

## **PENGOPTIMALAN TORSI DAN EFISIENSI PADA REDESAIN MOTOR BRUSHLESS DC HOVERBOARD BERDAYA DASAR 350W**

I Wayan Adiyasa\*

Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta

\*Corresponding Author: iwayanadiyasa@uny.ac.id

### **Abstract**

*In the future, hoverboards are becoming a widely used means of transportation because they are compact and more practical. The hoverboard is driven by an electric motor with a fairly low power. This paper focuses on the optimization of the hoverboard BLDC motor design. The focus of the design is done by changing the stator slot depth, stator tooth width, number of strands in hand, and number of turns by keeping the fill factor below 40%. Design optimization is carried out to obtain an increase in torque performance and efficiency which has an impact on the output power of the BLDC motor and the thermal increase that occurs. The research shows torque and efficiency improvisation on the redesign of the BLDC hoverboard motor with a power of 350W. The results of the study are comparisons of torque and efficiency from comparisons of electric motor designs. The resulting temperature is analyzed to see the effect of torque, power, and efficiency.*

*Key Words: bldc, efficiency, hoverboard, power, torque*

### **Abstrak**

Masa depan, hoverboard menjadi alat transportasi yang banyak digunakan karena ringkas dan lebih praktis. Hoverboard digerakan dengan menggunakan motor listrik dengan daya yang cukup rendah. Optimalisasi paper ini berfokus pada pengoptimalan desain motor BLDC hoverboard. Fokus desain dilakukan dengan mengubah slot depth stator, tooth width stator, jumlah strands in hand, dan jumlah lilitan dengan menjaga fill factor di bawah 40%. Pengoptimalan desain dilakukan untuk mendapatkan peningkatan performa torsi dan efisiensi yang berdampak pada daya luaran motor BLDC dan kenaikan suhu motor listrik. Hasil penelitian menunjukkan improvisasi torsi dan efisiensi pada redesign motor BLDC hoverboard dengan daya 350W. Hasil penelitian berupa perbandingan torsi dan efisiensi dari perbandingan desain motor listrik. Suhu dianalisis untuk melihat pengaruh torsi, power, dan efisiensi.

Kata Kunci: bldc, daya, efisiensi, hoverboard, torsi

## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi transportasi telah banyak berfokus pada kendaraan listrik. Kendaraan listrik diklaim menjadi kendaraan masa depan yang ramah lingkungan. Manufaktur motor listrik dikembangkan dengan pengoptimalan material dan desain motor. Motor sinkron magnet permanen (PMSM) dan motor *brushless* DC (BLDC) digunakan diberbagai alat transportasi. Geometri yang umum digunakan pada kedua jenis motor adalah posisi rotor berada di dalam stator (*inner rotor*) dan rotor berada di luar stator (*outer rotor*). Desain rotor pada umumnya terdapat magnet dengan konstruksi magnet permanen interior (IPM) dan magnet permanen permukaan (SPM) (Purwanto et al., 2017). Masing-masing desain rotor memiliki keunggulan yang menyesuaikan dengan kebutuhan pengguna motor listrik.

*Hoverboard* menjadi alat transportasi *portable* yang dapat digunakan oleh 1 orang. Masa depan, *hoverboard* menjadi alat transportasi yang banyak digunakan karena ringkas dan lebih praktis. *Hoverboard* digerakan dengan menggunakan motor listrik dengan daya yang cukup rendah. Penggunaan motor listrik yang tidak terlalu besar, berdampak pada penggunaan baterai dengan kapasitas yang tidak terlalu besar. Hal ini sangat memudahkan *hoverboard* dibawa kemana-mana. Motor listrik *hoverboard* pada umumnya menggunakan BLDC dengan geometri *outer rotor* SPM. Motor BLDC digunakan sebagai roda untuk menggerakkan *hoverboard*.

Penelitian peningkatan torsi pada motor menjadi isu yang masih sangat menarik. Hal tersebut berdampak pada akselerasi dan efisiensi motor listrik (Crider & Sudhoff, 2015; Xie et al., 2019; Yoon et al., 2015). Penelitian peningkatan torsi dilakukan pada berbagai jenis desain motor. Selain penelitian tentang torsi, penelitian tentang kecepatan motor dan efisiensi motor juga dilakukan (Hairul et al., 2020; Ren et al., 2015). Peningkatan kecepatan dan efisiensi motor memiliki dampak yang cukup signifikan terhadap konsumsi energi listrik (Abdolamir Nekoubin, 2011). Semakin besar efisiensi pada motor listrik, kenaikan suhu pada motor listrik dapat diredam. Hal tersebut berdampak pada usia penggunaan motor listrik. Penelitian vibrasi motor dilakukan untuk mendapatkan performa optimal motor listrik (Zhang et al., 2020).

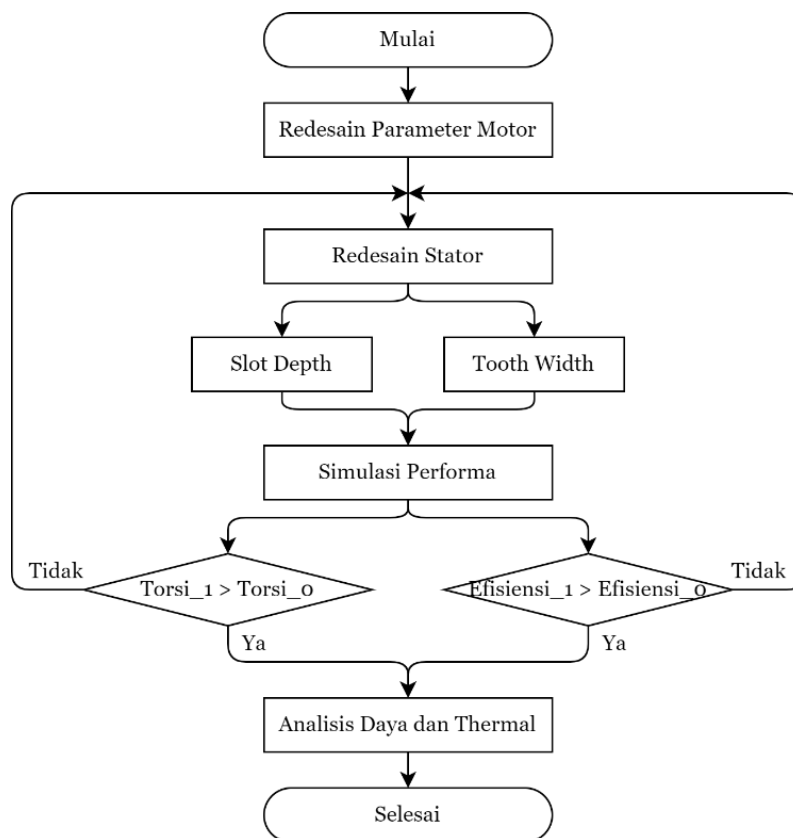
Penelitian terkait desain dilakukan untuk mendapatkan riak torsi yang tidak terlalu besar (Zhentao S. Du & Thomas A. Lipo, 2018). Besar riak torsi berdampak pada penurunan efisiensi pada motor listrik. Desain geometri yang diteliti meliputi rekonstruksi desain rotor (Ghadamyari et al., 2017; Lim et al., 2015; Yamazaki et al., 2013), rekonstruksi desain stator (Abdolamir Nekoubin, 2011; Han et al., 2015) atau melakukan analisis dan rekonstruksi rotor dan stator motor listrik (Yu et al., 2013). Perbedaan kegunaan motor listrik, berdampak pada perbedaan desain rotor dan stator pada motor listrik (He & Wu, 2018; Ren et al., 2015). Selain penelitian mengenai mekanik motor listrik, penelitian sistem kendali pada motor listrik

dilakukan untuk mendapatkan performa yang optimum (Haute et al., n.d.; Liu et al., 2016).

Penelitian sebelumnya belum membahas analisis performa pada motor listrik untuk *hoverboard* berdaya rendah. Paper ini berfokus pada pengoptimalan desain motor BLDC untuk aplikasi *hoverboard*. Fokus desain dilakukan dengan mengubah *slot depth* stator, *tooth width* stator, jumlah *strands in hand*, dan jumlah lilitan dengan menjaga *fill factor* di bawah 40%. Pengoptimalan desain dilakukan untuk mendapatkan peningkatan performa torsi dan efisiensi yang berdampak pada daya luaran motor BLDC dan kenaikan suhu motor listrik yang terjadi. Optimasi pada paper dilakukan untuk meningkatkan performa pada motor listrik untuk aplikasi *hoverboard* dengan daya rendah.

**METODE**

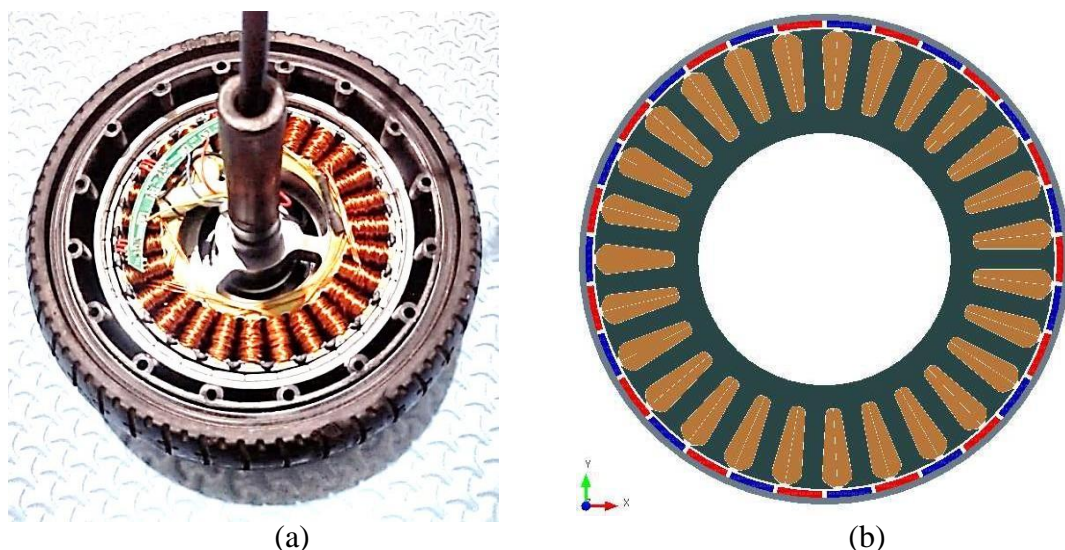
Metode penelitian pada paper ini berfokus pada optimasi desain melalui simulasi. Parameter desain awal motor BLDC dimasukan ke dalam simulasi. Simulasi dijalankan untuk mendapatkan parameter torsi, daya, putaran maksimal, analisis panas, cogging, back EMF, dan efisiensi motor BLDC. Gambar 1 menunjukkan prosedur pelaksanaan penelitian. Penelitian dimulai dengan membuat desain ulang (redesain) motor BLDC *hoverboard*.



Gambar 1. Diagram Prosedur Penelitian

Proses redesain motor BLDC *hoverboard* dilakukan dengan menyesuaikan parameter fisik motor. Proses redesain meliputi penyesuaian diameter rotor, diameter stator, jumlah kutub, jumlah *slot*, ketebalan *stack*, jumlah lilitan, ukuran kabel, serta beberapa parameter. Penelitian ini, desain rotor tidak dilakukan perubahan, desain stator dilakukan perubahan dengan mengubah nilai kedalaman *slot* (*slot depth*) dan lebar *tooth* (*tooth width*). Perubahan kedalaman *slot* dilakukan dengan rentan 16 - 18 mm dengan perubahan nilai 0,25 mm. Perubahan lebar *tooth* dilakukan dengan rentan 3 - 5 mm dengan perubahan nilai 0,25 mm. Perubahan parameter ini dilakukan melalui tahap optimasi dengan simulasi optimasi. Tahap tersebut meliputi simulasi dengan peningkatan torsi dan efisiensi secara bertahap berdasarkan perubahan kedalaman *slot* dan lebar *tooth*.

Jika nilai torsi hasil simulasi ( $torsi\_1$ ) lebih besar dibanding torsi desain dasar ( $torsi\_0$ ), maka desain tersebut dapat digunakan sebagai hasil peningkatan torsi. Jika nilai  $torsi\_1$  lebih kecil dibanding  $torsi\_0$ , maka desain tersebut tidak digunakan dalam hasil peningkatan torsi. Untuk berikutnya dilakukan analisis daya dan *thermal* pada desain motor BLDC *hoverboard* berdasarkan peningkatan torsi. Jika nilai efisiensi hasil simulasi ( $efisiensi\_1$ ) lebih besar dibanding efisiensi desain dasar ( $efisiensi\_0$ ), maka desain tersebut dapat digunakan sebagai hasil peningkatan efisiensi. Jika nilai  $efisiensi\_1$  lebih kecil dibanding  $efisiensi\_0$ , maka desain tersebut tidak digunakan dalam hasil peningkatan efisiensi. Untuk berikutnya dilakukan analisis daya dan *thermal* pada desain motor BLDC *hoverboard* berdasarkan peningkatan efisiensi.



Gambar 2. (a) Motor Listrik Hoverboard, (b) Geometri Motor BLDC Hoverboard 350W

Gambar 2(a) menunjukkan motor listrik *hoverboard* yang banyak digunakan, Gambar 2(b) menunjukkan geometri motor BLDC *hoverboard* 350W dengan parameter yang telah disesuaikan. Parameter pada motor BLDC *hoverboard* meliputi pengaturan diameter, ketebalan

motor, jumlah kutub, jumlah *slot*, dan lainnya. Tabel 1 menunjukkan parameter desain motor BLDC *hoverboard* dengan daya 350W.

Tabel 1. Parameter Desain Baseline Motor BLDC Hoverboard 350W

No	Parameter	Nilai
1.	Tegangan suplai (V)	36
2.	Arus rerata (A)	10
3.	Kecepatan rerata (rpm)	600
4.	Diameter terluar (mm)	110
5.	Ketebalan gap udara (mm)	0,5
6.	Tinggi Stack (mm)	16
7.	Lokasi rotor	Exterior
8.	Jumlah kutub	30
9.	Jumlah slots	27
10.	Sudut magnet (°)	11
11.	Ketebalan magnet (mm)	1,5
12.	Kedalaman <i>slot</i> (mm)	18
13.	Lebar pembukaan <i>slot</i> (mm)	2
14.	Lebar <i>tooth</i> (mm)	4,5
15.	Ukuran kabel (AWG)	24
16.	Jumlah <i>strands in hand</i>	3
17.	Jumlah lilitan	28
18.	<i>Fill factor</i> (%)	39,39

Karakteristik performa *baseline* motor listrik *hoveboard* didapatkan melalui pendekatan analisis simulasi berdasarkan parameter desain *baseline*. Tabel 2 menunjukkan hasil analisis desain *baseline* berdasarkan hasil simulasi.

Tabel 2. Analisis Performa pada Desain Baseline

No	Parameter	Nilai
1.	Torsi (N·m)	7,80
2.	Riak torsi RMS (N·m)	0,07
3.	Daya masuk (kW)	0,76
4.	Daya keluar (kW)	0,65
5.	Efisiensi (%)	85,55
6.	Tegangan RMS <i>line to line</i> (V)	49,18
7.	Arus RMS (A)	10,00
8.	Kepadatan arus RMS (A/mm <sup>2</sup> )	16,28
9.	Faktor daya	0,89

Torsi yang diperoleh setelah melakukan simulasi sebesar 7,80 N.m, dengan riak torsi sebesar 0,07 N.m. Hasil simulasi untuk daya masukan didapatkan nilai sebesar 760 W dan daya luaran didapatkan nilai sebesar 650 W. Sehingga, besar efisiensi dari simulasi desain *baseline* sebesar 85,55%. Tegangan *root means square* (RMS) antar phase didapatkan sebesar 49,18 V dengan arus RMS sebesar 10 A untuk kepadatan arus lilitan sebesar 16,28 A/mm<sup>2</sup>. Faktor daya pada desain *baseline* sebesar 0,89. Data yang ditampilkan pada Tabel 2, digunakan untuk menentukan nilai dari torsi<sub>0</sub> dan efisiensi 0.

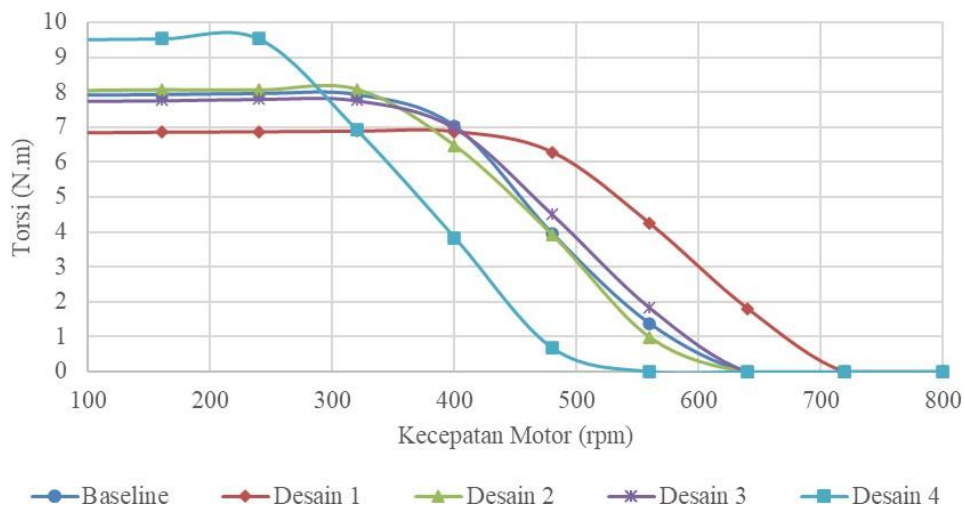
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

Tabel 3 menunjukkan parameter stator yang diubah. Nilai parameter meliputi kedalaman *slot* stator (V1), lebar *tooth* (V2), ukuran kabel (V3), jumlah *strand in hand* pada lilitan (V4), jumlah lilitan (V5), dan *fill factor* pada *slot* stator dengan nilai di bawah 40%. Desain 1 menunjukkan parameter V2 dan V3 yang lebih besar, sehingga jumlah V4 dan V5 menjadi lebih kecil dibanding desain 2, 3, dan 4. Desain 4 menunjukkan keterbalikan dari parameter V2 dan V3, sehingga jumlah V4 dan V5 menjadi lebih banyak.

Tabel 3. Perubahan Parameter Stator pada Desain Motor BLDC *Hoverboard*

Desain	V1 (mm)	V2 (mm)	V3 (AWG)	V4	V5	V6 (%)
1	16,25	5,0	24	3	23	39,61
2	16,25	5,0	26	4	27	38,99
3	16,25	4,0	24	3	27	38,75
4	16,25	4,0	26	4	33	29,71



Gambar 3. Perbandingan Torsi dengan Kecepatan Masing-masing Desain

Gambar 3 menunjukkan grafik performa torsi berdasarkan masukan parameter V1, V2, V3, V4, dan V5 pada masing-masing desain. Hasil pada desain 1 memiliki luaran torsi yang lebih rendah dibandingkan desain *baseline*, tetapi kecepatan pada desain 1 lebih tinggi. Luaran desain 1 berbanding terbalik dibanding desain 4. Dimana, desain 4 memiliki luaran torsi yang lebih tinggi dibandingkan desain *baseline*, tetapi kecepatan pada desain 4 lebih rendah.

Tabel 4 menunjukkan nilai kecepatan dan torsi pada masing-masing desain. Pada desain *baseline* menunjukkan pada kecepatan 240 rpm, torsi puncak yang dihasilkan sebesar 7,95 N.m. Desain 1 menunjukkan pada kecepatan 320 rpm, torsi puncak yang dihasilkan sebesar 6,89 N.m.

Desain 2 menunjukkan pada kecepatan 320 rpm, torsi puncak yang dihasilkan sebesar 8,09 N.m. Desain 3 menunjukkan pada kecepatan 240 rpm, torsi puncak yang dihasilkan sebesar 7,81 N.m. Desain 4 menunjukkan pada kecepatan 160 rpm, torsi puncak yang dihasilkan sebesar 9,54 N.m. Berdasarkan data kecepatan dan torsi tersebut menunjukkan desain 2 merupakan desain yang optimal dibandingkan desain *baseline* dan lainnya. Dimana, kecepatan dan torsi pada desain 2 lebih tinggi dibanding desain *baseline*.

Tabel 4. Perbandingan Torsi Setiap Desain

Kecepatan (rpm)	Baseline	Desain 1	Desain 2	Desain 3	Desain 4
80	7,9	6,84	8,05	7,75	9,51
160	7,92	6,86	8,08	7,77	9,54
240	7,95	6,87	8,07	7,81	9,53
320	7,92	6,89	8,09	7,77	6,92
400	7,02	6,88	6,48	6,98	3,84
480	3,95	6,29	3,92	4,5	0,68
560	1,38	4,24	0,99	1,82	0
640	0	1,81	0	0	0

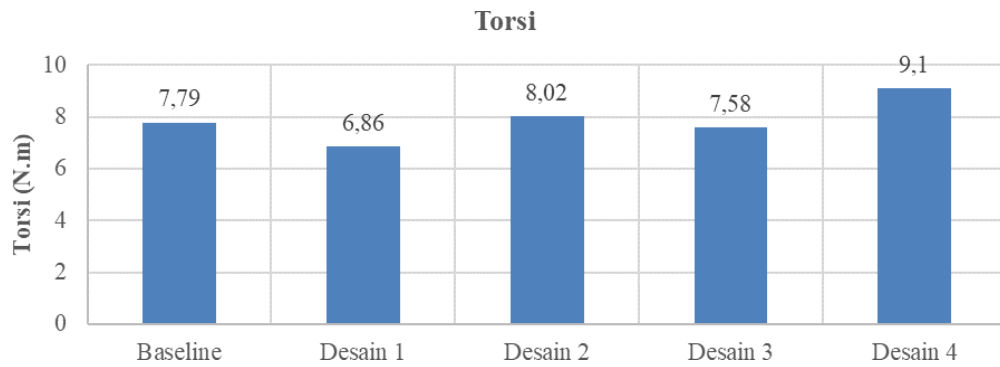
## Pembahasan

### *Performa Torsi dan Kecepatan*

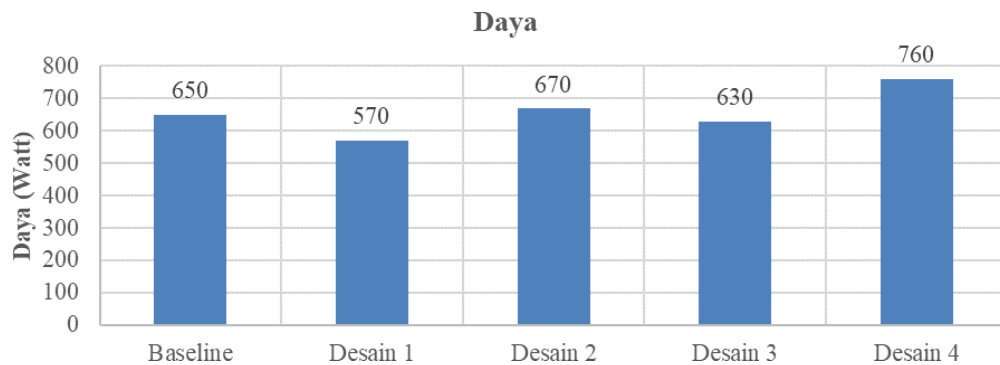
Gambar 5 menunjukkan data perbandingan performa desain motor BLDC untuk *hoverboard*. Desain *baseline* menghasilkan rerata torsi sebesar 7,79 N.m dengan daya luaran sebesar 650 W dan nilai efisiensi sebesar 85,55%.

Tabel 5. Perbandingan Performa Desain Motor BLDC *Hoverboard*

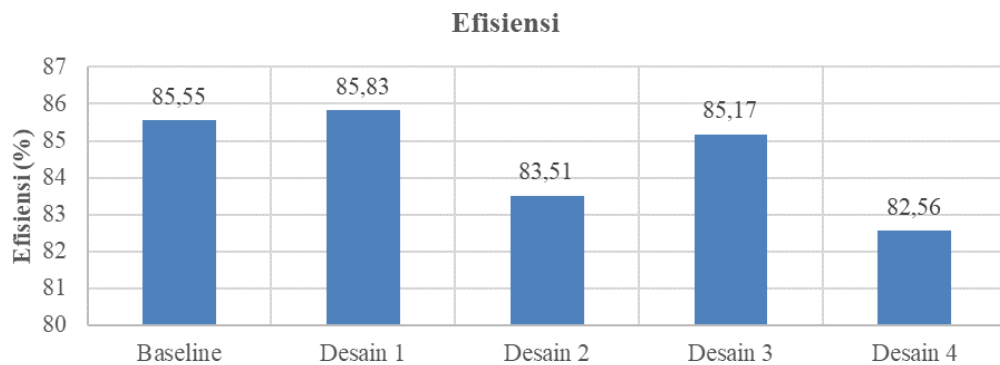
Design	<i>r</i> (N.m)	<i>P</i> (w)	$\eta$ (%)
<i>Baseline</i>	7,79	650	85,55
Desain 1	6,86	570	85,83
Desain 2	8,02	670	83,51
Desain 3	7,58	630	85,17
Desain 4	9,10	760	82,56



Gambar 4. Perbandingan Performa Torsi



Gambar 5. Perbandingan Performa Daya Puncak



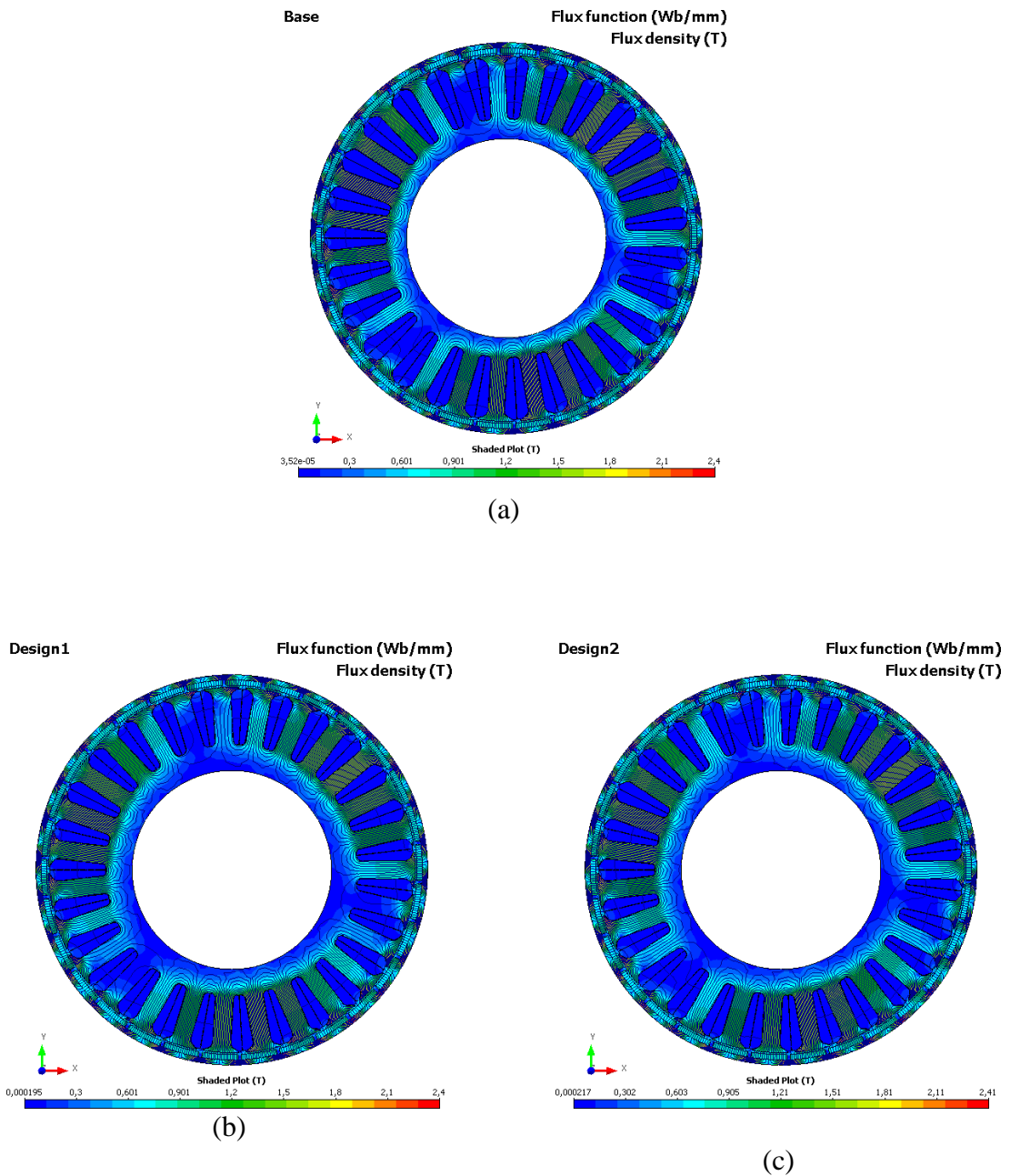
Gambar 6. Perbandingan Performa Efisiensi

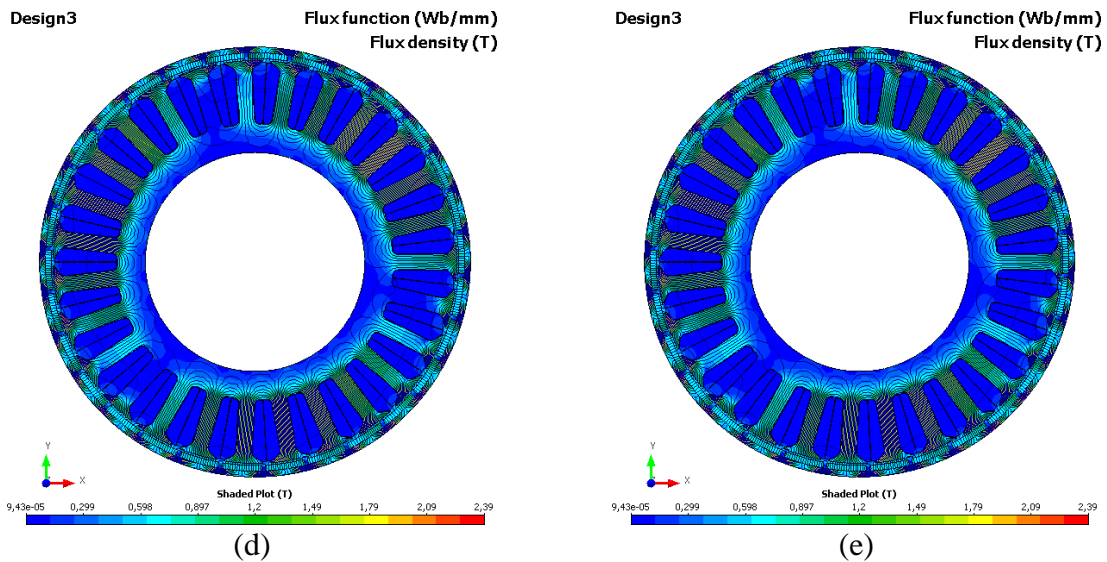
Desain 1 menghasilkan rerata torsi sebesar 6,86 N.m dengan daya luaran sebesar 570 W dan nilai efisiensi sebesar 85,83%. Desain 2 menghasilkan rerata torsi sebesar 8,02 N.m dengan daya luaran sebesar 670 W dan nilai efisiensi sebesar 83,51%. Desain 3 menghasilkan rerata torsi sebesar 7,58 N.m dengan daya luaran sebesar 630 W dan nilai efisiensi sebesar 85,17%. Desain 4 menghasilkan rerata torsi sebesar 9,10 N.m dengan daya luaran sebesar 760 W dan nilai efisiensi sebesar 82,56%. Perbandingan torsi dan daya terbesar terlihat pada desain 4 dan torsi terendah terlihat pada desain 1. Sedangkan perbandingan efisiensi terbesar terlihat pada desain 1 dan efisiensi terendah pada desain 4.



Perbandingan Flux Motor

Gambar 7 menunjukkan aliran *flux* magnet pada stator dan rotor yang terjadi motor BLDC untuk desain *baseline*, 1, 2, 3, dan 4. Gambar 7(a) dan 7(b) menunjukkan aliran *flux* magnet pada stator dan rotor untuk desain *baseline* dan 1 sebesar 2,40 T.

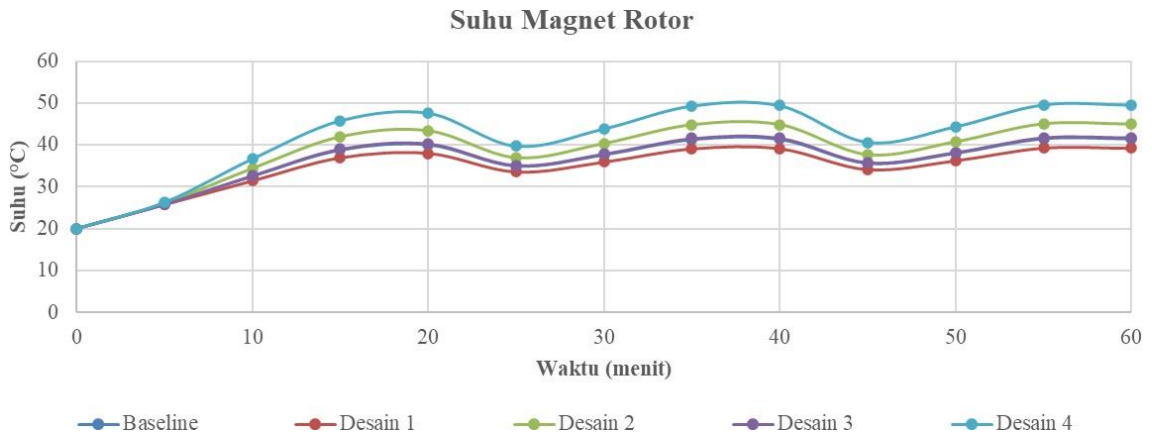




(d) (e)  
 Gambar 7. (a) Simulasi Flux Baseline, (b) Simulasi Flux Desain 1, (c) Simulasi Flux Desain 2, (d) Simulasi Flux Desain 3, (e) Simulasi Flux Desain 5

Gambar 7(c) menunjukkan aliran flux magnet pada stator dan rotor untuk desain 2 sebesar 2,41 T, Gambar 7(d) dan 7(e) menunjukkan aliran flux magnet pada stator dan rotor untuk desain 3 dan 4 sebesar 2,39 T.

Perbandingan Thermal



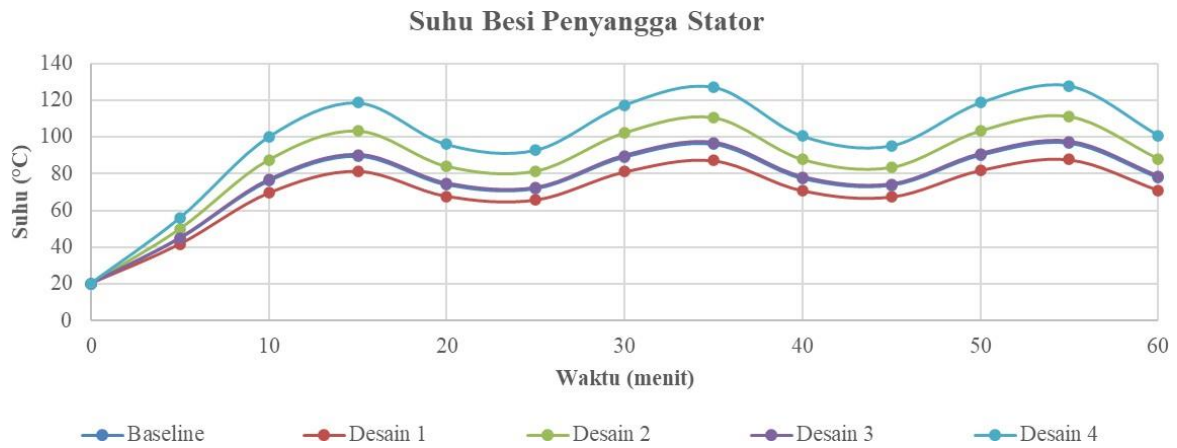
Gambar 8. Suhu Magnet Rotor Motor BLDC Hoverboard Selama 60 Menit

Tabel 6. Perbandingan Suhu Magnet Rotor pada Masing-masing Desain

Waktu (Menit)	Suhu (°C)												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Baseline	20	25,8	32,5	38,8	40,1	35	37,7	41,3	41,4	35,6	38	41,5	41,5
Desain 1	20	25,7	31,4	37,0	38,0	33,5	35,9	39,1	39,1	34,1	36,2	39,3	39,2
Desain 2	20	26,1	34,4	42,0	43,4	36,9	40,4	44,8	44,8	37,7	40,8	45,0	45,0
Desain 3	20	25,8	32,7	39,0	40,3	35,1	37,9	41,6	41,6	35,8	38,2	41,8	41,8
Desain 4	20	26,3	36,7	45,8	47,6	39,7	43,9	49,3	49,4	40,6	44,4	49,6	49,5

Gambar 8 menunjukkan grafik kenaikan suhu magnet rotor pada masing-masing desain motor BLDC hoverboard saat dioperasikan selama 60 menit. Tabel 6 menunjukkan data

perbandingan kenaikan suhu pada magnet rotor motor BLDC *hoverboard* saat dioperasikan selama 60 menit. Pada grafik dan data menunjukkan desain 1 menghasilkan panas yang lebih rendah sebesar 39,2°C dibandingkan desain *baseline* sebesar 41,5°C, sedangkan desain 4 menghasilkan panas yang lebih tinggi sebesar 49,5°C dibandingkan desain *baseline*.



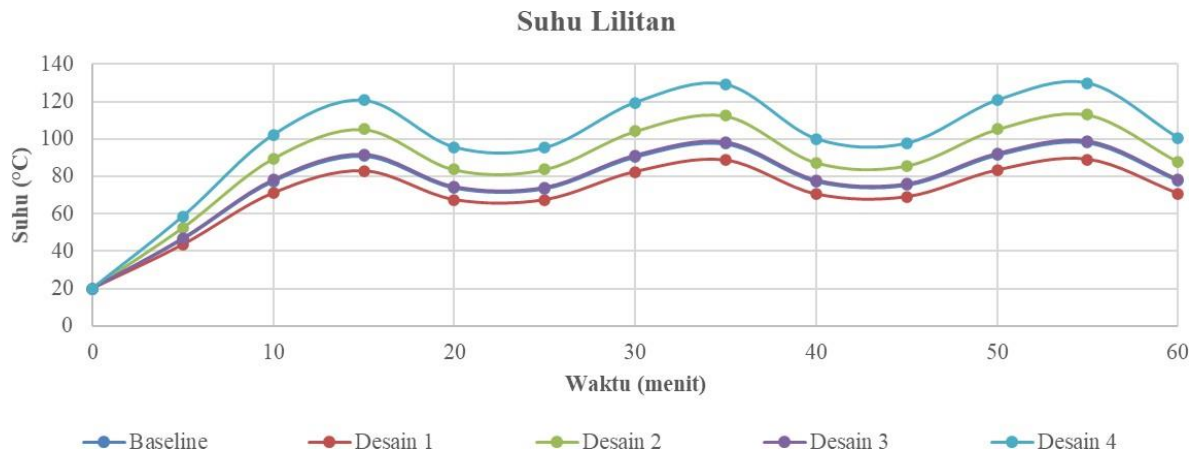
Gambar 9. Suhu Besi Penyangga Stator Motor BLDC *Hoverboard* Selama 60 Menit

Tabel 7. Perbandingan Suhu Besi Penyangga Stator pada Masing-masing Desain

Waktu (Menit)	Suhu (°C)												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Baseline</b>	20	44,6	76,0	89,6	74,0	71,9	89,2	96,2	77,5	73,8	90,2	96,8	77,8
<b>Desain 1</b>	20	41,5	69,5	81,4	67,7	65,7	81,0	87,2	70,7	67,3	81,9	87,7	71,0
<b>Desain 2</b>	20	49,7	87,4	103	83,9	81,2	102	110	87,6	83,3	103	111	88,0
<b>Desain 3</b>	20	44,8	76,6	90,3	74,7	72,3	89,8	96,9	78,2	74,2	90,8	97,5	78,5
<b>Desain 4</b>	20	55,7	99,9	119	95,9	92,8	117	127	100	95,2	119	128	101

Gambar 9 menunjukkan grafik kenaikan suhu besi penyangga stator pada masing-masing desain motor BLDC *hoverboard* saat dioperasikan selama 60 menit. Tabel 7 menunjukkan data perbandingan kenaikan suhu pada besi penyangga stator motor BLDC *hoverboard* saat dioperasikan selama 60 menit. Pada grafik dan data menunjukkan desain 1 menghasilkan panas yang lebih rendah sebesar 87,7°C dibandingkan desain *baseline* sebesar 96,8°C, sedangkan desain 4 menghasilkan panas yang lebih tinggi sebesar 128°C dibandingkan desain *baseline*. Suhu ini mampu merusak lapisan kabel enamel pada lilitan stator.

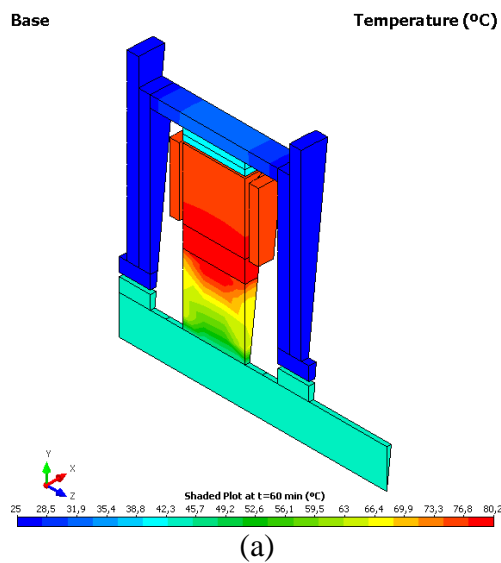
Gambar 10 menunjukkan grafik kenaikan suhu lilitan stator pada masing-masing desain motor BLDC *hoverboard* saat dioperasikan selama 60 menit. Tabel 8 menunjukkan data perbandingan kenaikan suhu pada lilitan stator motor BLDC *hoverboard* saat dioperasikan selama 60 menit. Pada grafik dan data menunjukkan desain 1 menghasilkan panas yang lebih rendah sebesar 89,0°C dibandingkan desain *baseline* sebesar 97,9°C, sedangkan desain 4 menghasilkan panas yang lebih tinggi sebesar 130°C dibandingkan desain *baseline*. Hal ini sangat berbahaya untuk kawat lilitan dan magnet yang berada di rotor.

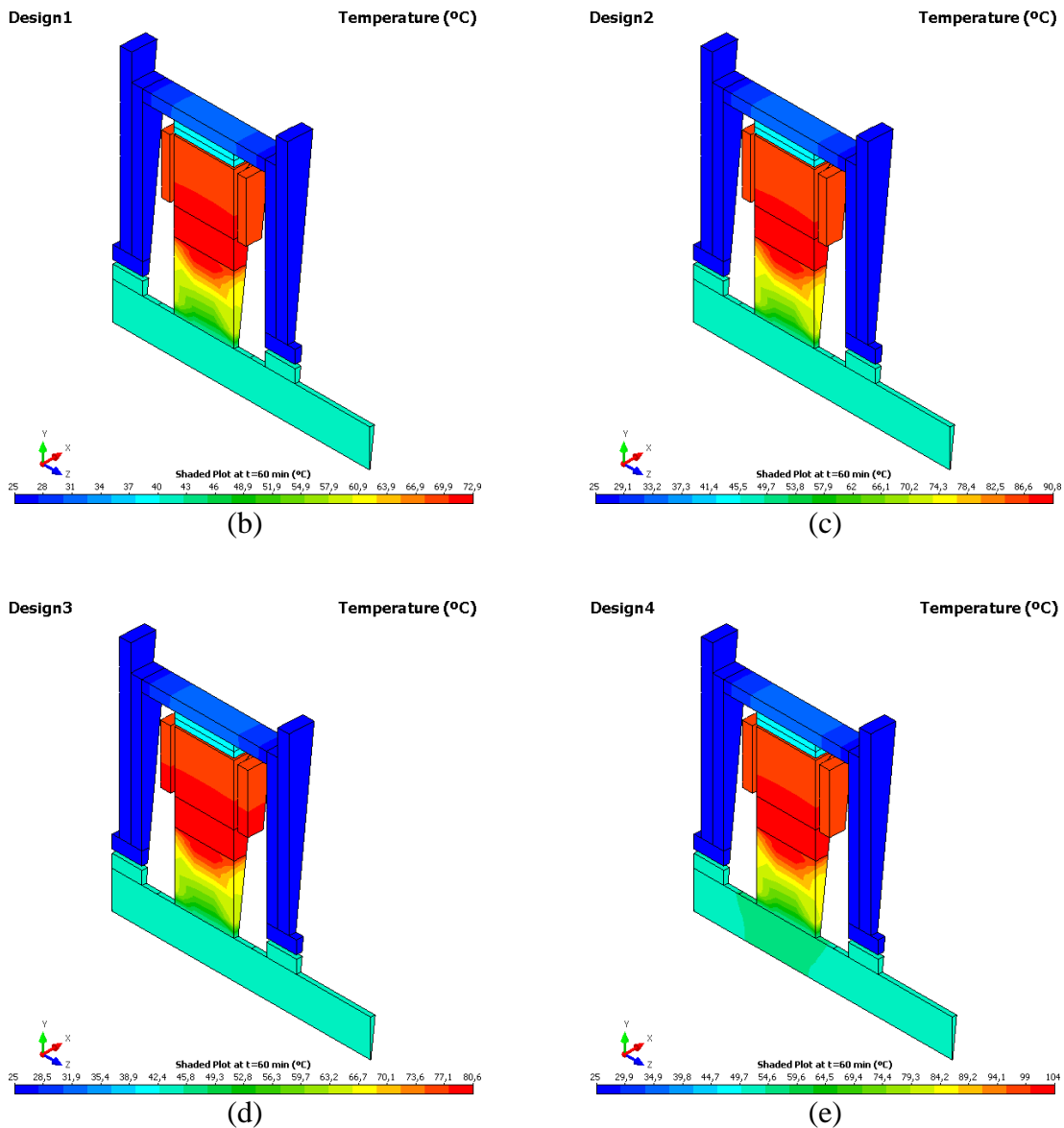


Gambar 10. Suhu Lilitan Stator Motor BLDC *Hoverboard* Selama 60 Menit

Tabel 8. Perbandingan Suhu Lilitan Stator pada Masing-masing Desain

Waktu (Menit)	Suhu (°C)												
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
<b>Baseline</b>	20	46,3	77,4	90,9	73,9	73,4	90,4	97,4	77,3	75,3	91,4	97,9	77,6
<b>Desain 1</b>	20	43,4	71,0	82,9	67,5	67,4	82,4	88,5	70,5	69,0	83,3	89,0	70,7
<b>Desain 2</b>	20	52,4	89,4	105	83,6	83,6	104	112	87,3	85,6	105	113	87,7
<b>Desain 3</b>	20	46,8	78,1	91,7	74,5	74,0	91,2	98,3	77,9	75,9	92,2	98,8	78,3
<b>Desain 4</b>	20	58,4	102	121	95,6	95,2	119	129	100	97,6	121	130	100





Gambar 11. (a) Simulasi *Thermal Baseline*, (b) Simulasi *Thermal* Desain 1, (c) Simulasi *Thermal* Desain 2, (d) Simulasi *Thermal* Desain 3, (e) Simulasi *Thermal* Desain 5

Gambar 11 menunjukkan hasil kenaikan suhu pada motor BLDC *hoverboard* selama 1 jam. Gambar 11(a) menunjukkan suhu tertinggi pada desain *baseline* motor BLDC sebesar  $80,2^{\circ}\text{C}$ , Gambar 11(b) menunjukkan kenaikan suhu tertinggi pada desain 1 motor BLDC sebesar  $72,9^{\circ}\text{C}$ , Gambar 11(c) menunjukkan kenaikan suhu tertinggi pada desain 2 motor BLDC sebesar  $90,8^{\circ}\text{C}$ , Gambar 11(d) menunjukkan kenaikan suhu tertinggi pada desain 3 motor BLDC sebesar  $80,6^{\circ}\text{C}$ , Gambar 11(e) menunjukkan kenaikan suhu tertinggi pada desain 4 motor BLDC sebesar  $104^{\circ}\text{C}$ . Berdasarkan data tersebut menunjukkan desain 1 menghasilkan panas yang lebih rendah dibandingkan desain *baseline*, sedangkan desain 1 menghasilkan panas yang lebih tinggi dibandingkan desain motor BLDC *hoverboard* lainnya.

## **SIMPULAN**

Hasil simulasi menunjukkan peningkatan performa torsi dan efisiensi. Perubahan parameter geometri pada stator motor BLDC menyebabkan terjadinya peningkatan performa. Perubahan dilakukan dengan mengubah parameter *slot depth* dan *tooth width* pada stator. Perubahan kedua parameter berdampak pada perubahan nilai *number of strands in hand* dan *number of turns* dengan menjaga *fill factor* kurang dari 40%. Hasil simulasi dari optimasi, didapatkan peningkatan torsi terbaik dengan melakukan perubahan *slot depth* dan *tooth width*, peningkatan efisiensi terbaik dilakukan dengan perubahan *slot depth* dan *tooth width*, peningkatan daya sebanding dengan perubahan *slot depth* dan *tooth width*. Perlu adanya analisis perubahan *skew* rotor dan stator untuk mengetahui peningkatan torsi, power, dan efisiensi.

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Ucapan terima kasih dan penghargaan terbesar ditujukan kepada Jurusan Pendidikan Otomotif FT UNY, Universiti Malaysia Pahang, dan PT. Autochem selaku sponsor dalam penelitian ini. Pendanaan penelitian ini bersumber dari penelitian Kerjasama Luar Negeri dan pihak sponsor. Pelaksanaan penelitian berlokasi di Laboratorium Kendaraan Listrik dan Hybrid UNY Kampus Wates.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Abdolamir Nekoubin. (2011). Design a Single-phase BLDC Motor and Finite Element Analysis of Stator Slots Structure Effects on the Efficiency. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering, 5(5), 685– 692.
- Crider, J. M., & Sudhoff, S. D. (2015). An Inner Rotor Flux-Modulated Permanent Magnet Synchronous Machine for Low-Speed High-Torque Applications. IEEE Transactions on Energy Conversion, 30(3), 1247–1254. <https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2412547>
- Ghadamyari, M. A., Moallem, M., & Fahimi, B. (2017). Improving the Torque Characteristics of Interior PM Synchronous Motor Using an Asymmetric On-Off Method on the Rotor Surface. Progress In Electromagnetics Research, 54, 55–65.
- Hairul, Markori, Indrawasih, & Yahya, S. (2020). Analysis of Performance Test and Consumption of BLDC 350 W Motor Power to Mechanical Vibration with Variation of Speed and Load Variation. Journal of Physics: Conference Series, 1500(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012014>

- Han, S.-R., Lee, K.-Y., & Jeong, B.-H. (2015). A Study On The Stator Slot Shape Design of BLDC Motor. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, 29(5), 41–49. <https://doi.org/10.5207/jieie.2015.29.5.041>
- Haute, S. van, Henneberger, S., Hameyer, K., Belmans, R., de Temmerman, J., & de Clercq, J. (n.d.). Design And Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for a Hybrid Electric Vehicle.
- He, C., & Wu, T. (2018). Permanent Magnet Brushless DC Motor and Mechanical Structure Design for the Electric Impact Wrench System. *Energies*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/en11061360>
- Lim, S., Min, S., & Hong, J. P. (2015). Optimal Rotor Design of IPM Motor for Improving Torque Performance Considering Thermal Demagnetization of Magnet. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(3). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2358694>
- Liu, X., Chen, H., Zhao, J., & Belahcen, A. (2016). Research on the Performances and Parameters of Interior PMSM Used for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(6), 3533–3545. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2524415>
- Purwanto, W., Risfendra, Fernandez, D., Putra, D. S., & Sugiarto, T. (2017). Design and Comparison of Five Topologies Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor for High-speed Spindle Applications. *International Journal of GEOMATE*, 13(40), 148–154. <https://doi.org/10.21660/2017.40.02765>
- Ren, W., Xu, Q., & Li, Q. (2015). Asymmetrical V-Shape Rotor Configuration of an Interior Permanent Magnet Machine for Improving Torque Characteristics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(11). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2450931>
- Xie, Y., Fu, L., & Ma, Z. (2019). Design and Research of Low-Speed High-Torque Permanent Magnet Synchronous Motor with Outer Rotor. *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1–5.
- Yamazaki, K., Kumagai, M., Ikemi, T., & Ohki, S. (2013). A Novel Rotor Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors to Cope with Both Maximum Torque and Iron Loss Reduction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(6), 2478–2486.

- Yoon, M. H., Kim, D. Y., Kim, S. il, & Hong, J. P. (2015). An Asymmetric Rotor Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Improving Torque Performance. *Journal of Magnetics*, 20(4), 387–393. <https://doi.org/10.4283/JMAG.2015.20.4.387>
- Yu, J. S., Cho, H. W., Choi, J. Y., Jang, S. M., & Lee, S. H. (2013). Optimum Design of Stator and Rotor Shape for Cogging Torque Reduction in Interior Permanent Magnet Synchronous Motors. *Journal of Power Electronics*, 13(4), 546–551. <https://doi.org/10.6113/JPE.2013.13.4.546>
- Zhang, Z., Yu, S., Zhang, F., Jin, S., & Wang, X. (2020). Electromagnetic and Structural Design of a Novel Low-Speed High-Torque Motor with Dual-Stator and PM-Reluctance Rotor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 30(4). <https://doi.org/10.1109/TASC.2020.2977286>
- Zhentao S. Du, & Thomas A. Lipo. (2018). Torque Ripple Minimization in Interior Permanent Magnet Machines Using Axial Pole Shaping. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 6922–6929.