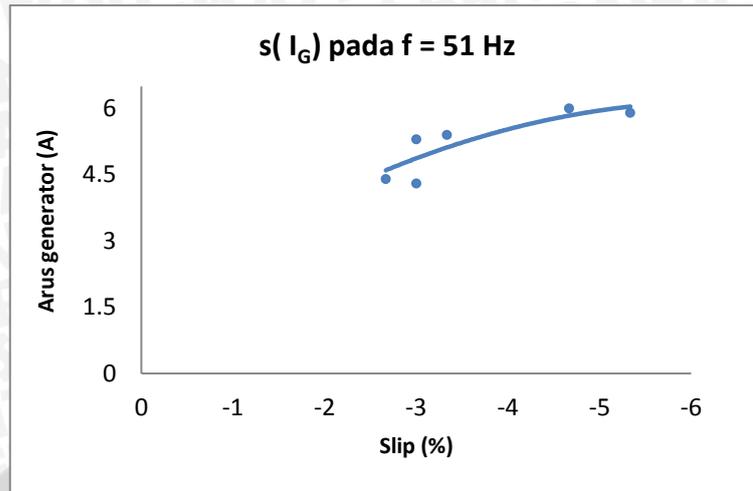
$$\begin{aligned} \text{Rugi mekanik} &= (V_f \times I_f) + (V_a \times I_a) \\ &= (182 \times 0,7) + (85 \times 0,35) = 157,15 \text{ watt} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil yang diperoleh diperhitungkan daya beban (P_L) daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) generator induksi satu fasa sesuai dengan Tabel 5.12 dibawah ini.

Tabel 5.12. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 51$ Hz

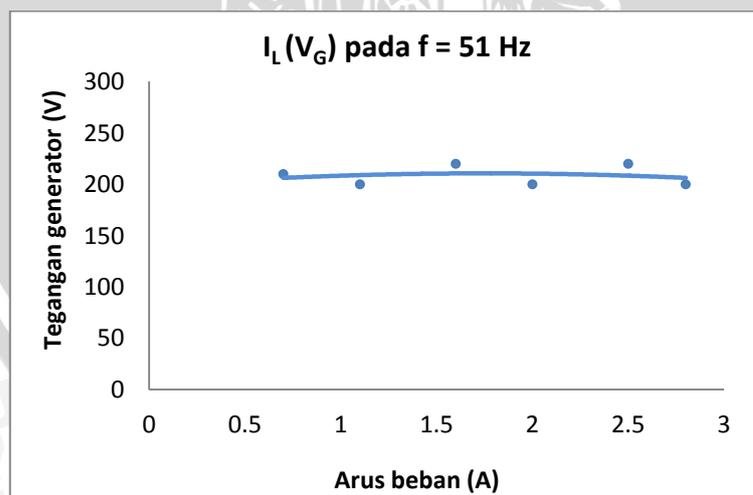
No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1540	47	2 lampu	147	376,8	219,7	66,9	-2,7
2		1545	47	3 lampu	220	434,8	277,7	79,2	-3,0
3		1550	55	4 lampu	352	553,8	396,7	88,7	-3,3
4		1545	55	5 lampu	400	570,8	413,7	96,7	-3,0
5		1570	63	6 lampu	550	740,8	583,7	94,2	-4,7
6		1580	63	7 lampu	560	749,8	592,7	94,5	-5,3

Pada pengujian frekuensi 51 Hz, efisiensi generator induksi meningkat hingga 96,7 % yang terjadi pada pembebanan 5 lampu dengan daya beban masih menunjukkan 400 watt. Terlihat bahwa pembebanan ditambah menunjukkan efisiensi menjadi menurun. Karakteristik slip terhadap arus generator tampak pada Gambar 5.15.



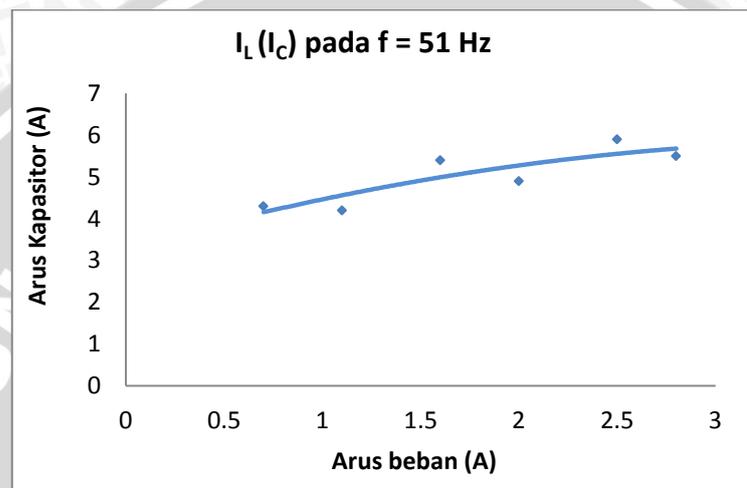
Gambar 5.15 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 51$ Hz

Pada Gambar 5.15 ini, seiring dengan bertambahnya frekuensi kerja generator induksi maka slip generator akan menurun dari keadaan frekuensi dibawahnya. Hal ini dikarenakan kecepatan putaran poros generator yang meningkat dengan kecepatan sinkron tetap, sehingga menghasilkan slip negatif. Dengan menurunnya nilai slip pada pengujian frekuensi 51 Hz, mempengaruhi nilai arus keluaran generator yang meningkat seiring dengan pertambahan arus beban dan arus kapasitor eksitasi. Sedangkan pengaruh perubahan arus beban terhadap tegangan keluaran generator dapat dilihat pada Gambar 5.16.



Gambar 5.16 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 51$ Hz

Dapat dilihat pada grafik, bahwa tegangan yang dibangkitkan oleh generator induksi satu fasa pada frekuensi 51 Hz, selalu pada tegangan ratingnya, tidak ada yang dibawah atau tidak ada yang mengalami penurunan secara drastis meskipun ditambahkan arus bebannya. Dengan dicapainya tegangan tersebut maka seiring dengan bertambahnya beban diikuti dengan penambahan kapasitor eksitasi. Pengaruh arus beban dan arus kapasitor eksitasi ini berbanding lurus sesuai dengan Gambar 5.17.



Gambar 5.17 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 51$ Hz

Tabel 5.13. Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 51,5$ Hz

No.	Motor DC Penguat Terpisah					Generator Induksi Satu Fasa						
	Vf (volt)	If (amp)	Va (volt)	Ia (amp)	nr (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Vg (volt)	Ig (amp)	Ic (amp)	Beban	Ii (amp)
1	180	0,7	80	3,3	820	1550	47	220,0	4,6	4,6	2 lampu	0,8
2			80	3,8	830	1570	47	200,5	4,4	4,5	3 lampu	1,2
3			85	5,2	830	1570	55	220,0	5,7	5,6	4 lampu	1,6
4			85	5,4	850	1580	55	210,0	5,4	5,2	5 lampu	2,0
5			90	7,1	890	1560	63	220,0	6,3	6,0	6 lampu	2,5
6			98	7,2	910	1540	63	220,0	6,2	5,7	7 lampu	2,8
7			115	8,7	1130	1530	63	210,0	7,0	6,1	8 lampu	3,4

Untuk frekuensi 51,5 Hz beban dapat ditambahkan hingga 8 lampu pijar dengan menjaga arus generator tetap dibawah arus nominal pada *nameplate*. Kondisi ini dicapai akibat kapasitor eksitasi yang digunakan lebih rendah daripada

pengujian sebelumnya, sehingga arus kapasitor kecil dan arus generator juga lebih kecil mengikuti penambahan arus beban pada frekuensi 51,5 Hz.

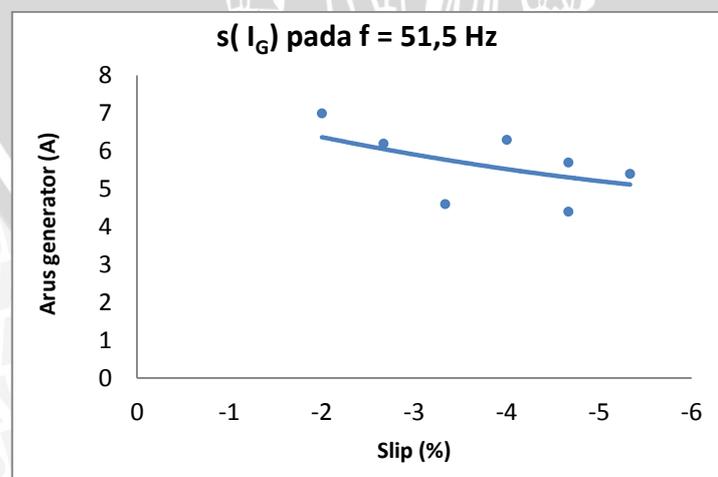
Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh diperhitungkan daya beban (P_L) daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) generator induksi satu fasa sesuai dengan Tabel 5.14 dibawah ini.

Tabel 5.14. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 51,5$ Hz

No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1550	47	2 lampu	176,0	390,0	232,9	75,6	-3,3
2		1570	47	3 lampu	240,6	430,0	272,9	88,2	-4,7
3		1570	55	4 lampu	352,0	568,0	410,9	85,7	-4,7
4		1580	55	5 lampu	420,0	585,0	427,9	98,2	-5,3
5		1560	63	6 lampu	550,0	765,0	607,9	90,5	-4,0
6		1540	63	7 lampu	616,0	831,6	674,5	91,3	-2,7
7		1530	63	8 lampu	714,0	1126,5	969,4	73,7	-2,0

Pada pengujian pada frekuensi 51,5 Hz tampak pada pembebanan 5 lampu pijar menghasilkan efisiensi tertinggi yaitu 98,2% dengan daya beban yang dibangkitkan sebesar 420 watt. Kondisi ini merupakan kondisi yang ideal pada saat pengoperasian generator induksi dalam pengujian. Namun pada saat daya beban sudah mendekati nominal, yaitu pada pembebanan 8 lampu dengan daya beban 714 watt, efisiensi generator ini menurun.

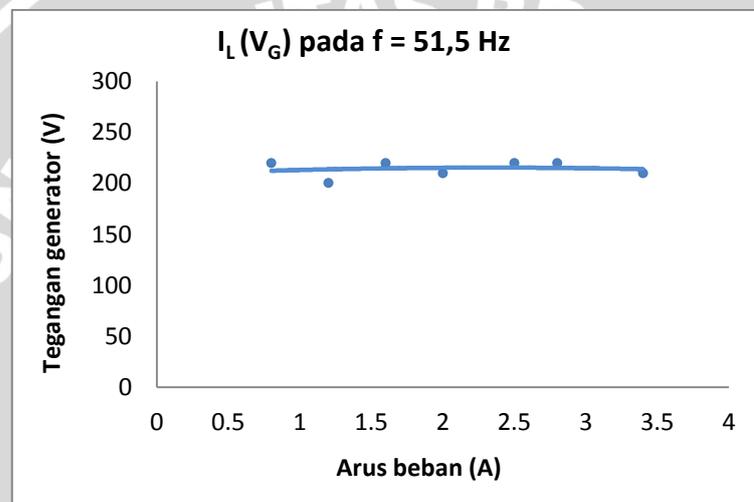
Karakteristik slip terhadap arus generator induksi ini dapat dilihat pada Gambar 5.18 di bawah ini.



Gambar 5.18 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 51,5$ Hz

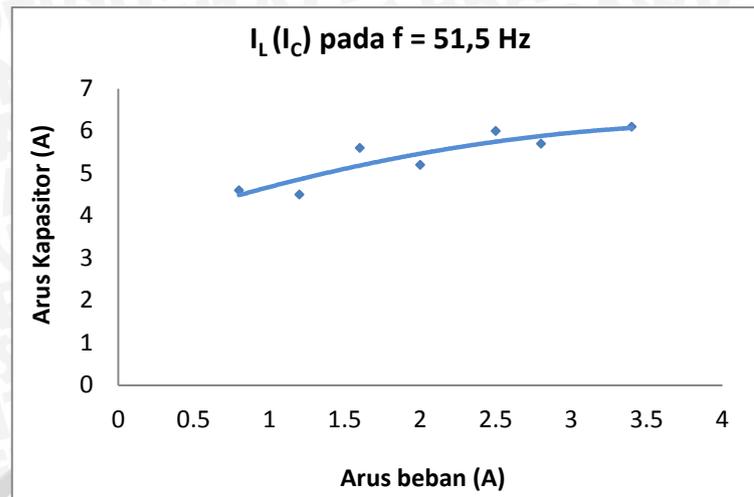
Sama dengan pengujian pada frekuensi yang berbeda, menunjukkan bahwa dengan ditingkatkannya nilai frekuensi menjadi 51,5 Hz maka slip generator induksi menjadi semakin rendah mencapai -5,3% seiring dengan bertambahnya arus generator.

Pada kondisi frekuensi 51,5 Hz, tegangan yang dibangkitkan menunjukkan sesuai dengan rating, seperti yang tampak pada Gambar 5.19. Tegangan dapat dijaga meskipun diiringi dengan penambahan beban. Tegangan yang dibangkitkan oleh generator induksi ini dapat dijaga pada ratingnya dikarenakan penambahan jumlah kapasitor eksitasi yang tepat setiap penambahan bebannya.



Gambar 5.19 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 51,5$ Hz

Seperti yang telah diungkapkan bahwa untuk mendapatkan tegangan keluaran generator induksi satu fasa seperti pada Gambar 5.19 ini perlu menyeimbangkan antara arus beban dan arus kapasitor eksitasi. Sehingga apabila ada kenaikan beban maka perlu menambahkan kapasitas kapasitor eksitasi, yang mana apabila arus beban semakin besar maka arus kapasitor eksitasi akan semakin besar pula seperti pada Gambar 5.20.



Gambar 5.20 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 51,5$ Hz

Tabel 5.15. Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa dengan $f = 52$ Hz

No.	Motor DC Penguat Terpisah					Generator Induksi Satu Fasa						
	Vf (volt)	If (amp)	Va (volt)	Ia (amp)	nr (rpm)	nr (rpm)	C (μ F)	Vg (volt)	Ig (amp)	Ic (amp)	Beban	Ii (amp)
1	184	0,7	80	3,6	830	1545	31	220,0	4,8	5,0	2 lampu	0,8
2			82	4,0	840	1580	31	210,0	4,7	4,7	3 lampu	1,2
3			90	5,4	850	1580	39	220,0	5,7	5,6	4 lampu	1,7
4			90	5,4	870	1580	39	210,0	5,6	5,4	5 lampu	2,0
5			90	5,8	890	1560	39	200,0	5,5	5,0	6 lampu	2,4
6			100	7,4	910	1540	47	200,5	6,3	5,7	7 lampu	2,8
7			100	7,2	930	1590	64	190,0	6,1	5,4	8 lampu	3,1

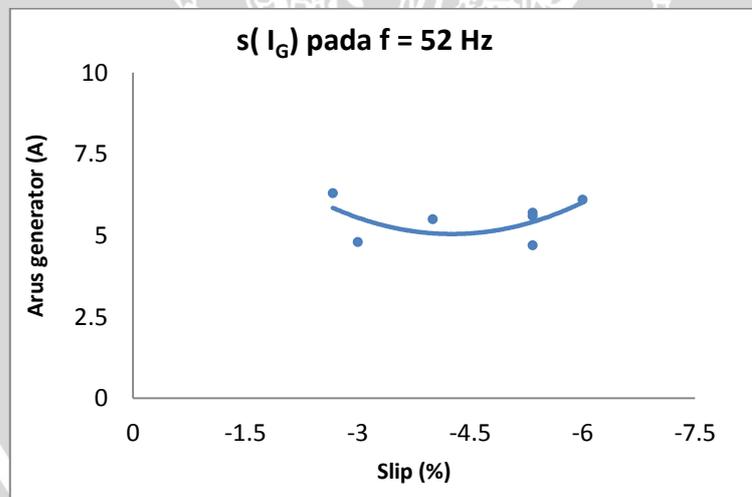
Semakin besar frekuensi yang diinginkan pada keluaran generator maka putaran pada poros generator akan dipercepat dari frekuensi dibawahnya. Untuk kapasitor eksitasi yang digunakan juga menjadi lebih rendah dari pengujian frekuensi dibawahnya. Dengan pengaturan putaran dan kapasitor eksitasi ini sudah bisa menghasilkan tegangan dan frekuensi keluaran generator yang sesuai standar. Namun pada frekuensi ini, penambahan beban hanya sampai 7 lampu saja untuk kondisi yang diinginkan. Apabila ditambahkan beban 1 lampu pijar 100 watt lagi, maka tegangan menurun hingga 190 volt, dengan ditambahkan kapasitor eksitasi maka akan menyebabkan arus generator melebihi arus nominal pada *nameplate*. Apabila tidak ditambahkan kapasitor eksitasi, maka tegangan tidak dapat dicapai sedangkan frekuensi sudah mencapai 52 Hz.

Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh diperhitungkan daya beban (P_L) daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) generator induksi satu fasa sesuai dengan Tabel 5.16 dibawah ini.

Tabel 5.16. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 52$ Hz

No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1545	31	2 lampu	176,0	416,8	259,7	67,8	-3,0
2		1580	31	3 lampu	252,0	456,8	299,7	84,1	-5,3
3		1580	39	4 lampu	374,0	614,8	457,7	81,7	-5,3
4		1580	39	5 lampu	420,0	614,8	457,7	91,8	-5,3
5		1560	39	6 lampu	480,0	650,8	493,7	97,3	-4,0
6		1540	47	7 lampu	561,4	868,8	711,7	78,9	-2,7
7		1590	64	8 lampu	589,0	848,8	691,7	85,2	-6,0

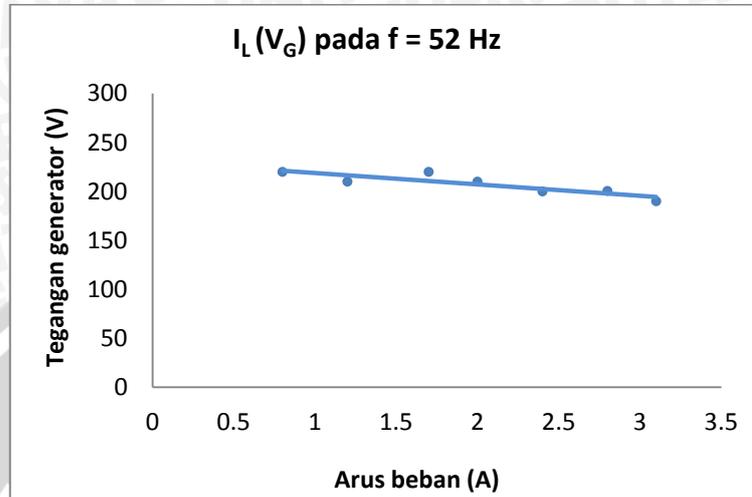
Dengan mengacu pada Tabel 5.21, terlihat bahwa mesin bekerja pada slip negatif dan nilainya lebih rendah dibandingkan dengan slip pada pengujian frekuensi dibawah 52 Hz. Semakin negatif nilai slip maka semakin tinggi putaran poros generator induksi.



Gambar 5.21 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 52$ Hz

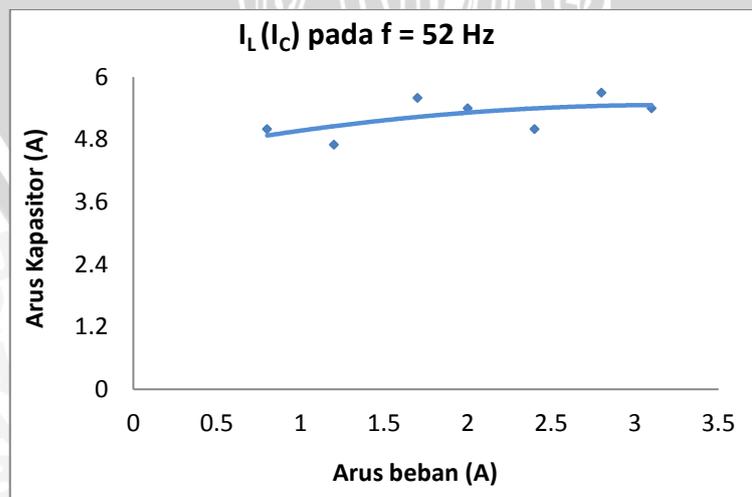
Sehingga yang tampak pada Gambar 5.21, semakin negatif slip generator induksi maka arus generator meningkat. Dengan meningkatnya arus generator ini dipengaruhi oleh arus beban serta arus kapasitor eksitasinya. Arus beban yang meningkat harus diiringi dengan penambahan kapasitor eksitasi untuk

menghasilkan tegangan keluaran generator yang sesuai dengan tegangan rating. Sesuai pengujian yang dilakukan, tegangan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 5.22.



Gambar 5.22 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 52$ Hz

Pada Gambar 5.22 ini tampak bahwa tegangan keluaran generator induksi mengalami penurunan hingga 190 volt pada saat arus beban tertinggi. Adanya perubahan tegangan keluaran generator induksi saat terjadi perubahan arus beban dipengaruhi oleh kapasitor eksitasi. Karena pengaruh arus beban dan arus kapasitor eksitasi adalah berbanding lurus ketika arus beban mengalami peningkatan maka kapasitor eksitasi juga perlu ditambah. Sehingga arus beban yang semakin besar maka arus kapasitor eksitasi akan semakin besar pula seperti pada Gambar 5.23.



Gambar 5.23 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 52$ Hz

Tabel 5.17. Hasil Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 52,5$ Hz

No.	Motor DC Penguat Terpisah					Generator Induksi Satu Fasa						
	Vf (volt)	If (amp)	Va (volt)	Ia (amp)	nr (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Vg (volt)	Ig (amp)	Ic (amp)	Beban	Ii (amp)
1	184	0,7	85	3,5	840	1590	47	220,5	4,9	5,1	2 lampu	0,8
2			85	4,7	845	1580	47	220,0	4,8	4,9	3 lampu	1,2
3			85	4,4	850	1600	47	200,0	4,6	4,4	4 lampu	1,6
4			85	4,5	850	1600	47	180,5	4,4	4,2	5 lampu	1,9
5			90	5,8	895	1610	47	170,0	4,1	3,5	6 lampu	2,5
6			90	7,1	905	1625	47	150,0	4,0	2,9	7 lampu	2,8
7			120	7,9	1210	1630	63	220,0	6,6	5,7	8 lampu	3,2

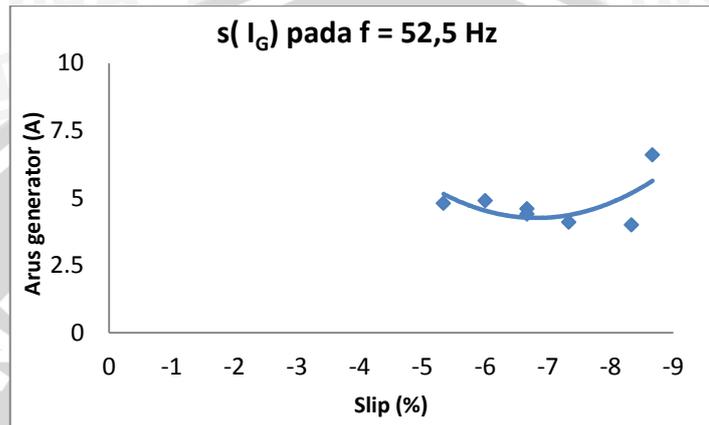
Selanjutnya frekuensi ditingkatkan hingga $f = 52,5$ Hz, putaran poros generator dipercepat. Pada pengujian ini kondisi beban 5 sampai 7 lampu terjadi penurunan tegangan belum bisa mencapai kondisi yang diinginkan. Hal ini dikarenakan keterbatasan kapasitor eksitasi yang digunakan. Apabila kapasitor eksitasi ditambahkan maka putaran menurun, ketika putaran diaikkan untuk mencapai 52,5 Hz akan menyebabkan *over voltage*. Namun pada saat ditambahkan beban lagi menjadi 8 lampu, maka sudah dapat mencapai tegangan dan frekuensi standar yang diinginkan, yaitu dengan menambahkan kapasitor eksitasi dan menaikkan putaran poros generator.

Sehingga berdasarkan hasil yang diperoleh diperhitungkan daya beban (P_L) daya motor penggerak (P_{DC}) untuk didapatkan efisiensi dan juga slip (s) generator induksi satu fasa sesuai dengan Tabel 5.18 dibawah ini.

Tabel 5.18. Perhitungan Pengujian Generator Induksi Satu Fasa $f = 52,5$ Hz

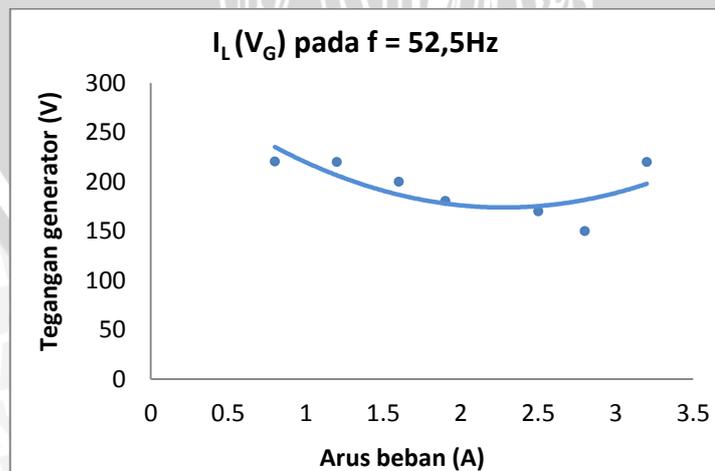
No.	ns (rpm)	nr (rpm)	C (uF)	Beban	P_L (watt)	P_{DC} (watt)	P_{DC} -rugi mekanik (watt)	Efisiensi GI (%)	Slip (%)
1	1500	1590	47	2 lampu	176,4	426,3	269,2	65,5	-6,0
2		1580	47	3 lampu	264	528,3	371,2	71,1	-5,3
3		1600	47	4 lampu	320	502,8	345,7	92,6	-6,7
4		1600	47	5 lampu	343	511,3	354,2	96,8	-6,7
5		1610	47	6 lampu	425	650,8	493,7	86,1	-7,3
6		1625	47	7 lampu	420	767,8	610,7	68,8	-8,3
7		1630	63	8 lampu	704	1076,8	919,7	76,5	-8,7

Dengan frekuensi 52,5 Hz efisiensi generator induksi mencapai 96,8% pada saat pembebanan 5 lampu pijar dengan daya beban sebesar 343 watt. Sedangkan pada saat terjadi pembebanan hingga 8 lampu pijar, dengan daya semakin besar menyebabkan efisiensi generator menjadi turun. Meningkatnya daya beban pada generator induksi hanya berpengaruh terhadap slip yang semakin menurun, dapat dilihat pada Gambar 5.24.



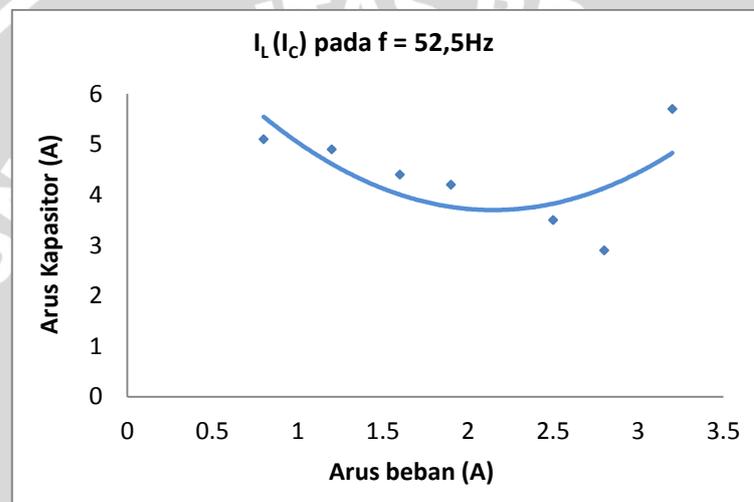
Gambar 5.24 Grafik Pengaruh Slip Terhadap Arus Generator $f = 52,5$ Hz

Dengan melakukan pengujian pada frekuensi 52,2 Hz ini maka slip menjadi semakin rendah dikarenakan kecepatan putaran poros generator yang meningkat juga. Slip generator induksi akan menurun ketika arus generator meningkat. Arus generator ini dipengaruhi oleh arus beban dan arus kapasitor eksitasi. Sedangkan arus beban dan arus kapasitor ini sangat mempengaruhi tegangan keluaran generator induksi. Pengaruh arus beban terhadap tegangan generator induksi dapat dilihat pada Gambar 5.25.



Gambar 5.25 Grafik Arus Beban Terhadap Tegangan Generator $f = 52,5$ Hz

Berdasarkan Gambar 5.28, dengan bertambahnya arus beban tegangan keluaran generator masih sesuai dengan tegangan rating dengan cara menambahkan kapasitor eksitasi. Dikarenakan keterbatasan kapasitor yang digunakan, pada saat arus beban 1,9 A terjadi penurunan tegangan hingga 180,5 V. Agar tidak terjadi penurunan tegangan yang drastis maka pada saat penambahan beban dibutuhkan penambahan kapasitas kapasitor eksitasi yang tepat. Pada Gambar 5.26 ini tampak bahwa arus beban dan arus kapasitor eksitasi berbanding lurus. Arus beban semakin besar maka arus kapasitor eksitasi akan semakin besar pula.



Gambar 5.26 Grafik Arus Beban Terhadap Arus Kapasitor Eksitasi $f = 52,5$ Hz

Dari keseluruhan pengujian ini dapat dikatakan bahwa penambahan kapasitor eksitasi mempengaruhi tegangan keluaran generator. Dikarenakan penambahan kapasitor dilakukan per $16 \mu\text{F}$ maka menyebabkan tegangan dan frekuensi keluaran generator yang diinginkan tidak bisa dicapai pada beberapa kondisi beban.

Yang perlu diperhatikan dari hasil pengujian adalah ketika beban ditambah arus beban meningkat dan arus kapasitor eksitasi menurun. Dengan menambahkan secara fasor antara arus beban (I_L) dan arus kapasitor (I_C) maka akan diperoleh arus keluaran generator (I_G). Apabila diambil salah satu contoh pada Tabel 5.3 untuk beban 4 lampu pijar dengan $f = 50$ Hz, sebagai berikut :

$$I_G = \sqrt{(I_L^2) + (I_C^2)}$$

Dengan :

$$I_L = 1,7 \text{ ampere}$$

$$I_C = 6 \text{ ampere}$$

$$I_G = \sqrt{(1,7^2) + (6,0^2)}$$
$$= 6,2 \text{ ampere}$$

Hasil yang diperoleh adalah 6,2 ampere sehingga hasil ini mendekati hasil pengujian sebesar 6,1 ampere.

Dengan melihat keseluruhan tabel pengujian, dengan menambahkan kapasitor eksitasi maka arus eksitasi akan meningkat. Namun ketika ditambahkan beban, dengan nilai kapasitor yang sama, maka terjadi penurunan arus eksitasi. Hal ini akan terjadi terus menerus selama masih dilakukannya penambahan beban dan penambahan arus eksitasinya. Kapasitor eksitasi yang dipakai sangat dipengaruhi oleh frekuensi generator. Semakin tinggi frekuensi generator maka kapasitor eksitasi yang digunakan menjadi semakin kecil.

Pada beberapa pengujian yang dilakukan dengan pengaturan berbagai nilai frekuensi, saat mesin diputar pada kecepatan sinkron maka unjuk kerja dari generator induksi satu fasa ini kurang optimal. Sehingga dalam mengoperasikan generator induksi satu fasa yaitu dengan memutar kecepatan poros generator diatas kecepatan nominal dan pada frekuensi yang tinggi.

BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisa terhadap perancangan pembangkit listrik tenaga mikrohidro dengan menggunakan air buangan limbah dari PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Kapasitas daya yang dapat dihasilkan dari perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) ini secara teoritis dengan debit andalan $649,6774 \text{ m}^3/\text{h}$ atau $0,1805 \text{ m}^3/\text{s}$, tinggi jatuh efektif 2,4 meter, dan kecepatan aliran air pada pipa $2,4745 \text{ m/s}$ adalah sebesar 1.273,8 W. sehingga generator induksi satu fasa yang digunakan kapasitas 2 HP.
2. Dengan ketinggian jatuh air sebesar 2,4 meter, maka penggerak yang digunakan berupa kincir air *over-shot* dan menggunakan transmisi mekanik yang terdiri dari gardan mobil, gardan truk, *pulley* dan *belt* untuk menghubungkan ke generator.
3. Berdasarkan hasil pengujian generator induksi satu fasa 1 HP di Laboratorium Mesin Elektrik Teknik Elektro Universitas Brawijaya dengan beban resistif lampu pijar 100 W didapatkan hasil bahwa :
 - a. Semakin negatif slip (yang berarti putaran poros generator meningkat), daya generator yang dihasilkan semakin besar.
 - b. Tegangan keluaran dapat dijaga sesuai rating dengan melakukan penambahan atau pengurangan kapasitor eksitasi saat terjadi penambahan atau pengurangan beban. Arus generator dipengaruhi oleh arus beban dan arus kapasitor eksitasi yang mana arus antara arus beban dan arus kapasitor eksitasi yang berbeda 90° .
 - c. Daya beban yang dapat dicapai adalah 714 watt, yaitu sebesar 95,7% dari kapasitas yang tertera pada *nameplate* saat bekerja sebagai motor induksi. Efisiensi tertinggi sebesar 98,2% yang mana keduanya dicapai pada saat frekuensi 51,5 Hz.

6.2 Saran

Dari hasil perhitungan dan analisa pembangkit listrik tenaga kincir air dengan menggunakan air buangan limbah dari PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto, Jawa Timur yang telah dilakukan ada beberapa saran untuk merancang pembangkit listrik tenaga mikrohidro yang baik untuk kedepannya yaitu :

1. Pengoperasian generator induksi satu fasa ini akan optimal dengan menggunakan kapasitor eksitasi geser dan dapat diatur secara otomatis ketika terjadinya penurunan tegangan keluaran generator.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut terhadap penentuan titik P (dapat dilihat pada Gambar 2.10) sebagai titik ideal dari kerja generator induksi satu fasa.



DAFTAR PUSTAKA

- Bhattacharya, 1986. *Electrical Machines: Induction Machines, Synchronous Machines and Fractional Kilowatt Motors*. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Budiono, Gatut, Edi Purwanto. 2002. *Generator Induksi denan Berpenguatan Sendiri Menggunakan Kapasitor Paralel*. Saintrl No. 6 Volume 2.
- Chapallaz, J.M. 1992. *Manual On Induction Motors Used As Generators*. Jerman: Deutsches Zentrum fur Entwicklungstechnologies-GATEm Braunshweig.
- Chapman, Stephen J. 2006. *Electric Machinery Fundamentals 4th Edition*. McGraw Hill Higher Education
- Dewan Energi Nasional, 2010. *Media Informasi dan Komunikasi Dewan Energi Nasional Edisi II*.
- Hagendoorn, J. J. M. 1989. *Konstruksi Mesin 2*. Jakarta : PT. Rosda Jayaputra.
- Harvey, Adam. 1993. *Micro-hydro Design Manual*. Warwickshire CV23 9QZ, UK. Intermediate Technology Publication Ltd.
- Kadir, Abdul . 1981. *Mesin Tak Serempak*. Jakarta: Penerbit Djambatan.
- Patty, O. 1995. *Tenaga Air*. Jakarta: Erlangga.
- Mawardi, Erman. 2002. *Membangun Kincir Air Pengambil Air Baku*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air.
- Mc. Pherson, George.1981. *An Introduction to Electrical Machiens and Transformer 2nd Edition*. Singapore: John Wiley&Sons.
- Müller, Gerald. 2002. *Water Wheels as a Power Source*. German : Veit& Comp., Keipzig

Nasar, Syed.A.1995. *Electric Machines and Power Systems Volume I*. Singapore: Mc.Graw-Hill,Inc.

Santoso, Hari. 1984. *Aplikasi Generator Induksi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air Mikro*. Malang: Universitas Brawijaya

Shannon, Ron. 1997. *Water Wheel Engineering*. Australia: Permaculture Association of Western Australia Inc.

Soto, Gary. 1997. *Water Wheel vol. 163. No. 4*.

http://en.wikipedia.org/wiki/Water_wheel

Subekti, Imam. 1997. *Majalah Energi dan Listrik*. Jakarta: PT. PLN (Persero) Jasa Teknik Kelistrikan.

Sularso. 1994. *Dasar Perancangan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita

Sumardjati, Pih, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik*. Jakarta : Departemen Pendidikan Nasional.

Sutikno, Djoko. 1997. *Turbin Air Banki*. Malang: Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

**Lampiran 1. Rekap Data Debit Air Buangan PT. Ajinomoto Factory
Mojokerto pada Bulan Maret 2012**

Maret 2012	Pengukuran pada pukul	Drain pool NE			Drain pool NEX		
		Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Debit harian rata-rata (m ³ /h)	Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Debit harian rata-rata (m ³ /h)
1	08.00	26.845	125	88,00	924.975	1.480	1323,33
	16.00	26.984	139		925.100	1.250	
	00.00	26.984	-		925.224	1.240	
2	08.00	26.984	-	0,00	925.328	1.040	750,00
	16.00	26.984	-		925.397	690	
	00.00	26.984	-		925.449	520	
3	08.00	26.984	-	0,00	925.506	570	560,00
	16.00	26.984	-		925.567	610	
	00.00	26.984	-		925.617	500	
4	08.00	26.984	-	3,33	925.671	540	523,33
	16.00	26.994	10		925.724	530	
	00.00	26.994	-		925.774	500	
5	08.00	26.994	-	0,00	925.824	500	550,00
	16.00	26.994	-		925.880	560	
	00.00	26.994	-		925.939	590	
6	08.00	26.994	-	36,67	925.987	480	580,00
	16.00	27.104	110		926.049	620	
	00.00	27.104	-		926.113	640	
7	08.00	27.104	-	0,00	926.168	550	456,67
	16.00	27.104	-		926.204	360	
	00.00	27.104	-		926.250	460	
8	08.00	27.104	-	0,00	926.300	500	480,00
	16.00	27.104	-		926.350	500	
	00.00	27.104	-		926.394	440	
9	08.00	27.104	-	0,00	926.441	470	506,67
	16.00	27.104	-		926.495	540	
	00.00	27.104	-		926.546	510	
10	08.00	27.104	-	0,00	926.594	480	576,67
	16.00	27.104	-		926.658	640	
	00.00	27.104	-		926.719	610	
11	08.00	27.104	-	6,00	926.805	860	656,67
	16.00	27.122	18		926.872	670	
	00.00	27.122	-		926.916	440	

Maret 2012	Pengukuran pada pukul	Drain pool NE			Drain pool NEX		
		Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Debit harian rata-rata (m ³ /h)	Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Debit harian rata-rata (m ³ /h)
12	08.00	27.122	-	15,67	926.978	620	593,33
	16.00	27.169	47		927.050	720	
	00.00	27.169	-		927.094	440	
13	08.00	27.169	-	0,00	927.169	750	686,67
	16.00	27.169	-		927.240	710	
	00.00	27.169	-		927.300	600	
14	08.00	27.169	-	3,67	927.351	510	583,33
	16.00	27.180	11		927.440	890	
	00.00	27.180	-		927.475	350	
15	08.00	27.283	103	57,67	927.583	1.080	736,67
	16.00	27.353	70		927.628	450	
	00.00	27.353	-		927.696	680	
16	08.00	27.358	5	1,67	927.777	810	730,00
	16.00	27.358	-		927.846	690	
	00.00	27.358	-		927.915	690	
17	08.00	27.358	-	12,67	927.998	830	896,67
	16.00	27.396	38		928.098	1.000	
	00.00	27.396	-		928.184	860	
18	08.00	27.396	-	0,00	928.282	980	846,67
	16.00	27.396	-		928.344	620	
	00.00	27.396	-		928.438	940	
19	08.00	27.396	-	0,00	928.532	940	700,00
	16.00	27.396	-		928.589	570	
	00.00	27.396	-		928.648	590	
20	08.00	27.396	-	0,00	928.726	780	700,00
	16.00	27.396	-		928.801	750	
	00.00	27.396	-		928.858	570	
21	08.00	27.396	-	0,00	928.920	620	593,33
	16.00	27.396	-		928.981	610	
	00.00	27.396	-		929.036	550	
22	08.00	27.396	-	0,00	929.109	730	730,00
	16.00	27.396	-		929.188	790	
	00.00	27.396	-		929.255	670	
23	08.00	27.396	-	29,67	929.327	720	776,67
	16.00	27.485	89		929.411	840	
	00.00	27.485	-		929.488	770	

Maret 2012	Pengukuran pada pukul	Drain pool NE			Drain pool NEX		
		Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Debit harian rata-rata (m ³ /h)	Volume (m ³)	Debit (m ³ /h)	Debit harian rata-rata (m ³ /h)
24	08.00	27.485	-	6,00	929.556	680	663,33
	16.00	27.503	18		929.634	780	
	00.00	27.503	-		929.687	530	
25	08.00	27.503	-	0,00	929.748	610	583,33
	16.00	27.503	-		929.844	960	
	00.00	27.503	-		929.862	180	
26	08.00	27.503	-	7,33	929.916	540	530,00
	16.00	27.503	-		929.974	580	
	00.00	27.525	22		930.021	470	
27	08.00	27.541	16	64,67	930.072	510	456,67
	16.00	27.541	-		930.122	500	
	00.00	27.719	178		930.158	360	
28	08.00	27.719	-	0,00	930.210	520	563,33
	16.00	27.719	-		930.284	740	
	00.00	27.719	-		930.327	430	
29	08.00	27.719	-	0,00	930.379	520	496,67
	16.00	27.719	-		930.418	390	
	00.00	27.719	-		930.476	580	
30	08.00	27.719	-	29,67	930.537	610	693,33
	16.00	27.808	89		930.627	900	
	00.00	27.808	-		930.684	570	
31	08.00	27.808	-	0,00	930.740	560	616,67
	16.00	27.808	-		930.821	810	
	00.00	27.808	-		930.869	480	

Sumber : Departement *Utility* PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto

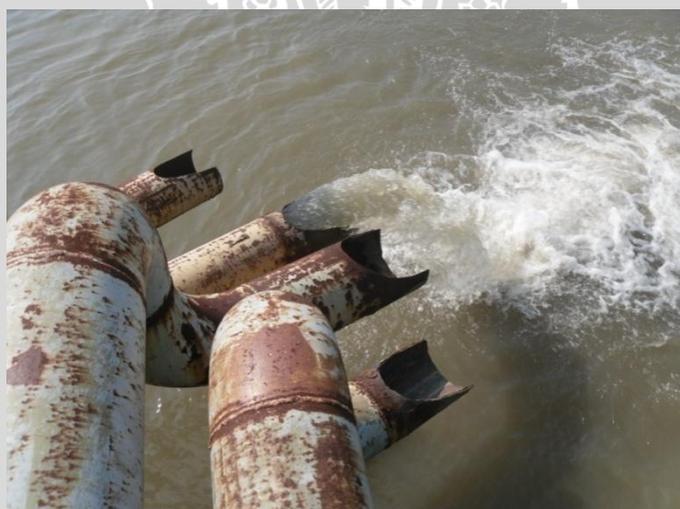
Untuk mendukung pengoperasian PLTMH secara terus menerus maka perancangan PLTMH ini dititikberatkan pada pipa pembuangan yang selalu aktif yaitu pipa pembuangan milik Ajinex, sehingga diperoleh debit harian rata-rata pada bulan Maret 2012 :

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\Sigma \text{debit harian rata-rata}}{\Sigma \text{hari}} = \frac{20.140}{31} = 649,6774 \text{ m}^3/\text{h} \\
 &= 649,6774 \text{ m}^3/\text{h} = 0,1805 \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

Lampiran 2. Foto Potensi Air Buangan PT. Ajinomoto Factory Mojokerto



Pipa Pembuangan dari *Drain Pool* ke Sungai Brantas



Air dari Pipa Pembuangan ke Sungai Brantas

**Lampiran 3. Foto Pengambilan Data Potensi Air Buangan di PT. Ajinomoto
Factory Mojokerto**



Pengukuran Ketinggian Pipa Pembuangan dari Permukaan Air ke Bagian Bawah Pipa



Pengukuran Ketinggian Pipa Pembuangan Apabila Dilakukan Pemotongan
Lengkungan Pipa



Kawasan *Drain Pool* di PT. Ajinomoto *Factory* Mojokerto



Flowmeter Pengukur Debit Air Buangan PT. Ajinomoto Factory Mojokerto



Flowmeter Pengukur Debit Air Buangan PT. Ajinex International di Mojokerto



Pengecekan Volume Air dan Debit Air Buangan pada Flowmeter

Lampiran 4. Parameter Motor Induksi Satu Fasa 1 HP

Data hasil pengukuran parameter motor induksi satu fasa 1 HP. 110/220 V.

1430 rpm. 50 Hz.

1. Hasil pengukuran resistansi kumparan utama $U_1 - U_2$.

$$R_1 = 3 \Omega$$

$$L_1 = 34,84 \text{ mH} \rightarrow \text{pengetesan induktansi pada frekuensi 1 Hz.}$$

2. Hasil pengukuran parameter motor induksi satu fasa dengan kondisi tanpa beban

Tabel L-3.1 Hasil pengukuran parameter motor induksi kondisi tanpa beban

V_{tb} (volt)	I_{tb} (ampere)	P_{tb} (watt)
220	5,75	287,5

$$R_{tb} = \frac{P_{tb}}{I_{tb}^2} = \frac{287,5}{(5,75)^2} = 8,69 \Omega$$

$$Z_{tb} = \frac{V_{tb}}{I_{tb}} = \frac{220}{5,75} = 38,26 \Omega$$

$$X_{tb} = \sqrt{(Z_{tb})^2 - (R_{tb})^2} = \sqrt{(38,26)^2 - (8,69)^2} = 37,26 \Omega$$

3. Hasil pengukuran parameter motor induksi satu fasa dengan kondisi rotor ditahan

Tabel L-3.2 Hasil pengukuran parameter motor induksi kondisi rotor ditahan

V_{br} (volt)	I_{br} (ampere)	P_{br} (watt)
82	7,3	375

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{I_{br}^2} = \frac{375}{(7,3)^2} = 7,04 \Omega$$

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}} = \frac{82}{7,3} = 11,23 \Omega$$

$$X_{br} = \sqrt{(Z_{br})^2 - (R_{br})^2} = \sqrt{(11,23)^2 - (7,04)^2} = 8,75 \Omega$$

Mesin desain kelas B. sehingga :

$$X_{br} = X_1 + X_2'$$

$$X_1 = 0,4 X_{br} = 0,4 \times 8,75 = 3,5 \Omega$$

$$X_2' = 0,6 X_{br} = 0,6 \times 8,75 = 5,25 \Omega$$

$$R_1 = 3 \Omega$$

$$R_2 = R_{br} - R_1 = 7,04 - 3 = 4,04 \Omega$$

$$X_m = X_{tb} - X_1 = 37,26 - 3 = 34,26 \Omega$$



Lampiran 5. Merk dan Tipe Peralatan Untuk Pengujian

1. Motor induksi satu fasa dengan tipe JY2A-4; daya 1 HP; tegangan 110/220 volt; arus 14,6 / 7,3 ampere; frekuensi 50 Hz; putaran 1430 rpm dengan kelas isolasi B.
2. Mesin penggerak berupa motor DC penguat terpisah, merk AEG; tipe Gf 130/170; daya 5 kW; 220 V; 22,7 A; 1500 rpm; tegangan medan 220 V; arus medan 0,71 A.
3. Regulator fasa tiga yang dilengkapi dengan penyearah gelombang penuh fasa tiga merk AEG; 220 V; 11,3 A.
4. Voltmeter DC merk AEG dengan tipe CLU.
5. Voltmeter DC merk Kaise Electric dengan model SK-5000G.
6. Amperemeter DC merk Kaise Electric dengan model SK-5000E.
7. Voltmeter Panel AC merk HELES dengan rating tegangan > 300 V.
8. Clampmeter digital merk Dwyer dengan model CM-3.
9. Frekuensimeter merk AEG dengan tipe CLU.
10. Tachometer merk Fuji Kyogo.
11. Kapasitor dengan kapasitas $15 \mu\text{F} \pm 5\%$ AC merk Topcon 450 V~50/60 Hz Max temperatur 70°C .
12. Kapasitor dengan kapasitas $16 \mu\text{F} \pm 5\%$ AC merk ICAR Ecofill 400V Max Temperatur 85°C .

**Lampiran 6. Foto Pengujian Generator Induksi Satu Fasa di Laboratorium
Mesin Elektrik Teknik Elektro**



Bangku Kapasitor Generator Induksi Satu Fasa



Kopel Motor Induksi Satu Fasa Dengan Motor Penggerak



Pengujian Generator Induksi Satu Fasa di Laboratorium



Pengujian Generator Induksi Satu Fasa di Laboratorium



Pengujian Generator Induksi Satu Fasa di Laboratorium