PERANCANGAN SALURAN UDARA UNTUK SISTEM PENDINGINAN MOTOR LISTRIK PADA BUS LISTRIK MAB MD12-E DAN SIMULASI MENGGUNAKAN APLIKASI *CFD*

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Program Studi Teknik Mesin

Oleh

Zaenuri

NIM. 5212414004

TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2019

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Zaenuri

NIM : 5212414004

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Perancangan Saluran Udara untuk Sistem Pendinginan Motor Listrik pada Bus Listrik MAB MD-12E dan Simulasi Menggunakan Aplikasi *CFD*

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 29 September 2019

Dosen Pembimbing,

Dr. Ir. Rahmat Doni Widodo, S.T., M.T., IPP.

NIP. 197509272006041002

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul *Perancangan Saluran Udara untuk Sistem Pendinginan Motor Listrik pada Bus Listrik MAB MD-12E dan Simulasi Menggunakan Aplikasi CFD* telah dipertahankan di depan sidang panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal 2 - 9 - 2019

Oleh

Nama	: Zaenuri
NIM	: 5212414004
Program Studi	: Teknik Mesin

Panitia:

Ketua

Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Sekretaris

Samsudin Anis, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197601012003121002

Penguji 1

Dr. Wirawan Sumbodo, M.T.
NIP. 196601051990021002

Penguji 2

Dr. M. Burhan Rubai W., M.Pd.
NIP. 196302131988031001

Pembimbing

Dr. Ir. Rahmat Doni W., S.T., M.T., IPP.
NIP. 197509272006041002

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik UNNES

Dr. Nur Qudus, M.T., IPM.
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapat gelar akademik (sarjana), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 1 Oktober 2019

METERAI TEMPEL 6000 ENAM RIBU RUPIAH

Pembuat pernyataan,

Zaenuri

NIM. 5212414004

SARI

Zaenuri 2019. *Perancangan Saluran Udara untuk Sistem Pendinginan Motor Listrik pada Bus Listrik MAB MD-12E dan Simulasi Menggunakan Aplikasi CFD*. Dr. Ir. Rahmat Doni Widodo, S.T., M.T., IPP. Program Studi Teknik Mesin.

Pengaruh panas pada motor listrik di Bus Listrik MAB MD-12E merupakan suatu hal yang perlu diperhatikan, karena kurangnya sumber udara dalam mendinginkan motor listrik tersebut. Tujuan dalam penelitian ini adalah untuk membuat rancangan saluran udara dan mengetahui distribusi temperaturnya dalam upaya menghasilkan sumber udara yang lebih. Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

Simulasi sistem pendinginan motor listrik ini dilakukan secara komputasi dengan aplikasi C*FD (Computational Fluid Dynamics)*. Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi model, massa motor, panas spesifik, suhu awal dan akhir motor, sumber panas, suhu udara, kecepatan udara, *pressure* dan variabel terikat berupa distribusi temperatur pada motor listrik.

Hasil penelitian ini menunjukkan nilai maksimal temperatur paling rendah terjadi pada desain variasi 3 sebesar 68,4835 ^{o}C. Dapat disimpulkan bahwa adanya optimasi pada *body* dan dimensi sirip-sirip motor listrik mampu mendinginkan motor listrik dan dapat menghindari dari *overheating*.

Kata Kunci: pengaruh panas, motor listrik, CFD, temperatur

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi/TA yang berjudul "Perancangan Saluran Udara untuk Sistem Pendinginan Motor Listrik pada Bus Listrik MAB MD-12E dan Simulasi Menggunakan Aplikasi *CFD*". Skripsi/TA ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam disampaikan kepada Nabi Muhammad SAW, mudah-mudahan kita semua mendapatkan safaat Nya di yaumil akhir nanti, Amin.

Penyelesaian karya tulis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M.Hum, Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T., IPM. Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Rusiyanto, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.
4. Samsudin Anis, S.T., M.T., Ph.D., Ketua Program Studi Teknik Mesin S1 Universitas Negeri Semarang.

5. Dr. Ir. Rahmat Doni Widodo ST, MT. IPP., selaku Dosen Pembimbing yang penuh perhatian dan atas perkenaan memberi bimbingan dan dapat dihubungi sewaktu-waktu disertai kemudahan menunjukkan sumber-sumber yang relevan dengan penulisan karya ini.
6. Dr. Wirawan Sumbodo, M.T. dan Dr. M. Burhan Rubai W., M.Pd., selaku Dosen Penguji yang memberikan evaluasi serta masukan sehingga menambah bobot dari skripsi ini
7. Teman-teman Program Studi Teknik Mesin yang senantiasa memberikan penulis semangat dan motivasi.
8. Teman-teman magang di PT MAB yang saling memberikan dukungan
9. Berbagai pihak yang telah memberi bantuan untuk karya tulis ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berusaha memperbaiki penulisan skripsi ini yang masih terdapat banyak kekurangan karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran demi penyempurnaan penulisan selanjutnya.

Semarang, 30 September 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PERSETUJUAN PEMBIMBING ii
PENGESAHAN iii
PERNYATAAN KEASLIAN iv
SARI v
PRAKATA vi
DAFTAR ISI viii
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR LAMPIRAN xv
BAB I 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Identifkasi Masalah 3
1.3 Pembatasan Masalah 4
1.4 Rumusan Masalah 5
1.5 Tujuan 5
1.6 Manfaat 6
BAB II 7
KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 7
2.1 Kajian Pustaka 7
2.2 Landasan Teori 9
2.2.1 Motor Listrik 9
2.2.2 Perpindahan Panas 31
2.2.3 Sistem Pendinginan pada Motor Listrik 36
2.2.4 Material 41
2.2.5 Simulasi CFD *(Computational Fluid Dynamics)* 43
BAB III 46

METODE PENELITIAN 46
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan 48
3.1.1 Waktu Penelitian 48
3.1.2 Tempat Penelitian 48
3.2 Desain Penelitian 48
3.2.1 Alur Penelitian 51
3.2.2 Desain Variasi Saluran Udara 52
3.3 Alat dan Bahan Penelitian 57
3.3.1 Alat Penelitian 57
3.3.2 Bahan Penelitian 58
3.4 Parameter Penelitian 60
3.5 Teknik Pengumpulan Data 61
3.5.1 Persiapan Awal Objek 62
3.5.2 Pemodelan 3D dengan *Inventor* 64
3.5.3 *Export* Desain/Model dari *Inventor* ke *Software CFD* 65
3.5.4 Menentukan *Inlet* dan *Outlet* Model 65
3.5.5 Material 66
3.5.6 Penentuan Kondisi Batas 67
3.5.7 *Meshing* 68
3.5.8 *Solving* (Proses Pengujian) 69
3.5.9 Perbandingan Hasil Analisis 70
3.6 Kalibrasi Instrumen 71
3.7 Teknik Analisa Data 72
BAB IV 74
HASIL DAN PEMBAHASAN 74
4.1 Deskripsi Data 74
4.1.1 Laju Aliran Massa 74
4.1.2 Vector (Velocity) 74
4.1.3 Aliran Panas pada Motor Listrik 75
4.2 Analisis Data 76

4.2.1 Data Laju Aliran Massa 76
4.2.2 Data Vector (Velocity) 78
4.2.3 Data Aliran Panas pada Motor Listrik 89
4.3 Pembahasan 96
BAB V 99
PENUTUP 99
5.1 Kesimpulan 99
5.2 Saran 100
DAFTAR PUSTAKA 102

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Karakteristik Air dan Udara 37
Tabel 2. 2 Komposisi Kimia Al 6061-T6..... 42
Tabel 2. 3 Sifat-sifat Mekanik Al 6061-T6 42
Tabel 3. 1 Spesifikasi Umum Bus Listrik 47
Tabel 3. 2 Spesifikasi Umum Bus Listrik 47
Tabel 3. 3 Spesifikasi Elektrik Bus Listrik 47
Tabel 3. 4 Perbandingan Hasil Analisis 71
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Laju Aliran Massa 74
Tabel 4. 2 Nilai Kecepatan Sebelum dan Sesudah Melewati Konstruksi Body. 75
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Aliran Panas pada Motor Listrik 75
Tabel 4. 4 Laju Aliran Massa Desain Standar..... 77
Tabel 4. 5 Laju Aliran Massa Desain Variasi 1 77
Tabel 4. 6 Laju Aliran Massa Desain Variasi 2 78
Tabel 4. 7 Laju Aliran Massa Desain Variasi 3 78
Tabel 4. 8 Data Perbandingan Hasil Analisis..... 98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip Dasar dari Kerja Motor Listrik 10
Gambar 2. 2 Klasifikasi Jenis Utama Motor Listrik 12
Gambar 2. 3 Sebuah Motor DC..... 12
Gambar 2. 4 Karakteristik Motor DC *Shunt* 15
Gambar 2. 5 Karakteristik Motor Seri DC 16
Gambar 2. 6 Karakteristik Motor Kompon DC 17
Gambar 2. 7 Motor Sinkron 19
Gambar 2. 8 Motor Induksi 21
Gambar 2. 9 Grafik *Torque*-Kecepatan Motor Induksi AC 3-Fase 23
Gambar 2. 10 Klasifikasi Mesin Listrik PM 27
Gambar 2. 11 Tipe Rotor PMSM 28
Gambar 2. 12 PMSM dengan 2 Kutub 29
Gambar 2. 13 Prinsip Kerja 29
Gambar 2. 14 Motor Listrik dengan Jenis Pendingin Air 38
Gambar 2. 15 Motor Listrik dengan Jenis Pendingin Udara 40
Gambar 2. 16 Tahapan Simulasi pada CFD 45
Gambar 3. 1 Body Bus Listrik MD12-E 46
Gambar 3. 2 Aliran Udara pada Desain Konstruksi Lama 49
Gambar 3. 3 Gambaran Umum Desain Baru 50
Gambar 3. 4 Optimasi Dimensi Sirip pada Motor Listik 50
Gambar 3. 5 Diagram Alir Tahapan Penelitian 51
Gambar 3. 6 Area yang Dijadikan Desain 52
Gambar 3. 7 Wind Tunnel dengan Obyek Simulasi 53
Gambar 3. 8 Desain Standar 53
Gambar 3. 9 Desain Standar untuk Simulasi 54
Gambar 3. 10 Desain Variasi 1 54
Gambar 3. 11 Desain Variasi 1 untuk Simulasi 55

Gambar 3. 12 Desain Variasi 2 55
Gambar 3. 13 Desain Variasi 2 untuk Simulasi 56
Gambar 3. 14 Desain Variasi 3 56
Gambar 3. 15 Desain Variasi 3 untuk Simulasi 57
Gambar 3. 16 Geometri Motor Aktual 58
Gambar 3. 17 Konstruksi Chasis MD12-E 59
Gambar 3. 18 Pengukuran Sirip dan Dimensi Motor Listrik 62
Gambar 3. 19 Penempatan High Voltage dan Mechanical pada Chasis 62
Gambar 3. 20 Posisi Motor Listrik dan Sekitarnya di MD 12-E 63
Gambar 3. 21 Pemodelan 3D dengan Inventor 64
Gambar 3. 22 Membuka Software CFD 2019 65
Gambar 3. 23 Export Desain/Model 65
Gambar 3. 24 Geometry Tools Untuk Mengaktifkan Bagian Desain 66
Gambar 3. 25 Tampilan Penentuan Material Obyek pada CFD 66
Gambar 3. 26 Tampilan Menu Materials 67
Gambar 3. 27 Input Kondisi Batas 67
Gambar 3. 28 Tampilan Boundary Conditions pada Inlet 68
Gambar 3. 29 Tampilan Boundary Conditions pada Outlet 68
Gambar 3. 30 Meshing 3D Model pada CFD 69
Gambar 3. 31 Tampilan Solving 70
Gambar 3. 32 Running Program pada CFD 70
Gambar 3. 33 Kalibrasi Software Inventor 72
Gambar 3. 34 Kalibrasi *Software CFD* 72
Gambar 4. 1 Nilai Laju Aliran Massa pada Tiap Desain 76
Gambar 4. 2 Nilai Kecepatan Sebelum dan Sesudah Melewati Konstruksi Body 79
Gambar 4. 3 Aliran Fluida pada Desain Standar (Perspektif Atas) 80
Gambar 4. 4 Aliran Fluida pada Desain Standar (Bawah) 80
Gambar 4. 5 Nilai Kecepatan Sebelum Melewati Kontruksi pada Desain Standar 81

Gambar 4. 6 Nilai Kecepatan Setelah Melewati Kontruksi pada Desain Standar 81
Gambar 4. 7 Aliran Fluida pada Desain Variasi 1 (Perspektif Atas) 82
Gambar 4. 8 Aliran Fluida pada Desain Variasi 1 (Bawah) 82
Gambar 4. 9 Nilai Kecepatan Sebelum Melewati Kontruksi pada Desain Variasi 1 .. 83
Gambar 4. 10 Nilai Kecepatan Setelah Melewati Kontruksi pada Desain Variasi 1 .. 83
Gambar 4. 11 Aliran Fluida pada Desain Variasi 2 (Perspektif Atas) 84
Gambar 4. 12 Aliran Fluida pada Desain Variasi 2 (Bawah) 85
Gambar 4. 13 Nilai Kecepatan Sebelum Melewati Kontruksi pada Desain Variasi 2 86
Gambar 4. 14 Nilai Kecepatan Setelah Melewati Kontruksi pada Desain Variasi 2 .. 86
Gambar 4. 15 Aliran Fluida pada Desain Variasi 3 (Perspektif Atas) 87
Gambar 4. 16 Aliran Fluida pada Desain Variasi 3 (Bawah) 87
Gambar 4. 17 Nilai Kecepatan Sebelum Melewati Kontruksi pada Desain Variasi 3 88
Gambar 4. 18 Nilai Kecepatan Setelah Melewati Kontruksi pada Desain Variasi 3 .. 88
Gambar 4. 19 Hasil Pengujian Temperatur pada Motor Listrik..... 89
Gambar 4. 20 Perpindahan Panas pada Motor Listrik Desain Standar 90
Gambar 4. 21 Temperatur Motor Listrik pada Desain Standar..... 91
Gambar 4. 22 Perpindahan Panas pada Motor Listrik Desain Variasi 1..... 92
Gambar 4. 23 Temperatur Motor Listrik pada Desain Variasi 1 92
Gambar 4. 24 Perpindahan Panas pada Motor Listrik Desain Variasi 2..... 93
Gambar 4. 25 Temperatur Motor Listrik pada Desain Variasi 2 94
Gambar 4. 26 Perpindahan Panas pada Motor Listrik Desain Variasi 3..... 95
Gambar 4. 27 Temperatur Motor Listrik pada Desain Variasi 3 96

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Usulan Pembimbing 104
Lampiran 2. SK Pembimbing..... 105
Lampiran 3. Persetujuan Seminar Proposal 106
Lampiran 4. Surat Tugas Seminar Proposal Skripsi 107
Lampiran 5.Undangan Seminar Proposal Skripsi 108
Lampiran 6. Presensi Seminar Proposal Skripsi 109
Lampiran 7. Surat Tugas Panitia Ujian Sarjana 110
Lampiran 8. Sertfikat Magang di PT MAB 111
Lampiran 9. Sertifikat Pelatihan Autodesk Inventor di PT MAB..... 112

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global adalah suatu fenomena global yang ditandai dengan kenaikan suhu rata-rata di bumi yang disebabkan oleh peningkatan emisi gas buang. Emisi gas buang ini merupakan hasil pembakaran bahan bakar fosil. Salah satu bidang yang banyak menghasilkan emisi gas buang adalah bidang transportasi. Peningkatan jumlah transportasi ini telah terjadi dan dapat kita amati di Indonesia. Sehingga peningkatan jumlah kendaraan ini tidak dapat dihindari, maka dari itu harus dilakukan penghematan bahan bakar untuk menekan emisi gas buang.

Berbagai usaha untuk membantu menekan emisi gas buang telah dilakukan. Mulai dari memperbanyak angkutan masal, produksi LCGC, kendaraan *hybrid*, maupun kendaraan listrik. Namun yang dirasa paling berpengaruh untuk dapat mengurangi polusi udara adalah kendaraan angkutan umum berupa bus dengan berjenis listrik, karena kendaraan tersebut sama sekali tidak mengeluarkan polusi udara atau *nol emission*. Salah satu bagian yang paling penting pada bus listrik yaitu motor listrik. Motor listrik inilah yang menjadi sumber penggerak bus listrik tersebut. Karena kinerja motor listrik adalah mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (gerak).

Pengaruh panas pada motor listrik merupakan suatu hal yang perlu diperhatikan dalam proses *maintenance*. Sehingga pendinginan dalam suatu motor listrik merupakan hal penting karena bagus atau tidaknya suatu pendinginan suatu motor listrik menentukan umur dari motor listrik itu sendiri. Salah satu upaya dalam mempertahankan umur pakai suatu motor adalah menghindari panas berlebihan *(overheating)*. Ada 5 sebab terjadinya *overheating* yaitu beban berlebih, kondisi *power supply* tidak normal, *high effective servise* motor, terlalu sering di-*start* dan di-*stop*, dan kondisi lingkungan/ruang. Permasalahan yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah kondisi lingkungan/ruang. Dalam kondisi lingkungan, motor yang beroperasi pada temperatur tinggi menyebabkan timbulnya panas yang melebihi. Juga ruang tertutup yang tidak ada ventilasi, radiasi panas dari mesin lain, ruang terbuka yang sangat tinggi suhunya ketika seharian terik matahari, ruang yang sangat kotor/berdebu, dan kondisi-kondisi upnormal lainnya. Kotoran maupun buntuan-buntuan pada sistem pendinginan besar pengaruhnya terhadap sifat pendingin motor itu sendiri dan ujung-ujung juga panas.

Dalam penelitian ini yang dilakukan adalah mensimulasikan rancangan saluran udara untuk sistem pendinginan motor PMSM *(Permanent Magnetic Synchronous Motor)* atau bisa disebut motor AC yang digunakan pada Bus Listrik MAB (Mobil Anak Bangsa). Adanya rancangan tersebut dengan tujuan memberikan ruang lebih untuk masuknya udara pendinginan. Motor PMSM merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa. *Synchronous* berarti medan magnet yang dibangkitkan oleh stator dan medan magnet yang dibangkitkan oleh rotor berputar pada frekuensi yang

sama. Pada pengujian yang pernah dilakukan dengan kondisi kendaraan berjalan dari Jakarta ke Merak sekitar 2 jam didapatkan temperatur motor listrik mencapai suhu 114 ^{o}C yang ditunjukkan pada panel *instrument*, yang seharusnya suhu maksimal adalah 90 ^{o}C. Salah satu faktor yang mempengaruhi hal tersebut adalah konstruksi Bus listrik MAB dengan jenis *low deck entry* yang belum memaksimalkan ruang pendinginan untuk penempatan motor listrik. Bus listrik tersebut merupakan *prototype* kedua yang dikembangkan oleh PT MAB. Karena masih dalam tahap pengembangan untuk mendapatkan produk bus dengan kinerja dan *maintenance* yang lebih efisien, sehingga sangat perlu untuk melakukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut.

Pengembangan atau modifikasi perlu dilakukan untuk menemukan aliran udara yang terbaik sehingga temperatur motor dapat stabil dan terhindar dari *overheating*. Sistem pendingin yang disimulasikan adalah dengan menggunakan media pendingin udara, dengan sumber panas dari motor tersebut. Analisa pendinginan pada motor menjadi suatu hal yang penting dalam proses perancangan sebuah kinerja motor yang optimal dari sisi desain dan dari sisi pendinginannya. Simulasi sistem pendinginan motor listrik ini dilakukan dengan aplikasi *Computational Fluid Dynamics*.

1.2 Identifkasi Masalah

Berdasarkan uraian di atas, identifikasi masalah yang bisa diterapkan pada penelitian ini adalah kurangnya kuantitas sumber udara untuk pendinginan, sehingga dapat menyebabkan tingginya suhu *(overheating)* pada permukaan motor listrik.

Penulis mencoba variasi untuk menurunkan suhu pada ruang pendinginan dengan cara mendesain saluran udara agar sumber udara bisa terdistribusi secara maksimal ke motor listrik. Sehingga dapat memaksimalkan pendinginan yang lebih efisien untuk meningkatkan kinerja motor. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam mendesain saluran udara tersebut diantaranya adalah fungsi desain produk, standar dan spesifikasi desain (sambungan-sambungan, bentuk, ukuran, bahan, warna), tanggungjawab produk, dan harga.

1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Obyek penelitian adalah motor listrik dari bus listrik MAB MD12-E *(Prototype 2)*
2. Data spesifikasi diperoleh dari studi literatur melalui beberapa jurnal dan buku, serta studi kasus melalui survei atau pengamatan secara langsung pada bus listrik MAB MD12-E
3. Desain rancangan menggunakan bantuan *software INVENTOR*
4. Rancangan bukan dalam bentuk alat jadi, melainkan berupa desain 3D
5. Motor akan disimulasikan tanpa ada faktor getaran
6. Disimulasikan menggunakan sumber udara sekitar secara terbuka dengan bantuan desain 3D *wind tunnel*
7. Parameter yang akan diteliti adalah distribusi temperatur dengan menggunakan aplikasi *CFD*

8. Proses analisis hanya pada permukaan luar pada motor
9. Variasi pengujian menggunakan desain standar (lama) dan desain baru
10. Tidak menghitung biaya produksi

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah dipaparkan, maka diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan saluran udara supaya dapat menghasilkan sumber udara yang lebih untuk mendinginkan motor listrik dengan menyesuaikan konstruksi bus jenis *low deck*?
2. Bagaimana distribusi temperatur yang terjadi dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* untuk memastikan rancangan saluran udara dapat menghasilkan sumber udara yang lebih?

1.5 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui rancangan saluran udara supaya dapat menghasilkan sumber udara yang lebih untuk mendinginkan motor listrik dengan menyesuaikan konstruksi bus jenis *low deck*
2. Untuk mengetahui distribusi temperatur yang terjadi dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* untuk memastikan rancangan saluran udara dapat menghasilkan sumber udara yang lebih

1.6 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Secara umum dapat mengembangkan ilmu pengetahuan, terutama dalam bidang komputasi pemodelan alat penukar kalor
2. Dapat membuktikan bahwa pendinginan motor listrik masih dapat dioptimasi melalui pemodelan *Computational Fluid Dynamics*
3. Bagi PT MAB (Mobil Anak Bangsa), dapat dijadikan sebagai referensi, data pembanding, dan pertimbangan dalam merancang dan mengembangkan sistem pendinginan motor listrik untuk produk yang akan datang.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian mengenai pendinginan motor listrik sudah dilakukan sebelumnya oleh Kim, *et al* (2008) yaitu meggunakan pendingin udara untuk motor DC *brushless* dengan meningkatkan efisiensi pendinginan dengan optimalisasi optimal pada *coolent path*. Sebuah studi komputasi dari motor DC *brushless* yang disajikan untuk menentukan karakteristik aliran-panas dalam gulungan dan bantalan di bawah pengaruh panas yang dihasilkan. Tingkat *inflow* yang diprediksi lebih tinggi pada *inlet* depan dari pada di *inlet* belakang karena distribusi tekanan yang tidak seragam. Berdasarkan hasil ini, parameter desain untuk lokasi *inlet* dan geometri, serta untuk geometri alur bantalan, ditentukan dan dioptimalkan untuk meningkatkan kinerja pendinginan hingga 24%.

Penelitian serupa juga sudah dilakukan oleh Chang, *et al* (2009) yaitu melakukan penelitian secara eksperimen dan numerik menginvestigasi kinerja pendinginan motor. Motor terdiri dari kipas sentrifugal, dua kipas aksial, poros, stator, rotor dan penukar panas dengan 637 tabung pendingin. Laju peningkatan laju aliran (PQ) dari kipas pendingin pada 1800 rpm diuji menggunakan alat uji yang memenuhi Standar Nasional China 2726. Dibandingkan dengan pengukuran eksperimental, hasil analisis numerik menunjukkan bahwa kinerja PQ kurva dari

kipas aksial dan kipas sentrifugal dapat diperkirakan sekitar 2% dan 6%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa suhu terhitung dari gulungan stator dekat kipas aksial lebih rendah sekitar 5% dari nilai yang terukur, dan suhu terhitung dari inti stator yang terletak di pusat stator adalah sekitar 1% lebih tinggi dari nilai yang diukur.

Penelitian juga sudah dilakukan oleh Lee, *et al* (2015) yaitu melakukan studi yang menyajikan motor magnet permanen (IPM) yang menggunakan metode pendinginan paksa dengan menyediakan saluran untuk pendinginan perumahan dan poros berongga untuk pendinginan rotor yang diperkenalkan dalam penelitian ini. Pendingin bersirkulasi di seluruh motor dari rumah ke rotor melalui jalur pendingin yang diusulkan. Jalur meliputi perumahan atas, jaket perumahan, rumah yang lebih rendah, dan poros berongga. Sistem yang dirancang dapat meningkatkan daya motor karena kecepatan motor yang tinggi dapat dicapai dengan efek pendinginan yang unggul oleh motor PHT dibandingkan dengan motor pendingin konvensional.

Penelitian mengenai proses pendinginan motor listrik juga sudah dilakukan oleh Davin, *et al* (2014) melakukan penelitian yang berfokus pada penggunaan minyak pelumas sebagai pendingin untuk motor listrik. Minyak disalurkan di setiap sisi mesin uji 40 kW untuk secara langsung mendinginkan kumparan akhir stator. Pengaruh laju aliran minyak, suhu minyak dan kecepatan rotasi telah diteliti ($40\ L/jam < Qv < 360\ L/jam$, $50\ °C < T_{minyak} < 75\ °C$, $0 < \omega < 4600$ rpm). Hasilnya menunjukkan ketergantungan yang kuat dari laju aliran pada kinerja pendinginan global, sedangkan efek kecepatan rotasi lebih kecil tetapi dapat mempengaruhi suhu lokal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Motor Listrik

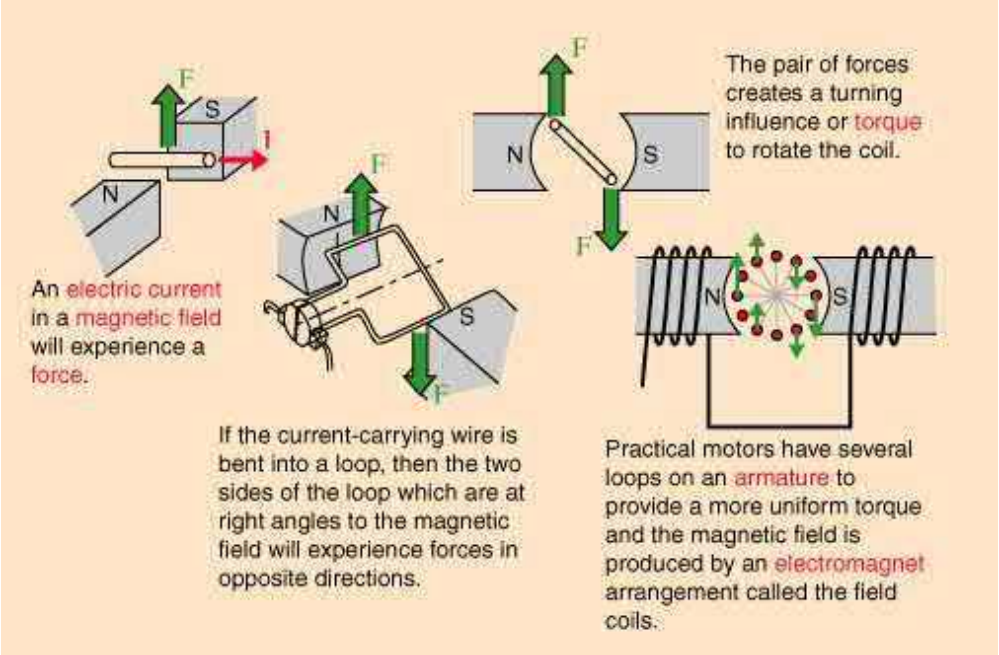
Menurut Bagia dan Parsa (2018:1) menyatakan pengertian motor listrik dan prinsip kerja motor listrik sebagai berikut:

> Motor listrik termasuk ke dalam kategori mesin listrik dinamis dan merupakan sebuah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Pada motor listrik tenaga listrik dirubah menjadi tenaga mekanik. Perubahan ini dilakukan dengan merubah tenaga listrik menjadi magnet yang disebut sebagai elektromagnet. Sebagaimana kita ketahui bahwa kutub-kutub dari magnet yang senama akan tolak-menolak dan kutub-kutub tidak senama akan tarik-menarik. Maka kita dapat memperoleh gerakan jika kita menempatkan sebuah magnet pada sebuah poros yang dapat berputar dan magnet yang lain pada suatu kedudukan.

Energi mekanik ini digunakan untuk keperluan di dunia industri dan rumah tangga. Untuk keperluan di industri misalnya, memutar *impeller* pompa, *fan* atau *blower*, menggerakan kompresor, mengangkat bahan, dan lain-lain. Sedangkan untuk keperluan di rumah tangga misalnya *mixer*, bor listrik, *fan* angin dan lain-lain. Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri.

Pada motor listrik mempunyai dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator. Rotor dibuat dari magnet tetap dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub magnet, utara (N) atau selatan (S). Material magnet yang bagus sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang bagus. Biasanya magnet *ferrit* yang dipakai untuk membuat magnet tetap. Sedangkan Stator adalah bagian pada

motor yang diam/statis dimana fungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Stator suatu motor terdiri dari tumpukan baja laminasi dengan lilitan. Stator menyerupai motor induksi, tetapi lilitannya dibuat sedikit berbeda. Kebanyakan motor mempunyai tiga gulungan stator dihubungkan secara bintang. Masing-masing lilitan ini dibangun dengan banyak *coil* yang saling behubungan untuk membentuk suatu lilitan.



Gambar 2. 1 Prinsip Dasar dari Kerja Motor Listrik

Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor secara umum sama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1:

1. Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya

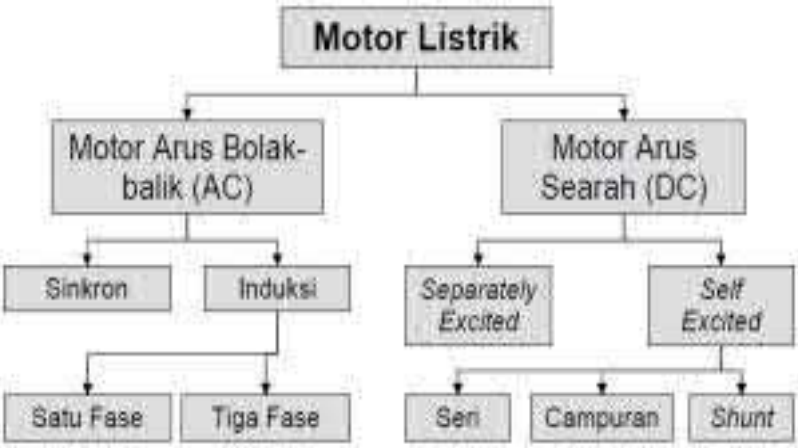
2. Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran/*loop*, maka kedua sisi *loop*, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan.
3. Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar/ *torque* untuk memutar kumparan.
4. Motor-motor memiliki beberapa *loop* pada dinamonya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan.

Dalam memahami sebuah motor, penting untuk mengerti apa yang dimaksud dengan beban motor. Beban mengacu kepada keluaran tenaga putar/torsi sesuai dengan kecepatan yang diperlukan. Beban umumnya dapat dikategorikan kedalam tiga kelompok:

1. Beban torsi konstan, adalah beban dimana permintaan keluaran energinya bervariasi dengan kecepatan operasinya, namun torsinya tidak bervariasi. Contoh beban dengan torsi konstan adalah *conveyors*, *rotary kilns*, dan pompa *displacement* konstan.
2. Beban dengan torsi variabel, adalah beban dengan torsi yang bervariasi dengan kecepatan operasi. Contoh beban dengan torsi variabel adalah pompa *sentrifugal* dan *fan* (torsi bervariasi sebagai kwadrat kecepatan).
3. Beban dengan energi konstan, adalah beban dengan permintaan torsi yang berubah dan berbanding terbalik dengan kecepatan. Contoh untuk beban dengan daya konstan adalah peralatan-peralatan mesin.

1. Jenis Motor Listrik

Bagian ini menjelaskan tentang dua jenis utama motor listrik yaitu motor DC dan motor AC. Motor tersebut diklasifikasikan berdasarkan pasokan *input*, konstruksi, dan mekanisme operasi, dan dijelaskan lebih lanjut dalam bagan pada Gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2. 2 Klasifikasi Jenis Utama Motor Listrik

A. Motor DC

Arus Searah Motor DC/arus searah, sebagaimana namanya, menggunakan arus langsung yang tidak langsung/*direct-unidirectional*. “Motor DC digunakan pada penggunaan khusus dimana diperlukan penyalaan torsi yang tinggi atau percepatan yang tetap untuk kisaran kecepatan yang luas” (UNEP.2006:3).

Gambar 2. 3 Sebuah Motor DC

Gambar 2.3 memperlihatkan sebuah motor DC yang memiliki tiga komponen utama, yaitu:

1) Kutub medan

   Secara sederhana digambarkan bahwa interaksi dua kutub magnet akan menyebabkan perputaran. “Motor DC memiliki 2 kutub medan magnet yaitu kutub utara dan kutub selatan yang stasioner dan dinamo yang menggerakkan *bearing* pada ruang di antara kutub medan” (Bagia dan Parsa, 2018: 4). Garis magnetik energi membesar melintasi bukaan diantara kutub-kutub dari utara ke selatan.

2) Dinamo

   Bila arus masuk menuju dinamo, maka arus ini akan menjadi elektromagnet. Dinamo yang berbentuk silinder, dihubungkan ke poros penggerak untuk menggerakan beban. Untuk kasus motor DC yang kecil, dinamo berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub-kutub, sampai kutub utara dan selatan magnet berganti lokasi. Jika hal ini terjadi, arusnya berbalik untuk merubah kutub-kutub utara dan selatan dinamo.

3) Kommutator

   Komponen ini terutama ditemukan dalam motor DC. Kegunaannya adalah untuk membalikkan arah arus listrik dalam dinamo. Kommutator juga membantu motor DC dalam hal transmisi arus antara dynamo dan sumber daya.

Keuntungan utama motor DC adalah kecepatannya mudah dikendalikan, tidak mempengaruhi kualitas pasokan daya, mudah untuk memahami perencanaan, dan mudah untuk mengontrol torsi. Sedangkan kekurangan dari motor DC ini adalah

mahal untuk menghasilkan, tidak bisa diandalkan kontrol pada kecepatan terendah, secara fisik lebih besar, dan tinggi pemeliharaan. Motor DC tersedia dalam banyak ukuran, namun penggunaannya pada umumnya dibatasi untuk beberapa penggunaan berkecepatan rendah, penggunaan daya rendah hingga sedang, sebab sering terjadi masalah dengan perubahan arah arus listrik mekanis pada ukuran yang lebih besar. Juga, motor tersebut dibatasi hanya untuk penggunaan di area yang bersih dan tidak berbahaya sebab resiko percikan api pada sikatnya.

Dalam kehidupan sehari-hari digunakan pada motor stator mobil, *tape recorder*, dan pada mainan anak-anak. Adapun dalam bidang industri dan pabrik digunakan pada traksi, *elevator*, *conveyer*, tram listrik, dan untuk menggerakkan mesin-mesin produksi di pabrik (Bagia dan Parsa, 2018:8).

Hubungan antara kecepatan, *flux* medan dan tegangan dinamo ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$E = K\Phi N \quad \text{.....2.1}$$

$$T = K\Phi Ia \quad \text{.....2.2}$$

dimana:

E = gaya elektromagnetik yang dikembangkan pada terminal dinamo (volt)

K = konstanta persamaan

Φ = *flux* medan yang berbanding lurus dengan arus medan

N = kecepatan dalam rpm (rotasi per menit)

T = torsi elektromagnetik

Ia = arus dinamo

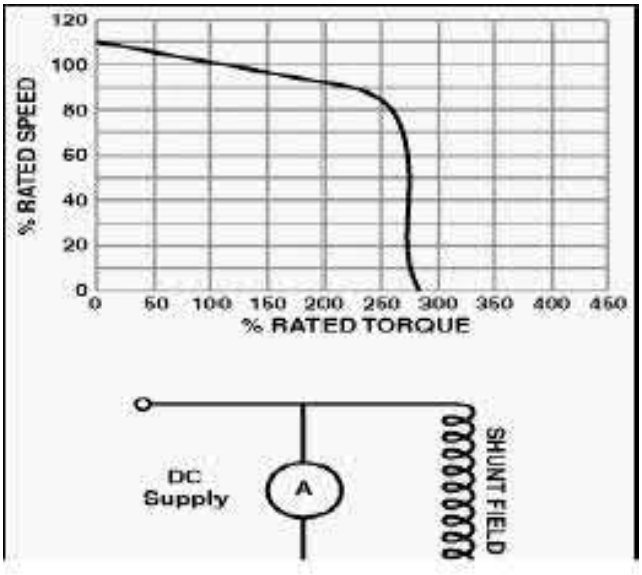
Jenis-Jenis Motor DC/Arus Searah:

1) Motor DC sumber daya terpisah/*Separately Excited*

Jika arus medan dipasok dari sumber terpisah maka disebut motor DC sumber daya terpisah/*separately excited*.

2) Motor DC sumber daya sendiri/*Self Excited*: motor *shunt*.

Pada motor *shunt*, gulungan medan (medan *shunt*) disambungkan secara paralel dengan gulungan dinamo (A) seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.4. Oleh karena itu total arus dalam jalur merupakan penjumlahan arus medan dan arus dinamo.



Gambar 2. 4 Karakteristik Motor DC *Shunt*

Berikut tentang kecepatan motor *shunt*:

a) Kecepatan pada prakteknya konstan tidak tergantung pada beban (hingga torsi tertentu setelah kecepatannya berkurang) dan oleh karena itu cocok untuk penggunaan komersial dengan beban awal yang rendah, seperti peralatan mesin.

b) Kecepatan dapat dikendalikan dengan cara memasang tahanan dalam susunan seri dengan dinamo (kecepatan berkurang) atau dengan memasang tahanan pada arus medan (kecepatan bertambah).

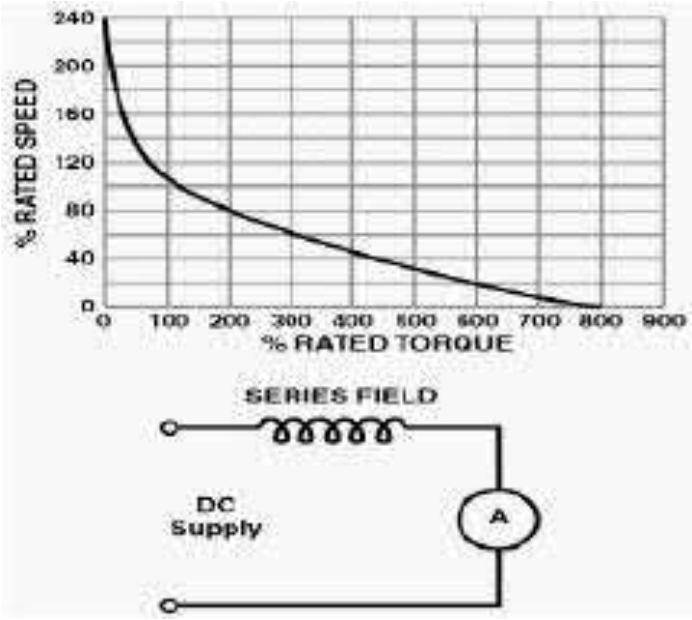
3) Motor DC daya sendiri: motor seri.

Dalam motor seri, gulungan medan (medan *shunt*) dihubungkan secara seri dengan gulungan dinamo (A). Oleh karena itu, arus medan sama dengan arus dinamo. Berikut tentang kecepatan motor seri:

a) Kecepatan dibatasi pada 5000 rpm.

b) Harus dihindarkan menjalankan motor seri tanpa ada beban sebab motor akan mempercepat tanpa terkendali.

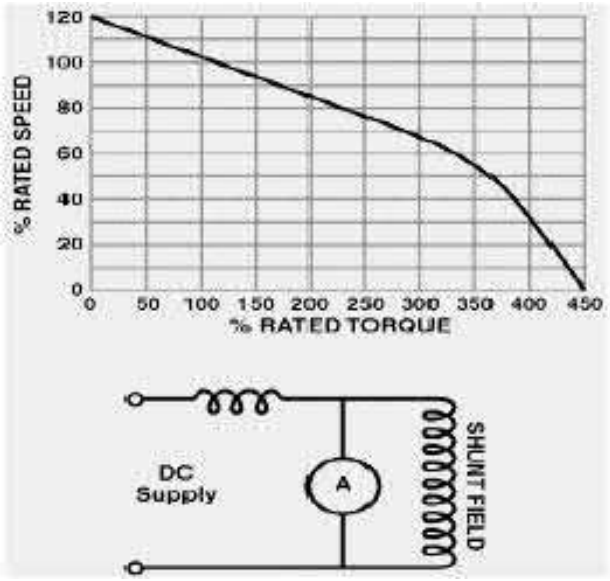
Motor-motor seri cocok untuk penggunaan yang memerlukan *torque* penyalaan awal yang tinggi, seperti derek dan alat pengangkat *hoist* pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Karakteristik Motor Seri DC

4) Motor DC Kompon/Gabungan.

Motor Kompon DC merupakan gabungan motor seri dan *shunt*. Pada motor kompon, gulungan medan (medan *shunt*) dihubungkan secara paralel dan seri dengan gulungan dinamo (A) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.6. Sehingga, motor kompon memiliki *torque* penyalaan awal yang bagus dan kecepatan yang stabil. Makin tinggi persentase penggabungan (yakni persentase gulungan medan yang dihubungkan secara seri), makin tinggi pula *torque* penyalaan awal yang dapat ditangani oleh motor ini. Contoh, penggabungan 40-50% menjadikan motor ini cocok untuk alat pengangkat *hoist* dan derek, sedangkan motor kompon yang standar (12%) tidak cocok.



Gambar 2. 6 Karakteristik Motor Kompon DC

B. Motor AC/Arus Bolak-balik

Motor AC/arus bolak-balik menggunakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor listrik AC memiliki dua

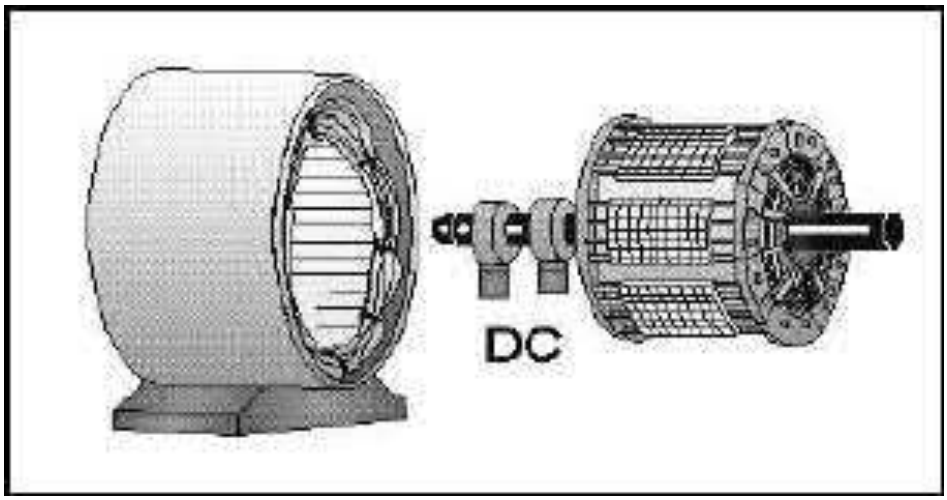
buah bagian dasar listrik yaitu "stator" dan "rotor". Stator merupakan komponen listrik statis. Rotor merupakan komponen listrik berputar untuk memutar as motor.

Penggunanan motor AC atau arus bolak-balik saat ini banyak digunakan di berbagai aplikasi. Salah satu penggunaan motor AC yang sering ditemui yaitu terdapat di perabotan rumah tangga berupa mesin cuci dan peralatan-perlatan yang sering dijumpai dalam rumah seperti kipas angin, AC, dan yang lainnya. Keuntungan utama AC induksi motor adalah sederhana dan kasar desain, murah, pemeliharaan rendah dan sambungan langsung ke sumber listrik AC. Motor induksi AC cukup murah (harganya setengah atau kurang dari harga sebuah motor DC) dan juga memberikan rasio daya terhadap berat yang cukup tinggi (sekitar dua kali motor DC). Sedangkan kekurangannya yaitu kecepatan dan *torque* kontrol memerlukan pemahaman yang lebih besar dari desain dan karakteristik motor tersebut (Bagia dan Parsa, 2018:28).

Jenis-Jenis Motor AC/Arus Bolak-Balik:

1) Motor sinkron

   Motor sinkron adalah motor AC yang bekerja pada kecepatan tetap pada sistem frekuensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki *torque* awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekuensi dan generator motor. Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistem, sehingga sering digunakan pada sistem yang menggunakan banyak listrik. Motor Sinkron dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Motor Sinkron

Komponen utama motor sinkron adalah:

a) Rotor

Perbedaan utama antara motor sinkron dengan motor induksi adalah bahwa rotor mesin sinkron berjalan pada kecepatan yang sama dengan perputaran medan magnet. Hal ini memungkinkan sebab medan magnet rotor tidak lagi terinduksi. Rotor memiliki magnet permanen atau arus DC-*excited*, yang dipaksa untuk mengunci pada posisi tertentu bila dihadapkan dengan medan magnet lainnya.

b) Stator

Stator menghasilkan medan magnet berputar yang sebanding dengan frekuensi yang dipasok.

Motor ini berputar pada kecepatan sinkron, yang diberikan oleh persamaan berikut (Parekh, 2003:2):

$$Ns = 120\ f / P \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2.3$$

dimana:

Ns = kecepatan sinkron stator medan magnet di rpm

f = frekuensi dari pasokan frekuensi

P = jumlah kutub

2) Motor induksi

Motor induksi merupakan motor yang paling umum digunakan pada berbagai peralatan industri. Popularitasnya karena rancangannya yang sederhana, murah dan mudah didapat, dan dapat langsung disambungkan ke sumber daya AC.

Komponen Motor induksi memiliki dua komponen listrik utama (Gambar 2.8):

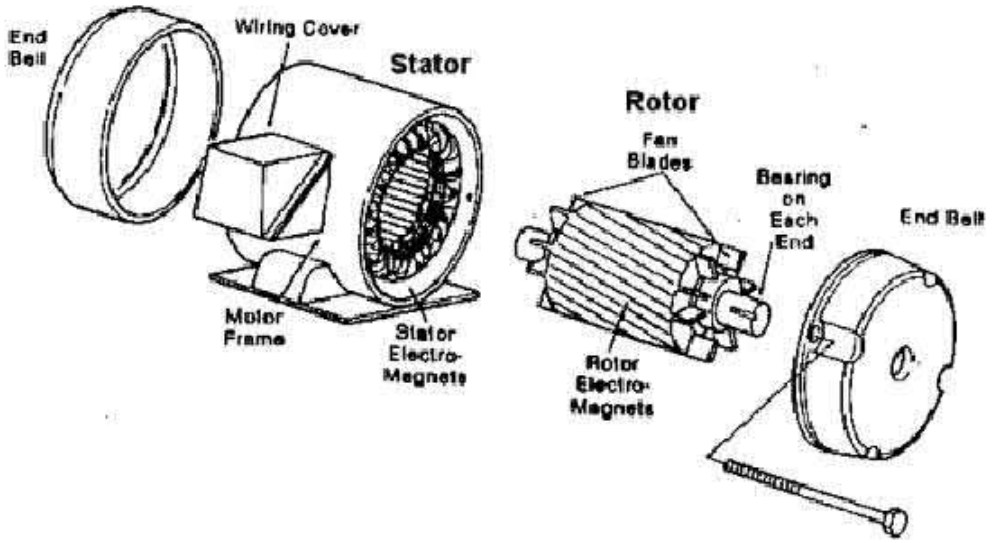
a) Rotor

Motor induksi menggunakan dua jenis rotor:

1. Rotor kandang tupai terdiri dari batang penghantar tebal yang dilekatkan dalam petak-petak *slots* paralel. Batang-batang tersebut diberi hubungan pendek pada kedua ujungnya dengan alat cincin hubungan pendek.
2. Lingkaran rotor yang memiliki gulungan tiga fase, lapisan ganda dan terdistribusi dibuat melingkar sebanyak kutub stator. Tiga fase digulungi kawat pada bagian dalamnya dan ujung yang lainnya dihubungkan ke cincin kecil yang dipasang pada batang as dengan sikat yang menempel padanya.

b) Stator

Stator dibuat dari sejumlah *stampings* dengan *slots* untuk membawa gulungan tiga fase. Gulungan ini dilingkarkan untuk sejumlah kutub yang tertentu. Gulungan diberi spasi geometri sebesar 120 derajat.



Gambar 2. 8 Motor Induksi

Klasifikasi motor induksi:

Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama (Parekh, 2003:3):

a) Motor induksi satu fase.

   Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fase, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti kipas angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.

b) Motor induksi tiga fase.

   Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fase yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang

tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai); dan penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, kompresor, *belt conveyor*, jaringan listrik, dan *grinder*. Tersedia dalam ukuran 1/3 hingga ratusan Hp.

Kecepatan motor induksi:

Motor induksi bekerja sebagai berikut, listrik dipasok ke stator yang akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini bergerak dengan kecepatan sinkron disekitar rotor. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar. Walaupun begitu, di dalam prakteknya motor tidak pernah bekerja pada kecepatan sinkron namun pada "kecepatan dasar" yang lebih rendah. Terjadinya perbedaan antara dua kecepatan tersebut disebabkan adanya "slip/geseran" yang meningkat dengan meningkatnya beban. Slip hanya terjadi pada motor induksi. Untuk menghindari slip dapat dipasang sebuah cincin geser/slip *ring*, dan motor tersebut dinamakan "motor cincin geser/slip *ring* motor".

Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung persentase slip/geseran (Parekh, 2003:2):

$$\% \text{ Slip} = (Ns - Nb)/Ns \times 100 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2.4$$

dimana:

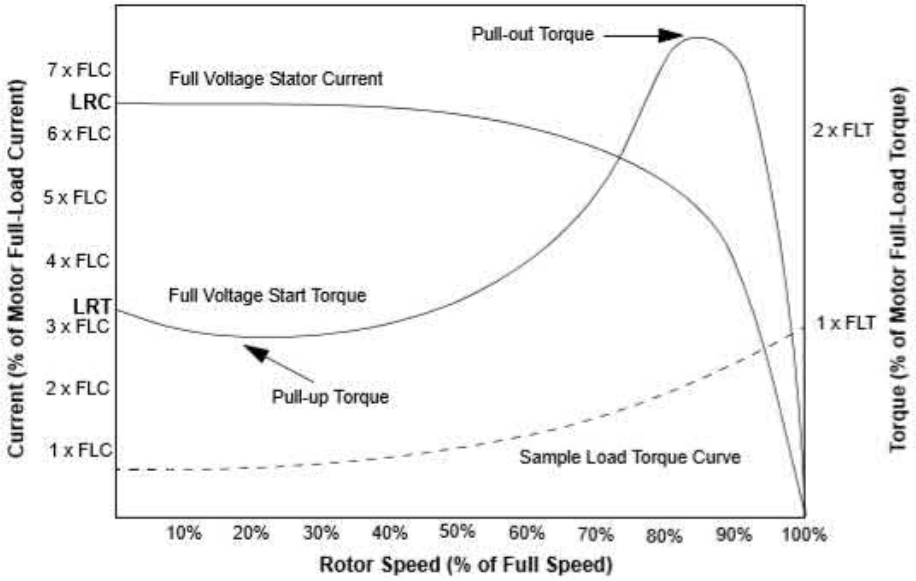
Ns = kecepatan sinkron dalam rpm

Nb = kecepatan dasar dalam rpm

Hubungan antara beban, kecepatan dan torsi:

Gambar 2.9 menunjukan grafik torsi vs kecepatan motor induksi AC tiga fase dengan arus yang sudah ditetapkan. Bila motor (Parekh, 2003:8):

a) Mulai menyala ternyata terdapat arus nyala awal yang tinggi dan torsi yang rendah ("*pull-up torque*").
b) Mencapai 80% kecepatan penuh, torsi berada pada tingkat tertinggi ("*pull-out torque*") dan arus mulai turun.
c) Pada kecepatan penuh, atau kecepatan sinkron, arus torsi dan stator turun ke nol.



Gambar 2. 9 Grafik *Torque*-Kecepatan Motor Induksi AC 3-Fase

2. Kerugian Panas pada Motor Listrik

A. Kerugian panas internal motor listrik

Pada dasarnya setiap motor listrik yang beroperasi cenderung mengeluarkan

panas. Panas ini timbul oleh karena adanya kerugian-kerugian daya yang dihasilkan motor listrik (Tua, S. *et l*, 2006:292). Kerugian ini antara lain:

1) Rugi-rugi inti yaitu energi yang diperlukan untuk memagnetisasikan beban inti (histerisis) dan kerugian-kerugian karena timbulnya arus listrik yang kecil yang mengalir pada inti.
2) Rugi-rugi tembaga yaitu rugi-rugi pemanasan (I^2R) pada lilitan stator karena arus listrik mengalir melalui penghantar kumparan dengan tahanan.
3) Kerugian beban liar yaitu akibat dari fluks bocor yang diinduksikan oleh arus beban bervariasi sebagai kuadrat arus beban.
4) Kerugian angin dan gesekan, kerugian ini diakibatkan oleh gesekan angin dan bantalan terhadap putaran motor.

B. Panas eksternal motor listrik

Dalam melakukan tugas operasinya motor listrik sebagai sumber tenaga mekanik untuk penggerak, haruslah dilindungi terhadap gangguan-gangguan eksternal yang dapat menimbulkan panas pada motor listrik saat beroperasi.

Gangguan-gangguan eksternal itu antara lain:

1) Gangguan mekanik, meliputi:
   a) Bantalan (*bearing*) yang sudah aus.
   b) Salah satu tegangan fasa terbuka akibat kontaktor yang rusak.
   c) Kumparan stator yang terhubung singkat.
2) Gangguan fisik sekeliling, meliputi:
   a) Terjadi kerusakan akibat terbentur sesuatu sehingga terjadi perubahan

fisik pada motor listrik.

b) Suhu kamar dimana motor listrik tersebut dioperasikan.

c) Pendinginan (kipas) motor yang tidak baik.

3) Gangguan dalam operasi dari sistem keseluruhan

a) Akibat pembebanan lebih

b) Akibat pengasutan motor listrik.

C. Kelas isolasi dan batas kenaikan suhu pada kumparan

Bila arus listrik (I) mengalir dalam rangkaian dengan tahanan (R) selama t detik, nilai kalorifik J (Joule) adalah:

$$J = I^2 . R . t \text{ (Joule)} \quad \ldots\ldots 2.5$$

Oleh karena itu, bila motor listrik dijalankan, suhu motor akan naik sebanding dengan waktu kerjanya sehingga jika motor beroperasi kenaikan suhunya dapat diketahui dengan mengukur tahanan kumparan sebelum dan sesudah dioperasikan selama beberapa jam dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{Rc}{Rh} = \frac{1+\alpha(t1)}{1+\alpha(t2)} \quad \ldots\ldots 2.6$$

dimana:

Rc = Tahanan kumparan sebelum dioperasikan (Ohm)

Rh = Tahanan kumparan sesudah dioperasikan (Ohm)

α = Koefisien temperatur tahanan dari tembaga 0,00428 Ohm/Ohm ˚C)

t1 = Temperatur ruang awal (˚C)

t2 = Temperatur setelah beroperasi (˚C)

D. Menghitung *Heat Generation* (Pembangkitan Panas)

Pembangkitan panas (watt) adalah salah satu bentuk konversi energi menjadi energi panas (energi panas) di dalam suatu padatan. Suhu padatan meningkat selama proses ini. 1 W (watt) merupakan satuan ukuran pembangkitan panas yang sama dengan atau hingga 1,00 J / s (Joule per detik). Untuk menghitung jumlah panas yang dilepaskan, gunakan persamaan:

$$Q = mc\,\Delta T \qquad (2.7)$$

dimana:

Q = Energi panas yang ditransfer (Joule, J),

m = Massa suatu zat (kg)

c = Panas spesifik (J / g · K)

ΔT = Perubahan suhu

3. *Permanent Magnet Synchronus Motor* (PMSM)

Permanent Magnet Synchronus Motor berkembang secara pesat untuk berbagai industri. Sebuah mesin listrik magnet permanen sinkron (PMSM) adalah mesin listrik berputar yang digunakan untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Pertama, energi listrik diubah dalam energi magnetik dan akhirnya energi magnetik diubah menjadi energi mekanik. Bahan yang paling umum digunakan untuk memproduksi rotor adalah magnet bumi *ferrit* dan langka. *"The ferrite is cheap and generates a weak magnetic flux while the rate earth magnets are expensive and generate a strong magnetic"* (PED 1034, 2010:2).

Kekuatan mekanik akan selalu lebih kecil dari pada daya listrik yang digunakan

oleh motor. Kekuatan dari PMSM didefinisikan sebagai:

$$P_m = \omega_m . T_e \quad \text{.....2.8}$$

dimana:

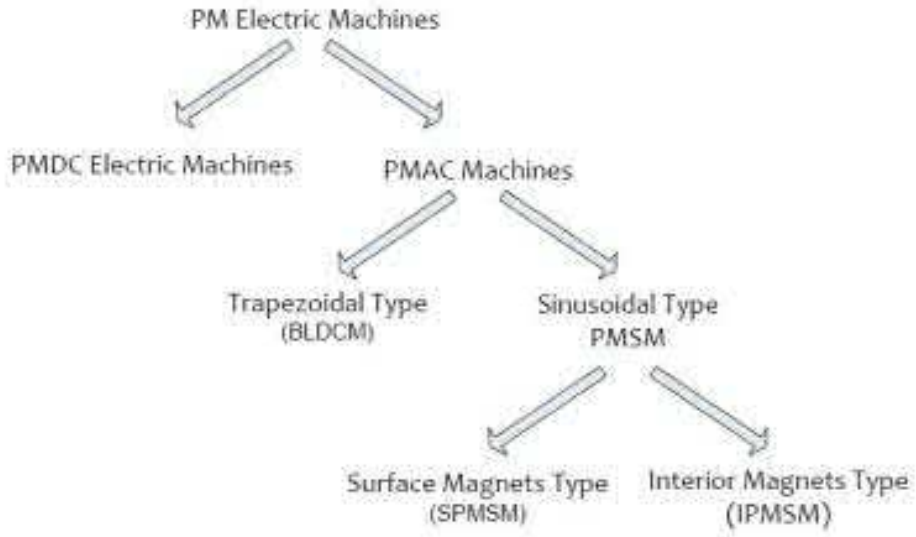
P_m = Tenaga mekanik yang dihasilkan oleh motor

ω_m = Kecepatan mekanik poros/rotor (rad/s)

T_e = Torsi yang dihasilkan (Nm)

A. Klasifikasi PM Motor

Klasifikasi Motor PM dapat dibagi menjadi dua kelompok: AC dan DC mesin. Satu-satunya perbedaan antara PMDC dan mesin DC konvensional adalah penggunaan permanen magnet di tempat gulungan medan.

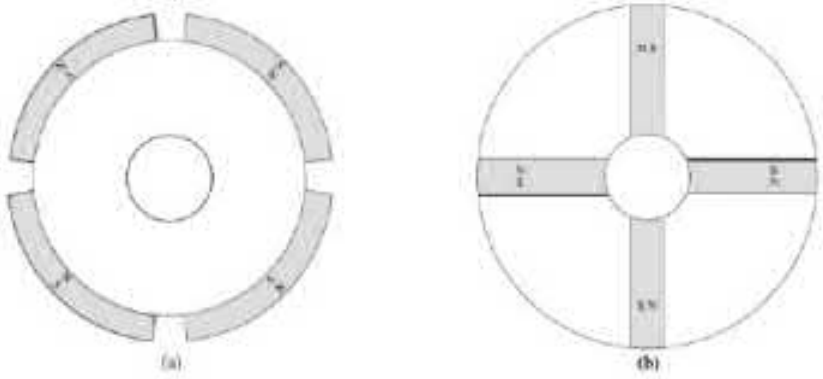


Gambar 2. 10 Klasifikasi Mesin Listrik PM

PMAC sangat sederhana karena komutator dan sikat tidak ada. Area tersebut dihasilkan oleh magnet yang ditempatkan di rotor. Mesin PMAC dikelompokkan

dalam tipe *trapezoidal* dan *sinusoidal*. Keduanya disebut seperti ini dalam fungsi gelombang tegangan EMF-balik yang diinduksi pada setiap fase stator.

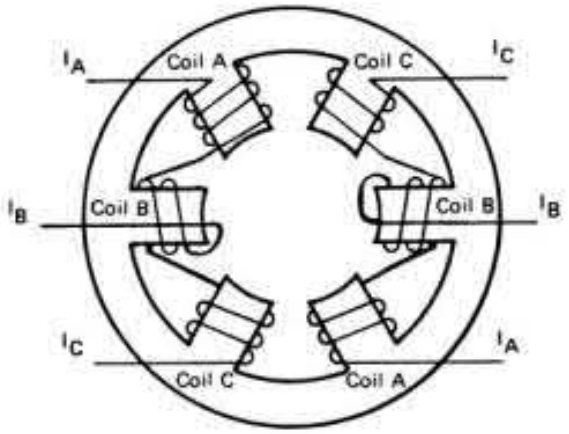
Mesin PMAC *sinusoidal* mulai lebih banyak digunakan karena densitas daya yang *superior*, torsi tinggi terhadap rasio *inersia*, efisiensi, dan ketersediaan bahan magnet permanen berdensitas tinggi dengan biaya yang relatif rendah. Ada dua tipe utama bagaimana magnet ditempatkan di rotor, dapat dibedakan dalam Gambar 2.11: a) jenis magnet permukaan b) tipe magnet interior.



Gambar 2. 11 Tipe Rotor PMSM

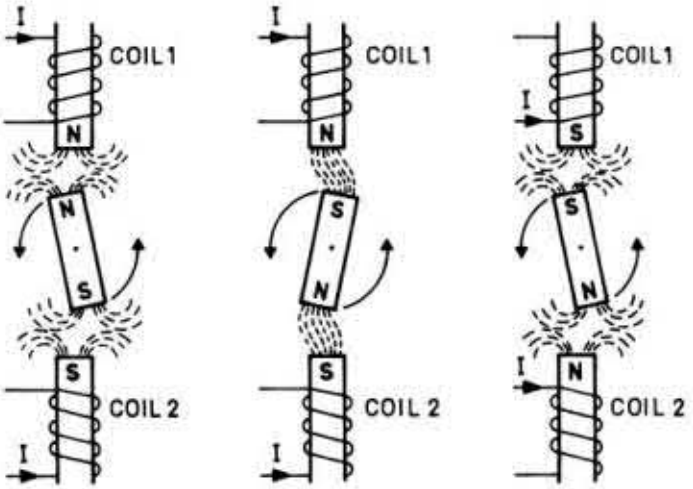
B. Prinsip Kerja

Stator PMSM mirip dengan mesin induksi dan mempunyai perbedaan pada rotor. Mesin induksi memiliki rotor kandang atau rotor tupai dan rotor PMSM terbuat dari magnet permanen dan laminasi ion. Gulungan tiga stator ditempatkan 120° dengan menghadap satu sama lain. Pada gambar di bawah ini menunjukkan penempatan gulungan stator untuk mesin tiga fasa dengan dua kutub per fase.



Gambar 2. 12 PMSM dengan 2 Kutub

Gambar 2.13 dapat dilihat bagaimana medan magnet yang dihasilkan oleh elektromagnet berinteraksi dengan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen, menghasilkan gerakan rotasi magnet. Dua kutub magnet dari tanda yang sama akan selalu mendorong satu sama lain sementara dua kutub magnet dari tanda yang berbeda akan selalu saling menarik.



Gambar 2. 13 Prinsip Kerja

Prinsip di balik operasi PMSM adalah interaksi antara medan magnet yang berputar dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor. Keuntungan dari PMSM adalah pembangkitan fluks rotor oleh magnet permanen tanpa perlu penggunaan energi listrik.

Dengan memasok gulungan stator serta tegangan medan magnet yang dihasilkan oleh stator maka akan berputar. Kecepatan putar medan magnet yang dihasilkan sebanding dengan frekuensi suplai tegangan disebut kecepatan sinkron. Kecepatan sinkron dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$n_s = \frac{120.f}{n} \quad \text{.....2.9}$$

dimana:

n_s = kecepatan sinkron (rad/s)

f = frekuensi tegangan suplai (Hz)

n = jumlah kutub per fase

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa kecepatan sinkron tergantung pada frekuensi dan jumlah kutub per fase. Kecepatan sinkron akan berkurang jika jumlah kutub bertambah. Rotor dari PMSM berputar dengan kecepatan sinkron. Kecepatan mekanik tergantung pada jumlah pasangan kutub per fase dan kecepatan sinkron. Rumusnya yang digunakan untuk menghitung kecepatan mekanik adalah sebagai berikut:

$$\omega_e = \omega_m . n_{pp} \quad \text{.....2.10}$$

dimana:

ω_e = kecepatan listrik rotor (rad/s)

ω_m = kecepatan mekanik rotor (rad/s)

n_{pp} = jumlah pasangan kutub per fase

2.2.2 Perpindahan Panas

Panas telah diketahui dapat berpindah dari tempat dengan temperatur lebih tinggi ke tempat dengan temperatur yang lebih rendah. Hukum percampuran panas juga terjadi karena panas itu berpindah, sedangkan pada kalorimeter, perpindahan panas dapat terjadi dalam bentuk pertukaran panas dengan luar sistem. Jadi pemberian atau pengurangan panas tidak saja mengubah temperatur atau fasa zat suatu benda secara lokal, melainkan panas itu merambat ke atau dari bagian lain benda atau tempat lain. Peristiwa itu disebut perpindahan panas.

Cengel, (2008:17) panas didefinisikan sebagai bentuk energi yang dapat ditransfer dari satu sistem ke sistem lainnya sebagai akibat dari perbedaan suhu. Analisis termodinamika berkaitan dengan jumlah perpindahan panas sebagai suatu sistem yang mengalami proses dari satu keadaan setimbang ke keadaan lain. Ilmu yang berurusan dengan penentuan tingkat transfer energi seperti itu adalah transfer panas. Perpindahan energi sebagai panas selalu dari media suhu tinggi ke suhu yang lebih rendah, dan transfer panas berhenti ketika dua media mencapai suhu yang sama.

Disini kita menyelidiki peristiwa berlangsungnya perpindahan panas itu. Kalau kita menganggap perpindahan panas berlangsung secara mengalir analogi dengan aliran listrik atau aliran fluida, maka aliran panas itu kita namakan arus panas. Kita

definisikan arus panas ini sebagai jumlah tenaga panas per satuan waktu atau daya panas melalui penampang tegak lurus kepada arah arus. Oleh sebab itu arus panas rata-rata adalah:

$$\overline{H} = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} \quad \text{.....2.11}$$

dengan $\Delta\tau$ sebagai waktu perpindahan panas yang dipandang.

Karena arus panas dapat berubah-ubah menurut waktu, maka arus panas pada setiap saat adalah:

$$H = \lim_{\Delta\tau \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta \tau} = \frac{dQ}{d\tau} \quad \text{.....2.12}$$

Perpindahan panas dapat kita ketahui melalui perubahan temperatur. Oleh karenanya perlu ditentukan hubungan antara arus panas dan perubahan atau perbedaan temperatur. Bagi kalorimeter yang mengalami pertukaran panas dengan luar sistem, akibat perpindahan panas, Newton memberikan suatu koreksi yang dikenal sebagai hukum pendinginan atau pemanasan Newton.

1. Macam Perpindahan Panas

Panas dapat ditransfer dalam tiga cara yang berbeda: konduksi, konveksi, dan radiasi. Semua cara perpindahan panas memerlukan adanya perbedaan suhu, dan semua cara berasal dari medium bersuhu tinggi ke suhu yang lebih rendah.

A. Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan energi yang terjadi pada medium yang diam (padat atau zat yang dapat mengalir) apabila terdapat gradien temperature dalam medium tersebut. Hukum Fourier menyatakan bahwa laju

perpindahan panas konduksi dirumuskan (Holman, 1987):

$$q_x = - k A \frac{dT}{dx} \quad \text{.....2.13}$$

dimana:

qx = Laju perpindahan panas (W)

dx dT = Gradien Temperature terhadap jarak dalam arah aliran panas x

A = Luas Permukaan benda (m^2)

k = Konduktifitas termal (W/m^oC)

B. Konveksi

Konveksi panas terjadi karena partikel zat yang mempunyai temperatur lebih tinggi berpindah tempat secara mengalir sehingga dengan sendirinya terjadi perpindahan panas melalui perpindahan massa. Perpindahan panas konveksi terjadi antara permukaan dengan fluida yang mengalir apabila keduanya mempunyai temperatur yang berbeda ketika fluida melaju melalui benda padat. Perpindahan kalor terjadi antara fluida dan permukaan padat sebagai hasil dari pergerakan fluida.

Perpindahan panas secara konveksi dibagi menjadi dua, yaitu:

1) Konveksi Paksa *(Forced Convection)* Terjadi jika pergerakan fluida disebabkan oleh mekanisme dari luar secara paksa seperti oleh blower, pompa, atau *fan*.
2) Konveksi Alami *(Free Convection)* Terjadi jika pergerakan fluida dikontrol sebagai hasil dari perbedaan massa jenis (densitas) yang disebabkan oleh perbedaan temperatur diantara fluida.

Perpindahan panas konveksi dirumuskan (Holman, 1987):

$$q = h.\ A.\ \Delta T \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2.14$$

dimana:

h = Koefisien Konveksi (W/m^2K)

A = Luas Permukaan Konveksi (m^2)

ΔT = Perbedaan Suhu (K)

C. Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh materi dalam bentuk gelombang elektromagnetik (atau foton) sebagai akibat dari perubahan dalam konfigurasi elektronik atom atau molekul. Tidak seperti konduksi dan konveksi, transfer energi oleh radiasi tidak memerlukan kehadiran media intervensi. Bahkan, transfer energi dengan radiasi paling cepat (pada kecepatan cahaya) dan tidak mengalami redaman dalam ruang hampa. Beginilah bagaimana energi matahari mencapai bumi (Cengel, 2008:27).

Setiap benda bisa menyerap kalor yang dipancarkan secara radiasi. Akan tetapi yang menentukan daya serap dan daya bukanlah jenis bahan benda tersebut melainkan warnanya. Semakin hitam sebuah benda maka benda tersebut akan cenderung semakin menyerap panas yang dipancarkan melalui radiasi. Kehitaman inilah yang disebut sebagai emisivitas bahan. Laju penyerapan kalor yang dipancarkan secara radiasi dirumuskan:

$$q = \sigma\ e\ A\ T^4 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 2.15$$

dimana:

e = emisivitas bahan

σ = konstanta Setfan-Boltzman $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ C

A = luas permukaan benda

T = suhu dalam Kelvin

2. Pembangkitan Panas pada Motor Listrik

Pembangkitan panas yang terjadi dalam proses konversi energi pada motor listrik akan meningkatkan suhunya. Meningkatnya suhu kerja yang berlebihan akan mengurangi kinerja motor dan mempersingkat masa hidupnya. Diperlukan sistem manajemen termal untuk mengurangi suhu kerja motor listrik (Putra dan Ariantara, 2017:1).

Pembangkitan panas di dalam motor listrik terdiri dari kerugian Joule, kerugian besi, kerugian mekanis, dan kerugian beban liar. Kerugian-kerugian tersebut terkait dengan konversi energi listrik mejadi energi panas yang terjadi dalam bahan konduksi listrik seperti belitan tembaga stator dan gesekan mekanis. Metode konvensional pendinginan motor listrik biasanya dengan menggunakan sirip yang dipasang di permukaan luar rumah motor. Sirip ini berfungsi untuk memperluas area permukaan rumah motor listrik ke udara sekitar dengan konveksi. Dapat diketahui bahwa dalam pembangkitan panas pada motor listrik terdapat dua jenis perpindahan panas yaitu, konduksi pada belitan tembaga stator dan konveksi pada sirip di permukaan luar rumah motor.

2.2.3 Sistem Pendinginan pada Motor Listrik

1. Pengertian Sistem Pendinginan

Sistem pendinginan berfungsi untuk menjaga motor atau mesin supaya temperaturnya dalam kondisi yang ideal. Sistem pendinginan *(cooling system)* adalah suatu rangkaian untuk mengatasi terjadinya *overheating* pada mesin agar tetap bekerja secara optimal (Daryanto, 2002:1). Sistem pendinginan perlu dan penting dilakukan. Bila motor tidak didinginkan akan terjadi pemanasan yang lebih *(overheating)* dan akan mengakibatkan gangguan-gangguan pada mekanik, fisik sekeliling, dan operasi dari sistem keseluruhan.

Prinsip pendinginan adalah melepaskan panas yang diserap oleh motor ke udara, tipe langsung dilepaskan ke udara disebut pendinginan udara *(air cooling)* dan tipe menggunakan fluida sebagai perantara disebut pendinginan air. Pada dasarnya prinsip sistem pendinginan udara dan air adalah sama. Keduanya menerapkan prinsip aliran fluida (udara dan air) dalam proses pendinginannya. Panas yang berasal dari putaran rotor terhadap stator dirambatkan pertama kali menuju dinding motor dan kemudian baru dirambatkan menuju sirip-sirip pendingin (pendinginan udara) atau menuju *water jacket* (untuk sistem pendinginan air). Panas tadi kemudian terbawa oleh aliran udara atau aliran air pada *water jacket*.

Besarnya panas yang dihasilkan harus mampu diserap secara efektif oleh sistem pendinginan. Intinya semakin besar panas yang dihasilkan, maka keperluan aliran udara dan air pun harus banyak. Caranya kendaraan bergerak lebih cepat untuk mendapatkan untuk mendapatkan hembusan udara lebih kencang atau

mengaplikasikan *blower* untuk lebih membantu. Sama halnya dengan sistem pendingin air, untuk mempercepat aliran digunakan perangkat pompa air.

2. Macam-macam Sistem Pendinginan

Sistem pendinginan pada motor listrik hampir sama dengan sistem pendinginan pada motor bakar. Berdasarkan fluida pendingin, pendingin yang biasa digunakan pada motor listrik dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu motor dengan sistem pendingin air dan motor dengan sistem pendingin udara. Di bawah ini merupakan perbandingan karakteristik air dan udara ketika digunakan sebagai cairan pendingin.

Tabel 2. 1 Perbandingan Karakteristik Air dan Udara

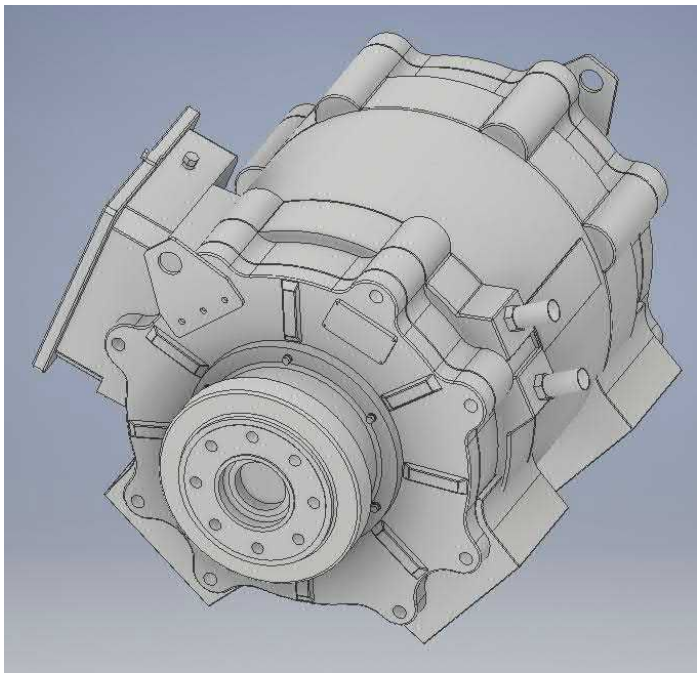
Temperature In ^{o}C	**($Pr^{1/3}$ $Re_x^{1/2}$ K) in W/m K**	
	Water	**Air**
0	63,08	0,3768
20	72,30	0,3736
40	80,11	0,3713
60	86,49	0,3697
80	91,53	0,3683
100	95,38	0,3677

A. Sistem Pendingin Air

Sistem pendingin air memliki konstruksi yang lebih rumit dibanding pendingin udara, akan tetapi memiliki banyak kelebihan dibanding pendingin udara, diantaranya motor menjadi relatif aman karena di sekeliling stator dikelilingi oleh air pendingin melalui *water jacket*.

Panas dari air ditransfer ke sirip radiator kemudian panas tersebut disemburkan ke udara, air kemudian kembali ke mesin (Daryanto, 2002:12). Cara kerja sistem

pendinginan yang menggunakan air yaitu air pendingin bersirkulasi di *water jacket* untuk mendinginkan motor yang panas itu. Ketika air telah panas maka air itu akan masuk ke radiator. Di radiator air pendingin yang panas itu akan didinginkan oleh sirip-sirip radiator dan kipas radiator. Ketika proses pendinginan telah selesai maka akan menuju kembali ke motor untuk mendinginkan motor. Pompa air mempercepat proses pendinginan itu.



Gambar 2. 14 Motor Listrik dengan Jenis Pendingin Air

Bagian-bagian sistem pendinginan air yang penting dan perlu dipelihara/diservis adalah: radiator, *water pump*, kipas radiator, dan tangki *reservoir*.

1) Radiator

Radiator pada sistem pendinginan berfungsi untuk mendinginkan air atau membuang panas air ke udara melalui sirip-sirip pendinginannya.

2) *Water pump*

Water pump atau pompa air berfungsi untuk menyirkulasikan air pendingin dengan jalan membuat perbedaan tekanan antara saluran isap dengan saluran tekan pada pompa.

3) Kipas radiator

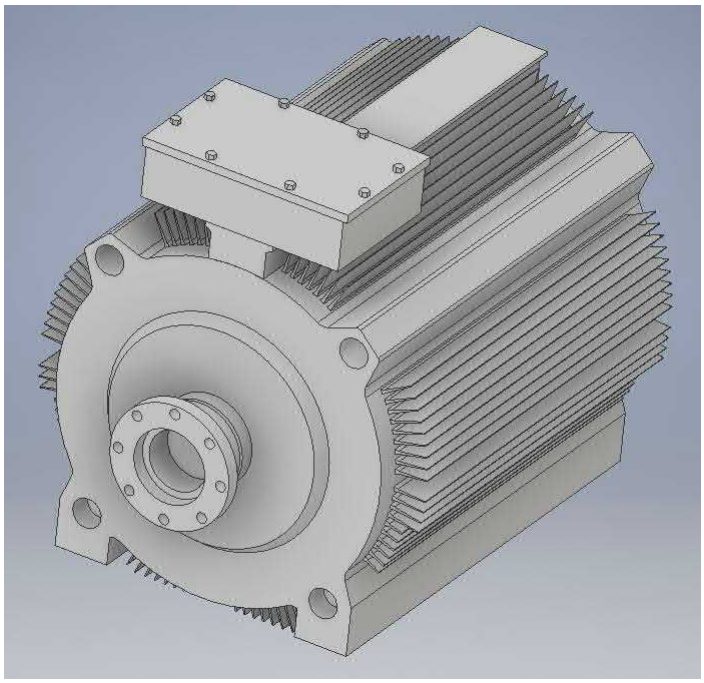
Kipas berfungsi untuk mengalirkan udara pada inti radiator agar panas yang terdapat pada inti radiator dapat dipancarkan ke udara dengan mudah. Kipas pendingin dapat berupa kipas pendingin biasa (yang diputarkan oleh mesin) atau kipas pendingin listrik.

4) Tangki *reservoir*

Tangki *reservoir* ini berfungsi untuk menampung air yang sudah didinginkan oleh radiator, yang selanjutnya akan di pompa dengan *water pump* menuju MCU *(Motor Controller Unit)* dan motor listrik.

B. Sistem Pendinginan Udara

Sistem pendingin udara yang digunakan pada motor listrik diambil langsung oleh udara melalui sirip-sirip pendingin. Kemudian diserap oleh udara luar yang temperaturnya jauh lebih rendah. Konstruksi dan jumlah sirip pendingin tergantung besar kecilnya motor dan kecepatan perpindahan kalor dan sirip-sirip pendingin ke udara. Sirip-sirip ini dipasangkan disekeliling dinding luar motor. Udara yang menyerap panas dari sirip-sirip pendingin harus bersirkulasi agar udara di sekitar sirip-sirip pendingin temperaturnya tetap rendah.



Gambar 2. 15 Motor Listrik dengan Jenis Pendingin Udara

Dasar penggunaan pada sistem pendinginan udara ini tergantung pada hal sebagai berikut:

1) Perbedaan temperatur antara panas motor dengan udara luar/sekitar
2) Luas permukaan dimana panas dikeluarkan atau disemburkan
3) Tingkat aliran udara pada permukaan yang dikenai (Daryanto, 2002:12).

Pada pendingin udara ini, hembusan udara mejadi lebih cepat pada saat kendaraan berjalan atau dilakukan oleh sebuah kipas. Konstruksi motor dengan pendingin udara di banding pendingin air mempunyai keuntungan antara lain yaitu konstruksi lebih sederhana, harga relatif lebih murah, dan perawatan relatif tidak ada. Namun demikian juga mempunyai kerugian yaitu pendinginan tidak merata dan suara motor keras karena adanya getaran dari sirip-sirip pendingin.

2.2.4 Material

Pemilihan material menjadi salah satu hal yang penting untuk sebuah rancangan. Pemilihan material yang tepat guna juga akan berimbas pada kualitas alat yang baik pula. Dalam produksi komponen pada industri manufaktur tentunya sangat di perhatikan komposisi, kualitas dan efisiensi materialnya. Maka untuk membuat komponen pada produksi harus memperhatikan standar material *grade manufacturing* yaitu tidak boleh menggunakan bahan yang mudah korosi dan kuat, namun juga memiliki nilai kelenturan tertentu. Bahan dari alumunium dipertimbangkan sebagai pilihan untuk membuat saluran udara dikarenakan memiliki spesifikasi yang sesuai.

Bahan atau material yang digunakan sebagai plat saluran udara direncanakan menggunakan logam yang ringan dan tahan korosi yaitu alumunium 6061-T6. Jenis alumunium tersebut juga merupakan material yang digunakan sebagai bodi bus. Dari sekian banyak logam yang potensial, komposit matrik logam paduan Al 6061-T6 telah menjadi obyek dari banyak riset, terutama oleh keringanannya, murah dan kemudahan untuk difabrikasi. Al 6061-T6 memiliki ketahanan korosi yang tinggi, karena logam ini sangat reaktif, karena terbentuk lapisan oksida tipis pada permukaannya, sehingga jika bersentuhan dengan udara dan lapisan ini terkelupas maka akan segera terbentuk lapisan baru. Material Al 6061-T6 mempunyai komposisi kimia dan sifat-sifat mekanik dari material secara berurutan ditunjukkan pada tabel 2.2 dan tabel 2.3.

Tabel 2. 2 Komposisi Kimia Al 6061-T6

Si	Fe	Cu	Mn	Mg
0,6496	0,6777	0,2487	0,1129	0,9290
Zn	**Ti**	**Cr**	**Pb**	**Al**
0,1196	0.1810	0,1014	0,0073	97,135

Tabel 2. 3 Sifat-sifat Mekanik Al 6061-T6

Sifat material	Nilai	Satuan
Ultimate Tensile Strength	310	MPa
Yield strength	276	MPa
Modulus of Elasticity	68,9	GPa
Shear Strength	207	MPa
Poiton Ratio	0,33	-
Elongation	12	%

Keamanan desain bisa didasarkan pada kekuatan dari material atau struktural. Keamanan desain atau konstruksi dievaluasi menggunakan faktor keamanan. Menurut (Arif, 2014) faktor keamanan dapat dituliskan dengan rumus:

$$SF = \frac{F_u}{F_i} \quad \text{.....2.16}$$

dimana:

SF = Faktor Keamanan

F_u = Tegangan Sebenarnya (MPa)

F_i = Tegangan Dibutuhkan (MPa)

Apabila faktor keamanan kecil, maka akan memungkinkan terjadinya kegagalan. Sebaliknya jika faktor keamanan sangat besar, maka material yang digunakan akan sangat boros.

2.2.5 Simulasi CFD *(Computational Fluid Dynamics)*

Perkembangan teknologi komputer digital yang sangat pesat telah memberikan banyak manfaat bagi para *engineer* dalam proses desain dan analisis *engineering*. Solusi yang cepat dan hemat biaya diperoleh dengan memanfaatkan kemampuan komputer digital dalam perhitungan engineering yang kompleks.

CFD adalah cabang ilmu dari mekanika fluida yang menggunakan analisis numerik dan data yang terstruktur untuk menganalisis dan memecahkan problematika yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas ataupun reaksi kimia menggunakan simulasi komputer. *Computational Fluid Dynamics* yang disingkat *CFD* adalah metode yang menggunakan angka, algoritma dan bantuan komputer untuk melakukan analisis perhitungannya. Tujuan dari bagian ini adalah untuk menjelaskan masukan apa saja yang dibutuhkan untuk mengurangi biaya ekonomi dan mendorong efisiensi desain (Gallon, E. *et all,* 2018:3). Misalnya, geometri CAD, *mesh* komputasi, sifat material, kondisi batas dan lain-lain.

1. Pemodelan dalam Rekayasa

Pemodelan konvensional dalam rekayasa sangat didasarkan pada model empiris atau semi-empiris. Model-model ini sering bekerja dengan sangat baik untuk operasi unitnya, tetapi tidak dapat diandalkan untuk kondisi proses baru. Pengembangan peralatan dan proses baru tergantung pada pengalaman para ahli, dan peningkatan skala dari laboratorium ke skala penuh sangat memakan waktu dan sulit. Dari survei, seseorang dapat mengamati keberhasilan simulasi CFD multi-dimensi dalam penggambaran dan penjelasan fenomena nyata yang terjadi pada mesin (El-Ghafour,

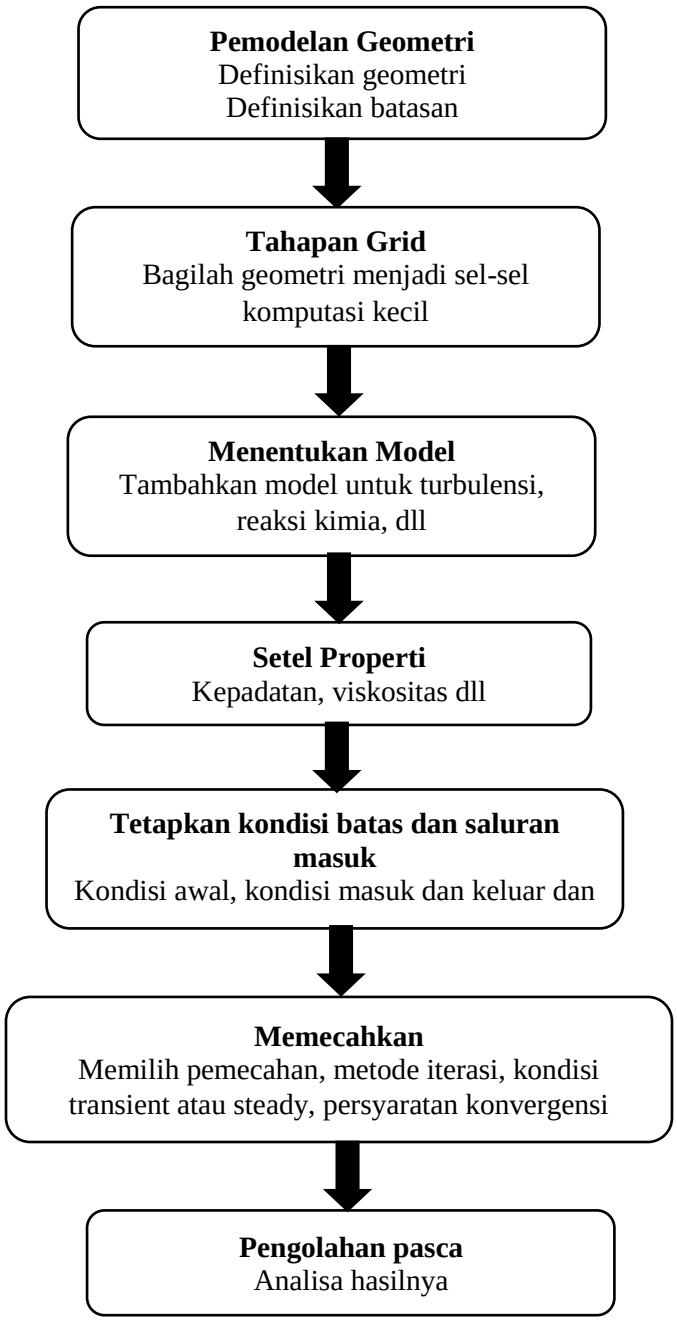
S.A., *et al,* 2018:535). Tren baru adalah bahwa para insinyur semakin menggunakan komputasi dinamik fluida (CFD) untuk menganalisis aliran dan kinerja rancangan peralatan dan proses baru. *CFD* memungkinkan mendapat hasil analisis yang rinci dari aliran yang dikombinasikan dengan transfer massa dan panas. "Alat *CFD* modern juga dapat mensimulasikan transportasi spesies kimia, reaksi kimia, pembakaran, evaporasi, kondensasi dan kristalisasi" (Andersson B. *et al*, 2012:1).

2. Program CFD

Dengan bantuan komputer, maka diharapkan pemecahan masalah fluida yang cukup rumit bisa terselesaikan dengan mudah dan cepat. Selain itu, *CFD* menawarkan solusi yang murah untuk melakukan analisis jika dibandingkan dengan uji eksperimental langsung di lapangan. Walaupun pada kasus tertentu, data uji dilapangan perlu diikutsertakan dalam validasi hasil simulasi *CFD*. Tentu saja, jika permasalahanya semakin kompleks dan ruang lingkup kasus simulasi semakin besar, perlu menggunakan superkomputer untuk menyelesaikannya.

Alasan mengapa harus menggunakan *CFD* karena *software* tersebut mempunyai beberapa kelebihan diantaranya yaitu memungkinkan kita untuk memahami secara mendalam dan virtual ke dalam alat/sistem yang kita rancang, dapat segera menentukan desain mana yang optimal, dan membantu untuk mendesain lebih cepat dan hemat biaya. *CFD* dalam hal ini memiliki kelemahan, dalam hal menentukan *boundary condition* (kondisi batas) yang tepat pada saat akan melakukan pemodelan, oleh sebab itu dalam memberikan *boundary condition* harus memiliki pemahaman yang baik dan tahu bagaimana mendefinisikannya.

Dalam menyelesaikan masalah menggunakan *CFD* ada banyak langkah yang harus didefinisikan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.16 (Andersson B. *et all*, 2012:4).



Gambar 2. 16 Tahapan Simulasi pada CFD

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian analisis perpindahan kalor pada perancangan saluran udara menggunakan *software INVENTOR* dan *CFD (Compuutational Fluid Dynamics)* menyimpulkan bahwa:

1. Rancangan saluran udara supaya dapat menghasilkan sumber udara yang lebih untuk mendinginkan motor listrik dengan menyesuaikan konstruksi bus jenis *low deck* sudah diujikan dalam 4 macam variasi. Yaitu desain standar/desain lama, desain variasi 1, desain variasi 2, dan desain variasi 3. Dari keempat desain tersebut, desain variasi 3 adalah desain yang mempunyai hasil paling baik (68,4835 ^{o}C). Hal itu karena pada desain variasi 3 terdapat adanya penambahan lubang-lubang pada samping kanan dan kiri *body* sebagai sumber masuknya udara sekitar dan optimasi dimensi sirip-sirip pada motor listrik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa adanya optimasi pada *body* dan dimensi sirip-sirip motor listrik mampu mendinginkan motor listrik dengan nilai temperatur yang paling rendah dan dapat menghindari dari *overheating*.
2. Setelah dengan menggunakan simulasi *CFD (Computational Fluid Dynamics)* mampu memperlihatkan distribusi temperatur yang terjadi pada rancangan saluran udara. Pada pengujian desain variasi 1, 2, 3 dan standar menyimpulkan bahwa

desain variasi 3 menunjukkan hasil distribusi temperatur yang paling baik, karena mampu menyerap panas yang lebih baik jika dibandingkan dengan desain lainnya. Berdasarkan data perbandingan hasil analisis, dapat diketahui untuk nilai maksimal paling tinggi terjadi pada desain standar sebesar 108,04 ^{o}C dan paling rendah pada desain variasi 3 sebesar 68,4835 ^{o}C.

5.2 Saran

Saran yang dapat diterapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Usahakan dalam pembuatan desain benar-benar memperhatikan setiap relief konstruksi desain sehingga tidak adanya celah dan menghindari desain yang kurang rapi atau kurang lengkap. Karena jika terjadi satu kesalahan saja pada konstruksi desain, saat simulasi menggunakan CFD tidak mampu berjalan. Sehingga harus mencari dan memperbaiki desain kembali pada bagian yang bermasalah. Hal ini bertujuan agar lebih mengefisiensikan waktu penelitian.
2. Penulis menyarankan desain variasi 2 dan 3 bisa digunakan untuk pengembangan Bus Listrik MAB dengan jenis *low deck entry* yang selanjutnya. Penentuan desain tersebut karena mampu memperlihatkan hasil yang lebih baik dengan adanya penambahan saluran udara dan optimasi pada dimensi sirip-sirip motor listrik.
3. Untuk saran penelitian berikutnya yang terkait dengan penelitian ini adalah menyimulasikan beberapa macam variasi dengan menambahkan faktor getaran dari motor listrik. Selain itu juga bisa simulasi dengan variasi jenis material yang

digunakan untuk membuat motor listrik yang mampu mempengaruhi temperatur motor listrik tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

Andersson, B., R. Anderson, dan L. Hakansson. 2012. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge: Cambridge University Press.

Arif, Z. 2014. *MEKANIKA KEKUATAN BAHAN*. Langsa: Fakultas Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Samudra Langsa.

ASM. 1989. *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals Vol. 2*. American Society for Metals: Metal Handbook Ninth Edition Ohio 44073.

Bagia, I.N. dan I M. Parsa. 2018. *Motor-Motor Listrik*. Kupang: CV Rasi Terbit.

Cengel, A.Y. 2008. *Heat Transfer A Practical Approach second edition*. USA: McGraw-Hill

Chang, C.C., S.C. Kuo, C.K. Huang, dan S.H. Chen. 2009. The Investigation of Motor Cooling Performance. *International Journal of Mechanical, Industrial and Aerospace Engineering* 3(1): 43-49.

Daryanto. 2002. *Pemeliharaan Sistem Pendingin dan Sistem Pelumasan Mobil*. Bandung: Krama widya.

Davin, T., J. Pelle, S. Harmand, dan R. Yu. 2014. Experimental study of oil cooling systems for electric motors. *Applied Thermal Engineering* 75:1-13.

El-Ghafour, S.A., M. El-Ghandour, dan N.N. Mikhael. 2018. Three-dimensial Computational Fluid Dynamics Simulation of Stirling Engine. *Energy Conversion and Management* 180:533-549.

Gallon, E., P. Parisi, F. Marignetti, dan G. Volpe. 2018. CFD Analyses of a Radial Fan for Electric Motor Cooling. *Thermal Science and Engineering Progress* 246 (18):1-15.

Integrated Publishing. 2003. *Synchronised Motors.* www. tpub. com/content /neets /14177/ css/14177_92.htm. 14 September 2018 (20.15).

Kim, M.S., K.S. Lee, dan S. Um. 2008. Numerical investigation and optimization of the thermal performance of a brushless DC motor. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 1589-1599.

Lee, K.H., H.R. Cha, dan Y.B. Kim. 2015. Development of an interior permanent magnet motor through rotor cooling for electric vehicles. *Applied Thermal Engineering* 95: 348-356.

Parekh, R. 2003. *AC Induction Motors Fundamentals AN887*. U.S.A.: Microchip Technology Incorporated.

Putra, N. dan B. Ariantara. 2017. Electric Motor Thermal Management System Using L-shaped Flat Heat Pipes. *Applied Thermal Engineering* 8:1-8.

PED 1034. 2010. *Control of a saturated Permanent Magnet Synchronus Motor*. Denmark: Departemen of Energi Tehnology Aalborg University.

Sugiyono. 2012. *Metode Penelitian Kuantitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.

Tua, S. M., T. Siahaan, Suhardi, dan Wagiman. 2006. Penambahan Pengaman Motor Listrik dengan Sensor Suhu IC LM 135. *Jurnal Hasil-hasil Penelitian EBN* Tahun 2006: 291-304.

United Nations Environment Programme (UNEP). 2006. *Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia*. India: Badan Produktivitas Nasional.