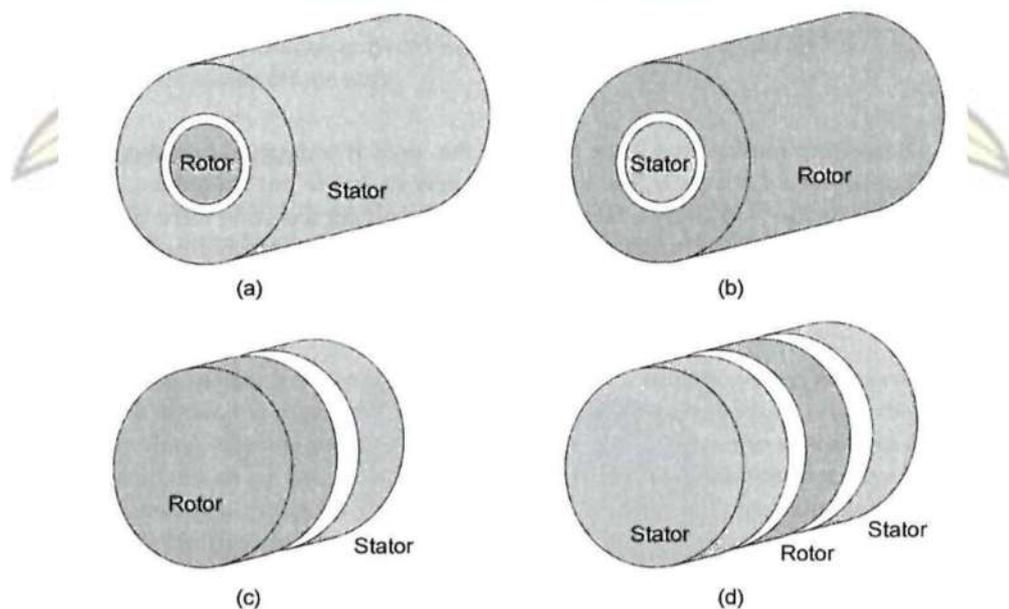


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Brushless Direct Current (BLDC) Motor*

Salah satu jenis motor listrik yang banyak digunakan di industri saat ini adalah Motor *Brushless Direct Current (BLDC)*. Motor *BLDC* digunakan dalam industri seperti otomotif, dirgantara, medis, dan instrumentasi otomasi industri. Motor *BLDC* tidak menggunakan sikat seperti motor *DC*. Motor *BLDC* berkomutasi secara elektronik, sedangkan motor *DC* berkomutasi menggunakan sikat. Motor *BLDC* memiliki keunggulan seperti kecepatan dengan torsi yang lebih baik, respon dinamis tinggi, efisiensi tinggi, masa operasi yang panjang tanpa perawatan sikat, operasi tanpa suara, dan rentang kecepatan yang lebih tinggi (Yedamale, 2003).



Gambar 2. 1 Konstruksi motor (Hanselman, 2006)

Bentuk motor yang paling umum adalah silinder seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (a). Bentuk motor ini dan yang lainnya memiliki dua bagian utama. Bagian yang tidak bergerak atau diam disebut *stator*. Bagian yang bergerak atau berputar disebut *rotor*. Pada sebagian besar motor silinder, *rotor* berada di dalam *stator* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (a). Konstruksi ini banyak

digunakan karena menempatkan *stator* yang tidak bergerak di bagian luar memudahkan untuk pemasangan motor. Karena *rotor* di dalam *stator* memberikan perlindungan alami untuk melindungi *rotor* yang bergerak (Hanselman, 2006).

Selain bentuk silinder, motor dapat dirancang dengan berbagai cara. Dua bentuk silindris motor ditunjukkan Gambar 2.1 (a) dan Gambar 2.1 (b). Ketika *rotor* berada di luar *stator* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (b), motor sering dikatakan sebagai *outer* motor. Untuk motor ini, medan magnet bergerak dalam arah *radial* melintasi celah udara antara *rotor* dan *stator*. Akibatnya, motor ini disebut motor *fluks radial*. Motor yang memiliki bentuk *pancake* ditunjukkan pada Gambar 2.1 (c) dan Gambar 2.1 (d). Pada motor *fluks axial* ini, medan magnet antara *rotor* dan *stator* bergerak ke arah *axial* (Hanselman, 2006).

Konstruksi motor *BLDC* secara lengkap akan dijelaskan sebagai berikut.

2.1.1 *Stator*

Bagian yang diam atau bersifat statis pada motor merupakan *stator*, yang berfungsi sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada *rotor* sehingga mampu membangkitkan gaya mekanik. Secara konstruksi *stator* terdiri dari laminasi besi dengan ukuran tertentu dan memiliki jumlah laminasi sesuai tebal pada desain (Fawaaid, 2019).

Motor *BLDC* memiliki tiga klasifikasi yaitu satu fase, dua fase dan tiga fase. Motor satu fase dan tiga fase adalah yang paling banyak digunakan. *Rotor* memiliki magnet permanen untuk membentuk 2 pasangan kutub magnet, dan mengelilingi *stator*, yang memiliki belitan (Zhao, 2011).

Motor fasa tunggal memiliki satu belitan *stator* searah jarum jam atau berlawanan arah jarum jam di sepanjang setiap lengan *stator* untuk menghasilkan empat kutub magnet. Sebagai perbandingan, motor tiga fase memiliki tiga belitan. Setiap fase menyala secara berurutan untuk membuat *rotor* berputar (Zhao, 2011).

Ada dua jenis belitan *stator* yaitu trapesium dan sinusoidal, yang mengacu pada bentuk sinyal *Back Electromotive Force (BEMF)*. Bentuk *BEMF* ditentukan oleh interkoneksi koil yang berbeda dan jarak celah udara. Selain *BEMF*, arus fasa juga mengikuti bentuk trapesium dan sinusoidal. Motor sinusoidal menghasilkan torsi elektromagnetik yang lebih halus daripada motor trapesium, meskipun dengan

biaya yang lebih tinggi karena penggunaan gulungan tembaga ekstra. Motor *BLDC* menggunakan struktur sederhana dengan belitan *stator* trapesium (Zhao, 2011).

2.1.2 Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar dalam motor *BLDC*. *Rotor* terbuat dari magnet permanen dan dapat bervariasi dari dua hingga delapan pasangan kutub dengan kutub Utara (N) dan Selatan (S). Berdasarkan kepadatan medan magnet yang diperlukan dalam *rotor*, bahan magnetik yang tepat dipilih untuk membuat *rotor*. Magnet *ferit* digunakan untuk membuat magnet permanen. Seiring kemajuan teknologi, magnet paduan semakin populer. Magnet *ferit* lebih murah tetapi memiliki kerugian dari kerapatan *fluks* rendah untuk volume yang diberikan. Sebaliknya, material paduan memiliki kerapatan magnetik tinggi per volume dan memungkinkan *rotor* untuk menekan lebih lanjut untuk torsi yang sama. Juga, magnet paduan ini meningkatkan rasio ukuran terhadap berat dan memberikan torsi lebih tinggi untuk motor ukuran yang sama menggunakan magnet *ferit*. *Neodymium* (*Nd*), *Samarium Cobalt* (*SmCo*) dan paduan *Neodymium*, *Ferrite* dan *Boron* (*NdFeB*) adalah beberapa contoh magnet paduan (Yedamale, 2003).

2.1.3 Hall Sensor

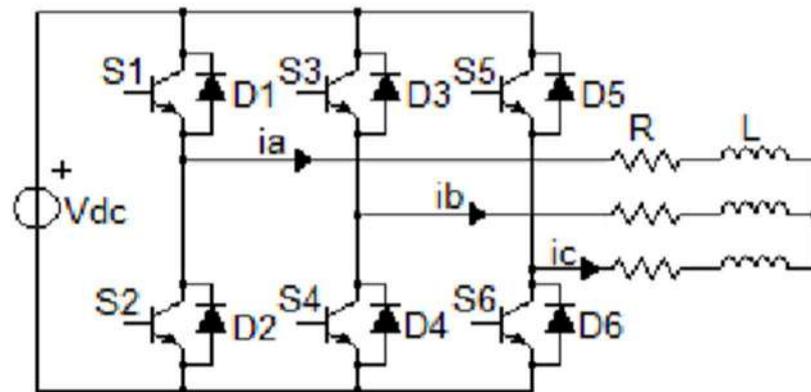
Hall sensor berfungsi untuk menentukan orientasi posisi *rotor*. Motor *brushless DC* dilengkapi dengan tiga sensor *hall effect magnetic*. *Hall effect magnetic* sensor akan berfungsi memberikan sinyal digital akibat adanya medan magnet yang tegak lurus terhadap sensor. Sensor *hall* ini harus diletakkan sedekat mungkin dengan *rotor* magnet permanen untuk mendeteksi posisi kutub magnet pada *rotor*. *Output hall* sensor akan akan dibaca oleh *decoder*. *Hall* sensor ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Nurtriartono, 2014).



Gambar 2. 2 *Hall* sensor (Nurtriartono, 2014)

2.2 Torsi Pada Motor *BLDC*

Motor *Brushless DC* terdiri dari bagian *stator* yang berisi kumparan. Dan *Rotor* dengan magnet permanen. Ketika kumparan motor diberi arus oleh inverter 3 fasa, maka *stator* akan menghasilkan medan *stator*. Ketika medan *stator* memotong *flux* dari magnet permanen yang terdapat pada *rotor* akan terjadi interaksi atau gaya pada bagian *rotor* yang dekat dengan celah udara. Gaya tersebut apabila dikalikan secara *cross* dengan jari-jari *rotor* akan menghasilkan torsi pada poros motor. Proses terjadinya torsi ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Cham, 2014).



Gambar 2. 3 Skema Rangkaian *BLDC* Motor (Cham, 2014)

Penentuan nilai torsi dapat dihitung dengan mengestimasi kecepatan putaran motor. Sehingga torsi dapat dihitung dengan Persamaan 2.1.

$$f = \frac{N}{t} \quad (2.1)$$

Frekuensi sudut yang dihasilkan pada kecepatan putaran motor didapatkan pada Persamaan 2.1. Sehingga dapat diketahui kecepatan sudut pada perhitungan menggunakan Persamaan 2.2.

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2)$$

Kecepatan sudut didapatkan dengan Persamaan 2.2 sehingga dapat dihitung nilai torsinya dengan Persamaan 2.3 sebagai berikut.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2.3)$$

Torsi didapatkan dari hasil perhitungan dengan daya motor dibagi dengan kecepatan sudut (Fawaid, 2019).

2.3 Efisiensi

Efisiensi sebuah mesin adalah suatu ukuran seberapa baik mesin dapat mengubah energi masukan listrik ke energi keluaran mekanik. Efisiensi berhubungan langsung dengan rugi-rugi motor induksi terlepas dari desain mesin itu sendiri.

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Penghitungan efisiensi sangat mudah dilakukan yaitu hanya dengan menghitung hasil pengukuran *output power* dibagi dengan *input power*. Karena kita membagi hasil pengukuran yang besarnya hampir sama, kesalahan kecil dalam pengukuran dapat menyebabkan kesalahan besar pada hasil akhir efisiensi (Septianto, 2015).

2.4 Torsi Cogging

Torsi *cogging* merupakan variasi energi yang terletak pada celah udara dan disebabkan oleh adanya interaksi antara magnet permanen pada *rotor* yang berputar dan *stator*. Magnet permanen yang berputar di sekitar *stator* akan menyebabkan reluktansi yang berubah – ubah secara periodik. Torsi *cogging* independen terhadap besarnya arus pada kumparan *stator*. Untuk melakukan pengujian torsi *cogging*, arus pada kumparan harus diputus dan tanpa dibebani. Secara matematis, besarnya torsi *cogging* dapat dirumuskan sebagai berikut (Candel, 2016).

$$T_{cog} = \frac{1}{2} \Phi_g^2 \cdot \frac{d\mathcal{R}_g}{d\theta} \quad (2.5)$$

Dimana T_{cog} merupakan besaran torsi *cogging*, Φ_g merupakan fluks pada celah udara, \mathcal{R}_g merupakan reluktansi celah udara, dan θ merupakan posisi angular *rotor*. Semakin tinggi torsi *cogging* motor maka, riak torsi akan semakin besar sehingga menimbulkan getaran dan suara bising yang berlebihan. Hal ini akan menyebabkan efisiensi motor *BLDC* menurun. Dimana B_g adalah amplitudo kerapatan fluks celah udara dan A_g adalah luasan udara yang dipotong oleh aliran fluks (Candel, 2016).

$$\Phi_g = B_g \cdot A_g \quad (2.6)$$

Untuk menghitung periode bentuk gelombang dari torsi *cogging*, torsi statis dihitung untuk keseluruhan 360 derajat listrik posisi *rotor*. Posisi 0° dan 360° dari

rotor dianggap sebagai torsi nol posisi. Generator ini memiliki stator 6 kutub bentang ganda dan sudut bentang 12° . Oleh karena itu, 30° didapatkan dari $(360/12)$. Periode bentuk gelombang torsi *cogging* (N) dihitung sebagai berikut (Vidhya, 2017).

$$N = \frac{30^\circ \text{ Putaran}}{\text{Jumlah Kutub Magnet}} \quad (2.7)$$

2.5 Pengurangan Torsi *Cogging*

Motor *BLDC* memiliki rasio torsi terhadap berat yang tinggi dan tinggi efisiensi, yang banyak digunakan di aplikasi industri. Namun, pada jenis motor ini torsi *cogging* adalah salah satu kendala utama dalam penggunaan pengembangan. Torsi *cogging* muncul dari interaksi gigi *stator* dengan magnet yang menyebabkan peningkatan riak torsi, kebisingan, getaran dan pada akhirnya mengurangi efisiensi motor (Rashidaee, 2011).

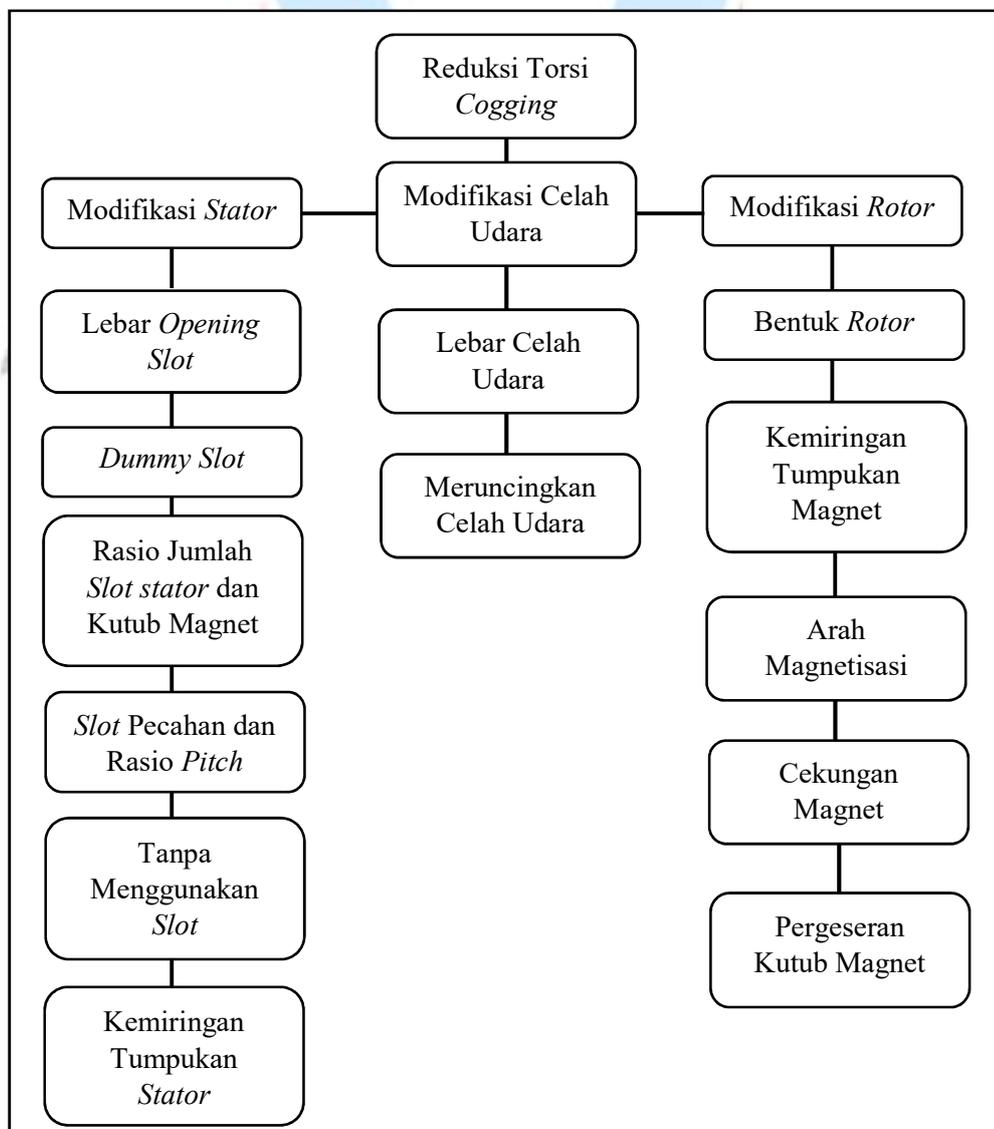
Terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk mengurangi torsi *cogging* pada motor *BLDC* yaitu dengan mengubah struktur bagian – bagian motor dan mengubah teknik kontrol dari inverter. Secara garis besar, metode untuk mengurangi torsi *cogging* berdasarkan struktur motor yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Pada tugas akhir ini metode yang digunakan untuk mengurangi torsi *cogging* fokus pada menggunakan metode mengubah struktur bagian motor seperti lebar *slot stator*, lebar *opening slot stator*, dan lebar celah udara antara *stator* dan *rotor* (Cahyadi, 2018).

Torsi elektromagnetik dapat dihitung secara analitik atau secara numerik dalam berbagai cara, seperti dengan *Maxwell Stress* dan metode *co-energy*. Namun, mereka membutuhkan sangat akurat solusi lapangan global dan lokal, terutama untuk penentuan torsi *cogging*. Dengan kata lain, level tinggi diskritisasi mesh diperlukan dalam kalkulasi elemen hingga, sementara model fisik yang baik penting untuk prediksi analitik. Penulis telah menggunakan berbagai teknik analitik untuk memprediksi torsi *cogging* dalam topologi mesin magnet permanen di mana magnet dipasang berdekatan ke celah udara. Baru-baru ini, mereka memperluas analitik model untuk menyelesaikan distribusi medan magnet di daerah magnet/celah udara/*slot* gabungan, meskipun dengan asumsi *slot* berbentuk persegi panjang. Ini

memberikan alat analisis yang sangat baik untuk memprediksi torsi *cogging*, dan mendukung investigasi yang dijelaskan dalam makalah ini. Secara umum, ini mampu mengukur efek dari parameter desain berikut:

- a) Nomor *slot* dan kombinasi nomor tiang, termasuk gigi bantu dan *slot*.
- b) Lebar bukaan celah, panjang celah udara, dan ketebalan magnet.
- c) Rasio kutub-kutub magnet terhadap *pitch*-kutub.
- d) Distribusi magnetisasi, yang dapat berkisar dari reguler untuk trapesium.
- e) Kemiringan *slot* atau magnet.
- f) *Disposition magnetic*.

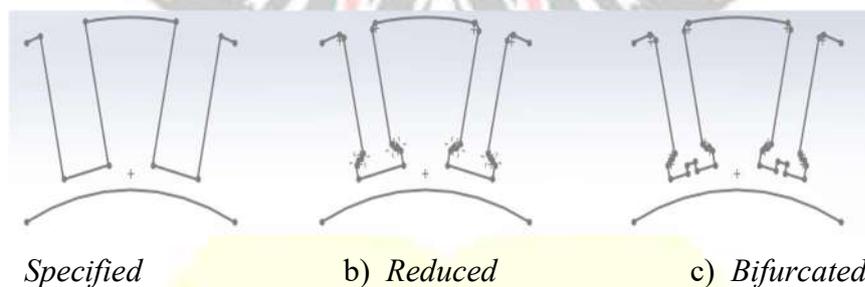
(Zhu, 2000)



Gambar 2. 4 Metode mengurangi torsi *cogging* (Cahyadi, 2018)

2.5.1 Lebar Gigi Slot Stator

Salah satu metode dalam mengurangi torsi *cogging* motor *BLDC* yaitu pengurangan gigi *slot stator*. Gambar 2.5 (a), *slot stator* asli telah ditunjukkan. Di hal ini, variasi keengganan sehubungan dengan *rotor*. Rotasinya besar dan torsi *cogging* yang dihasilkan juga sangat tinggi besar. Besarnya torsi *cogging* tergantung pada variasi keengganan lebar gigi *slot stator*. Gambar 2.5 (b), lebar *slot* dikurangi. Dalam hal ini jaring jumlah besi yang *PM rotor* berkurang dan gaya tarik antara gigi *stator* dan *rotor PM* menurun. Ini mengurangi torsi *cogging*. Jumlah bersih torsi *cogging* berkurang dalam metode ini rendah. Gambar 2.5 (c), gigi *stator* bercabang dua. Ini membantu mempertahankan perubahan keengganan celah udara konstan putaran *rotor*. Oleh karena itu torsi *cogging* dikurangi menjadi jumlah yang lebih kecil hampir 40% jika dibandingkan dengan rancangan awal. Hasil percabangan ini dapat mengurangi efisiensi 2% (Babu, 2015). *PM rotor* dan *slot stator* memiliki torsi *cogging*. Torsi dihasilkan oleh variasi posisi relatif dari magnet permanen yang dipasang di *rotor* dan *slot stator*. Torsi *cogging* adalah komponen riak utama dari torsi yang dihasilkan oleh motor. Torsi *cogging* tidak diinginkan karena bisa menghasilkan riak dan getaran (Chen, 2012).



Gambar 2. 5 Metode mengurangi *slot* dan *opening slot stator* (Babu, 2015)

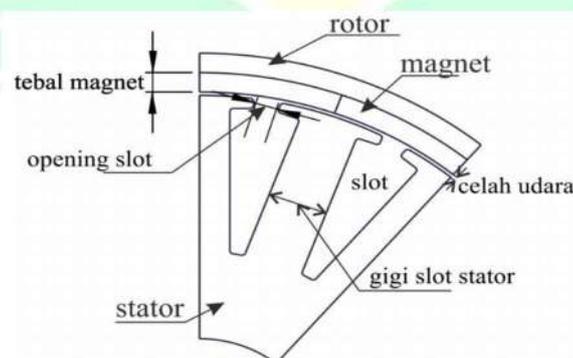
2.5.2 Lebar Opening Slot Stator

Pembukaan slot memiliki dampak efektif pada *cogging* torsi. Lebar *opening slot stator* ditunjukkan pada Gambar 2.6. Dari torsi *cogging* dihasilkan oleh interaksi antara *stator* gigi dan medan magnet *rotor*, lebar *opening slot stator* berdampak signifikan pada fenomena ini. Bahkan, *BEMF* bergantung pada celah udara distribusi kerapatan *fluks*. Oleh karena itu, maka lebar celah bukaan *slot*-nya harus dipilih dengan sangat hati-hati untuk mengoptimalkan desain mesin.

Umumnya torsi *cogging* dan gelombang harmonik dari *BEMF* berkurang karena *opening slot stator* menjadi lebih kecil. Karena pengaruh *opening slot stator* berliku dapat menambah biaya manufaktur, pilihan lebar optimal adalah *trade-off* antara biaya dan kinerja. *Opening slot stator* tidak boleh minimum, ini dapat menyebabkan masalah untuk pendinginan dan pembebanan terukur tidak bisa dikenakan. Dan juga seharusnya tidak lebih, karena ini menyebabkan torsi *cogging* meningkatkan. Simulasi dilakukan untuk berbagai kasus *opening slot stator* untuk melakukan *trade off* dalam pengurangan torsi *cogging* maksimum (Babu, 2015).

2.5.3 Lebar Celah Udara

Torsi *cogging* merupakan efek yang ditimbulkan oleh adanya interaksi antara magnet permanen yang terletak pada bagian *rotor* dengan gigi *stator* yang terbuat dari lapisan besi berlaminasi. Antara magnet permanen dan *stator* terdapat pemisah berupa udara untuk mencegah keduanya untuk bergesekan. Pemisah ini biasa disebut dengan celah udara atau *air gap*, lebar celah udara ditunjukkan pada Gambar 2.6. Besarnya celah udara antara magnet dan *stator* juga sangat mempengaruhi besarnya reluktansi yang berakibat pada perbedaan besar torsi *cogging*. Semakin besar jarak celah udara, maka *BEMF* motor akan semakin kecil, torsi *rms* menurun, daya maksimum motor menurun, dan torsi *cogging* menurun. Pemilihan celah udara yang terlalu kecil akan menimbulkan torsi *cogging* besar, namun apabila jarak yang dipilih terlalu besar menyebabkan energi yang dapat diterima tidak maksimal. Perubahan celah udara akan berpengaruh terhadap besarnya reluktansi celah udara dan fluks celah udara. Akibatnya besar torsi *cogging* juga dipengaruhi oleh lebar celah udara (Cahyadi, 2018).



Gambar 2. 6 Parameter desain motor *BLDC* (Cahyadi, 2018)

2.6 *Ansys Motor-CAD*

Ansys Motor-CAD adalah perangkat lunak desain motor listrik khusus terkemuka di dunia untuk simulasi multi fisika mesin listrik kecepatan dan torsi. Evaluasi topologi dan konsep motor di seluruh rentang operasi dan menghasilkan desain yang dioptimalkan untuk ukuran, kinerja, dan efisiensi. *Motor software CAD* empat modul terintegrasi *EMag*, *Therm*, *Lab* dan *Mech*. melakukan multi fisika perhitungan dengan cepat dan berulang, sehingga pengguna dapat beralih dari konsep ke desain akhir dengan lebih cepat waktu. Dengan siklus pengembangan yang menurun, desainer motor perlu membuat keputusan desain dengan cepat, dan dengan kepastian bahwa mereka tidak akan menghadapi masalah di kemudian hari. Cepat perhitungan dan proses input data yang efisien memberikan waktu bagi pengguna *Motor-CAD* mengeksplorasi lebih banyak topologi motorik dan menilai sepenuhnya dampak dari efek kerugian lanjutan di tahap awal sebuah desain. Perangkat lunak *Motor-CAD* yang intuitif, penyiapan berbasis template dan multi fisika termasuk keahlian menyederhanakan proses desain dan mengurangi ketergantungan pada banyak tim untuk pengalaman elektromagnetik, termal atau mekanis tertentu, sehingga perancang motor bisa lebih mengontrol desain sendiri (ANSYS, 2020).

2.7 Penelitian Terdahulu

Pelaksanaan penelitian diperlukan pengkajian terhadap penelitian sebelumnya agar dapat dijadikan referensi. Data penelitian sebelumnya dapat digunakan penelitian sebelumnya untuk dioptimalkan. Penelitian terdahulu yang dapat dijadikan referensi dalam desain pengaruh lebar *slot stator*, lebar *opening slot stator*, dan lebar celah udara ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1	Z. Q. Zhu (2000)	<p>Metode : Mengubah ukuran <i>opening slot stator</i>.</p> <p>Variabel : <i>Opening slot stator</i></p> <p>Hasil : Penelitian ini menjelaskan ukuran <i>opening slot stator</i>, semakin lebar ukuran <i>opening slot stator</i> maka akan semakin besar nilai torsi <i>cogging</i> dan semakin kecil ukuran <i>opening slot stator</i> maka semakin kecil nilai torsi <i>cogging</i>-nya. Saat lebar <i>opening slot stator</i> 1 mm maka nilai torsi <i>cogging</i>-nya 0,111 Nm. Saat lebar <i>opening slot stator</i> 1,2 mm maka torsi <i>cogging</i>-nya 0,222 Nm. Nilai terbesar saat lebar <i>opening slot stator</i> 2 mm maka nilai torsi <i>cogging</i>-nya 0,889 Nm.</p>
2	S. Rashidaee, S. Asghar Gholamian (2011)	<p>Metode : Optimalisasi <i>Taguchi</i> sehingga dihasilkan parameter desain motor dengan torsi <i>cogging</i> yang lebih kecil dan riak torsi yang lebih kecil</p> <p>Variabel : lebar <i>opening slot stator</i>, ketebalan magnet, lebar celah udara, dan lebar <i>slot</i></p> <p>Hasil : Pada penelitian ini menggunakan 4 variabel yaitu, lebar <i>opening slot stator</i>, ketebalan magnet, lebar celah udara, dan lebar <i>slot</i> dengan setiap variabel memiliki 3 level variasi ukuran yang berbeda. Pada penelitian ini sebelum dioptimalisasi nilai torsi <i>cogging</i> 3,529 Nm dan. Setelah dilakukan optimalisasi pada motor <i>radial BLDC V-Type PM</i> nilai torsi <i>cogging</i> menurun 37,96 % menjadi 2,189 Nm.</p>
3	G. Suresh Babu, T. Murali Krishna, B. Vikram Reddy (2015)	<p>Metode : Pengurangan <i>bifurcation</i> dan <i>opening slot stator variation</i>.</p> <p>Variabel : <i>Slot stator</i> dan <i>opening slot stator</i></p>

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
4	Miquel Tost Candel (2016)	<p>Hasil : Penelitian ini menjelaskan penggunaan pengurangan <i>bifurcation</i> dan <i>opening slot stator variation</i>, sehingga dihasilkan parameter desain motor dengan torsi <i>cogging</i> yang lebih kecil dan riak torsi yang lebih kecil. Pada penelitian ini menggunakan 2 variabel yaitu, lebar gigi <i>slot stator</i> dan lebar <i>opening slot stator</i>. Pada lebar gigi <i>slot stator</i> memiliki 3 level berbeda, sedangkan pada lebar <i>opening slot stator</i> memiliki 5 level berbeda. Pada level 1 <i>opening slot stator</i> didapatkan efisiensi yang tertinggi yaitu 89,19 % meningkat 1,3 % dari 87,89 % sedangkan torsi <i>cogging</i>nya memiliki penurunan tertinggi -76,83 % dari 7,7e-4 Nm menjadi 1,8e-4 Nm. Pada level 3 gigi <i>slot stator</i> didapatkan efisiensi yang tertinggi yaitu 90,33 % meningkat 2,7 % dari 87,89 % sedangkan torsi <i>cogging</i>nya memiliki penuruna tertinggi -23,93 % dari 7,7e-4 Nm menjadi 5,91e-4 Nm.</p> <p>Metode : Mengubah ukuran gigi <i>stator slots</i>.</p> <p>Variabel : <i>Slot stator</i></p> <p>Hasil : Pada penelitian menggunakan variabel lebar gigi <i>slot stator</i>. Pada masing- masing variabel ini memiliki 11 level berbeda. Pada level ke-11 dengan lebar gigi <i>slot stator</i> 7 mm didapatkan torsi <i>cogging</i> terendah yaitu 0,9 %. Pada level ke-1 dengan lebar gigi <i>slot stator</i> 5 mm didapatkan torsi <i>cogging</i> tertinggi yaitu 1,3 %.</p>
5	Arief Cahyadi (2019)	<p>Metode : Optimalisasi <i>Taguchi</i> sehingga dihasilkan parameter desain motor dengan torsi <i>cogging</i> yang lebih kecil dan riak torsi yang lebih kecil</p> <p>Variabel : Lebar <i>opening slot stator</i>, ketebalan magnet, lebar celah udara, dan lebar <i>slot</i></p>

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
		<p>Hasil : Penelitian ini menjelaskan penggunaan metode optimalisasi <i>Taguchi</i> sehingga dihasilkan parameter desain motor dengan torsi <i>cogging</i> yang lebih kecil dan riak torsi yang lebih kecil. Pada penelitian ini menggunakan 4 variabel yaitu, lebar <i>opening slot stator</i>, ketebalan magnet, lebar celah udara, dan lebar <i>slot</i> dengan setiap variabel memiliki 5 level yang berbeda. Pada penelitian ini sebelum dioptimalisasi nilai torsi <i>cogging</i> 0,549 Nm dan efisiensi 83,31%. Setelah dilakukan optimalisasi pada motor <i>radial BLDC</i> 1 Watt nilai torsi <i>cogging</i> menurun 39,12 % menjadi 0,334 Nm dan nilai efisiensi meningkat 8,76% menjadi 92,07%.</p>

