

ESTIMASI SISA UMUR PAKAI MOTOR BLDC PADA KENDARAAN LISTRIK DENGAN KERUSAKAN ANTAR LILITAN STATOR MENGGUNAKAN PEMBELAJARAN MESIN BERBASIS DATA MULTI-SENSOR

Sumastriendi Arifar Sindapati (23822302) | Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Ir. Yul Yunazwin Nazaruddin & Dr. Azka Muji Burohman, S.Si., M.T.



PENDAHULUAN

Kendaraan listrik (*Electric Vehicle / EV*) mengalami pertumbuhan pesat berkat isu lingkungan, kemajuan teknologi baterai, dan dukungan kebijakan global, termasuk di Indonesia melalui Perpres No. 55 Tahun 2019. Seiring meningkatnya adopsi *EV*, kebutuhan akan sistem pemeliharaan yang cerdas dan efisien, seperti *predictive maintenance*, menjadi semakin penting, khususnya pada motor listrik sebagai komponen utama. Salah satu motor yang umum digunakan adalah *Brushless Direct Current (BLDC)* karena efisiensinya tinggi, meskipun masih rentan terhadap kerusakan seperti *Inter-Turn Fault (ITF)* pada stator. *ITF* sulit dideteksi secara visual namun dapat memicu kegagalan sistem. Pendekatan berbasis *machine learning* terbukti mampu memprediksi sisa umur pakai (*Remaining Useful Life / RUL*) motor secara akurat, namun sebagian besar studi sebelumnya masih terbatas pada satu parameter atau sensor. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem akuisisi data *multi-sensor* berbiaya rendah pada motor *BLDC* serta membangun model estimasi *RUL* berbasis *machine learning* menggunakan data aktual, guna mendukung sistem pemeliharaan prediktif yang efisien dan aplikatif untuk kendaraan listrik.

TUJUAN PENELITIAN

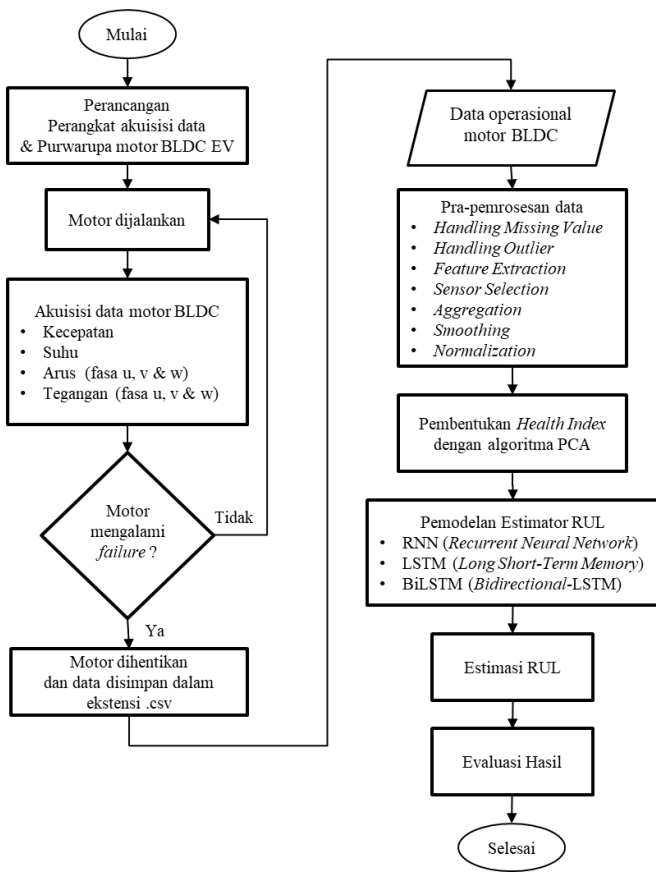
- Mengembangkan model prediksi *Remaining Useful Life (RUL)* pada motor *BLDC* yang mengalami kerusakan stator *Inter-Turn Fault (ITF)* dengan menggunakan data multi-sensor dan teknik pembelajaran mesin
- Merancang dan mengimplementasikan sistem akuisisi data untuk motor *BLDC* menggunakan mikrokontroler dan berbagai jenis sensor.
 - Mengintegrasikan dan mengolah data multi-sensor yang dikumpulkan untuk mengidentifikasi pola degradasi kinerja motor akibat kerusakan stator *ITF*.
 - Membangun dan menguji model prediksi *RUL* berbasis *machine learning* untuk memperkirakan sisa umur pakai motor
 - Menganalisis performa model prediksi dengan membandingkan hasil prediksi terhadap data aktual guna mengevaluasi keandalan sistem dalam konteks pemantauan kesehatan kendaraan listrik

PERANCANGAN SISTEM

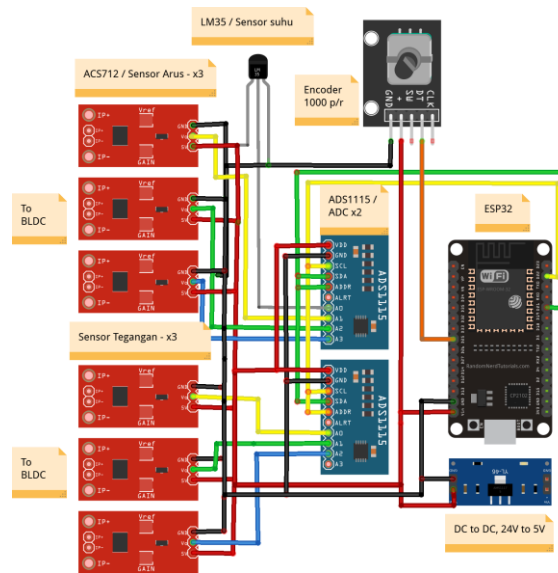
Dalam menjalankan penelitian ini dilakukan beberapa tahapan untuk mencapai tujuan penelitian. Alur tahapan kegiatan mulai dari perancangan perangkat akuisi data, purwarupa motor listrik pada kendaraan listrik, pelaksanaan akuisisi data, pemrosesan data, pembentukan *health index*, pemodelan estimator *RUL*, pelatihan dan pengujian model, hingga evaluasi hasil.



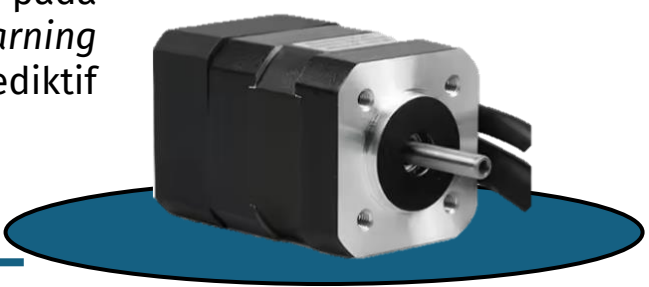
Contact :
Sumas.rendi@gmail.com
Sumastriendi A.S



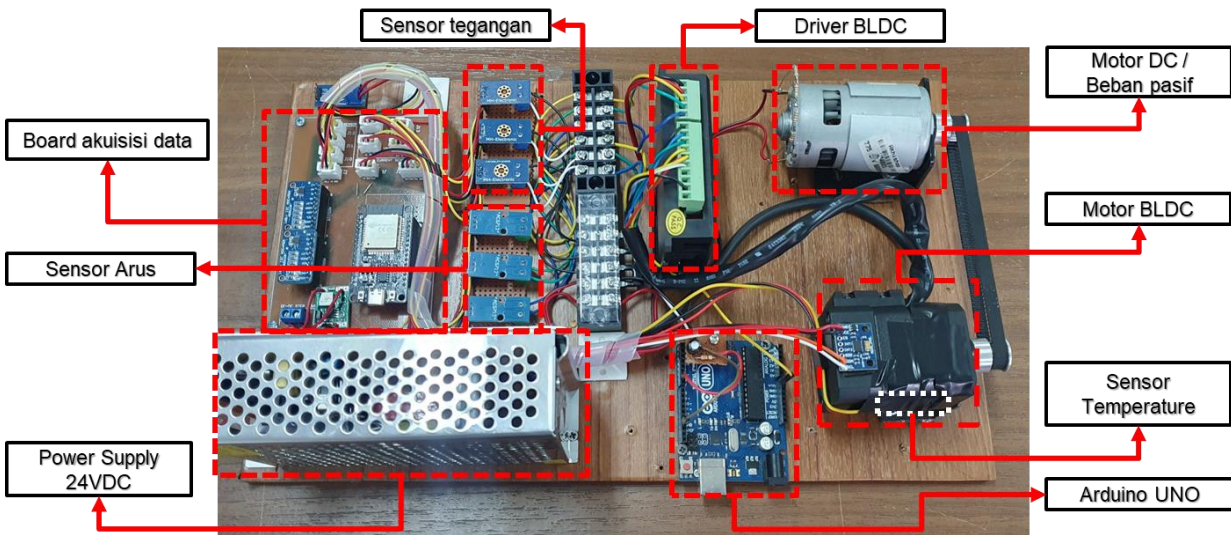
Gambar 1. Diagram alir penelitian



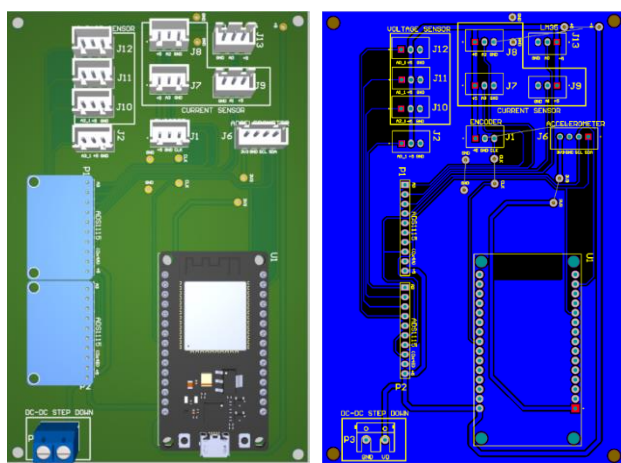
Gambar 2. Skematik Data Acquisition (DAQ)



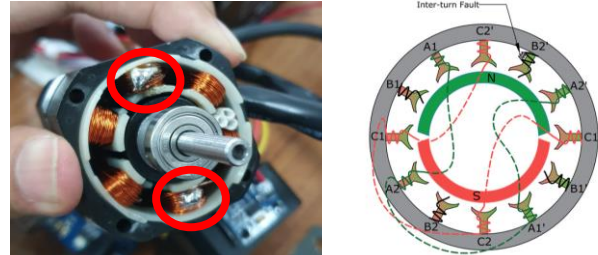
Gambar 5. Motor BLDC yang diuji



Gambar 6. Purwarupa motor BLDC pada Kendaraan listrik



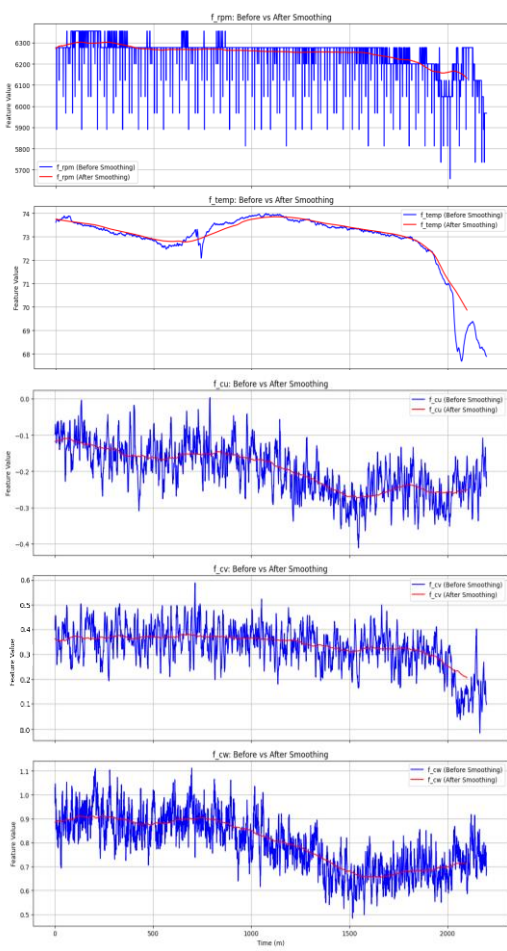
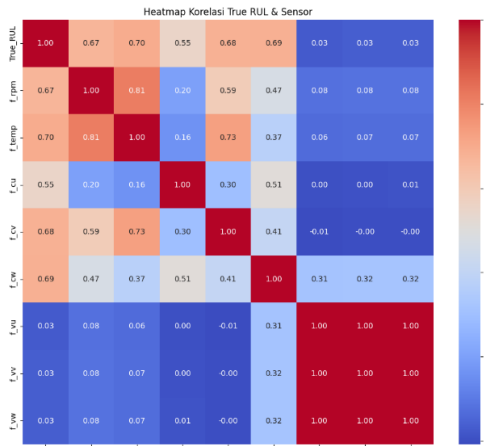
Gambar 3. Desain PCB dan wiring DAQ



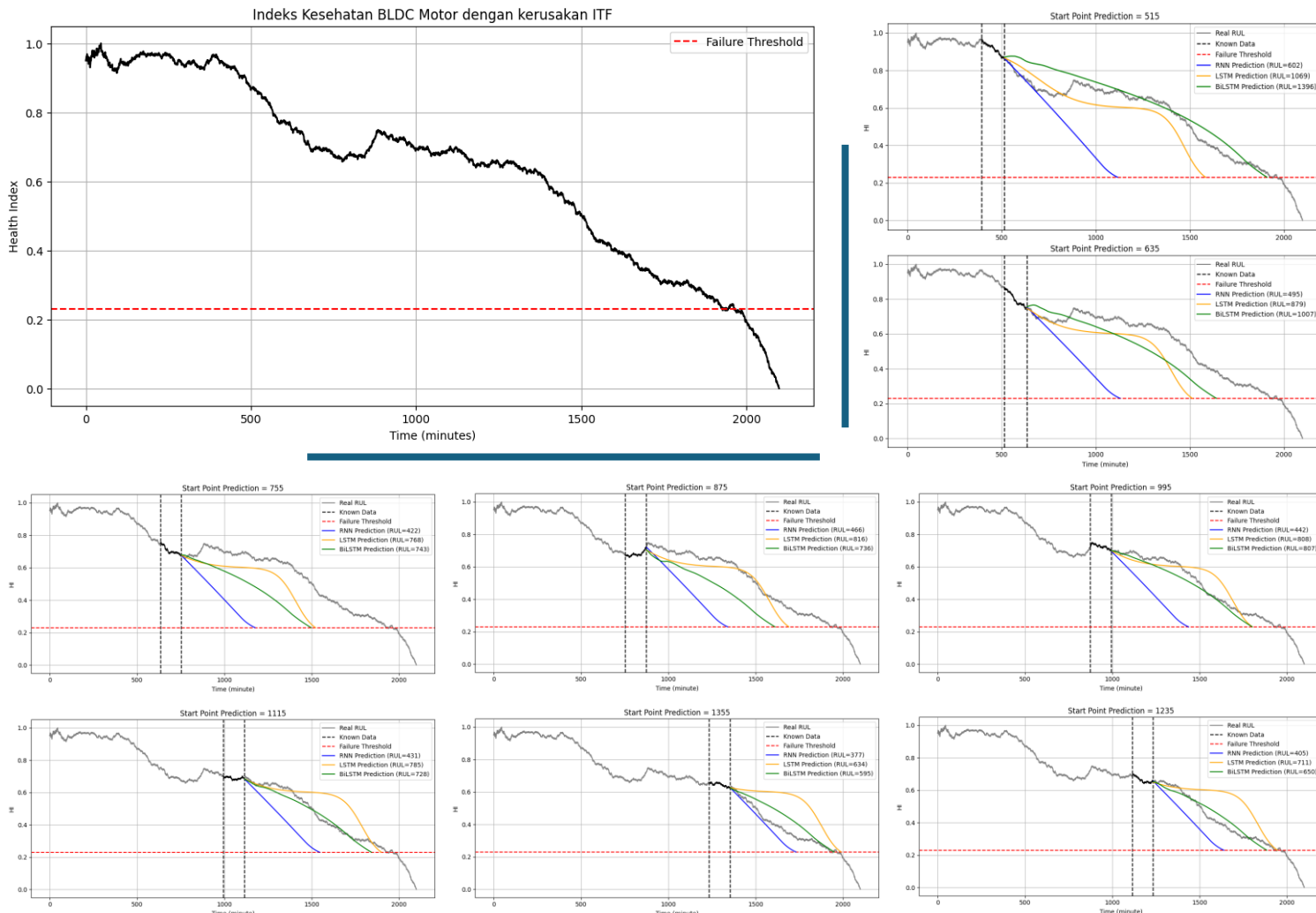
Gambar 4. Simulasi kerusakan ITF

HASIL DAN ANALISIS

Purwarupa motor BLDC dijalankan secara kontinu mulai dari kondisi awal saat mengalami *Inter-Turn Fault (ITF)* hingga mencapai kegagalan total (*run-to-failure*) untuk memperoleh data *Remaining Useful Life (RUL)* dari berbagai sensor, seperti kecepatan, suhu, arus, dan tegangan. Dari proses ini diperoleh total 1.260.000 data poin, yang selanjutnya diolah melalui tahap pra-pemrosesan, mulai dari penanganan *missing value* hingga normalisasi data.



Indeks Kesehatan (*Health Index / HI*) pada motor *BLDC* dibentuk melalui penggabungan seluruh data sensor menggunakan algoritma *Principal Component Analysis (PCA)* guna memantau tren degradasi motor secara komprehensif. Data Indeks *HI* yang dihasilkan kemudian digunakan untuk melatih model *machine learning* seperti *RNN*, *LSTM*, dan *BiLSTM*. Kinerja masing-masing model dievaluasi menggunakan teknik *rolling prediction* dalam memprediksi *Remaining Useful Life (RUL)*.



NO	Start Point	Aktual RUL	PRUL (RNN)	PRUL (LSTM)	PRUL (BiLSTM)	Error RNN	Error LSTM	Error BiLSTM	Sifat Prediksi RNN	Sifat Prediksi LSTM	Sifat Prediksi BiLSTM
1	515	1424	602	1069	1396	822	355	28	early	early	early
2	635	1304	495	879	1007	809	425	297	early	early	early
3	755	1184	422	768	743	762	416	441	early	early	early
4	875	1064	466	816	736	598	248	328	early	early	early
5	995	944	442	808	807	502	136	137	early	early	early
6	1115	824	431	785	728	393	39	96	early	early	early
7	1235	704	405	711	650	299	7	54	early	late	early
8	1355	584	377	634	595	207	50	11	early	late	late
9	1475	464	295	198	429	169	266	35	early	early	early
10	1595	344	174	115	221	170	229	123	early	early	early
11	1715	224	113	76	122	111	148	102	early	early	early
12	1835	104	84	54	49	20	50	55	early	early	early
Rata-rata Error						405.17	197.42	142.25	303.88	151.63	107.38
Persentase Rata-rata Error						53.03	25.84	18.62	39.77	19.85	14.05
						Rata-rata tanpa bobot			Rata-rata dengan bobot		

KESIMPULAN

- Telah dikembangkan sistem prediktif *RUL* motor *BLDC* berbasis data multi-sensor yang diperoleh dari eksperimen *run-to-failure*, dengan pendekatan *machine learning* menggunakan model time series (*RNN*, *LSTM*, dan *BiLSTM*).
- Perangkat akuisisi data dirancang menggunakan mikrokontroler *ESP32*, dilengkapi lima jenis sensor, dan menghasilkan tren *Health Index (HI)* sebagai basis prediksi.
- Model dievaluasi pada 12 titik waktu berbeda, dengan hasil sebagai berikut:
 - RNN* memiliki galat terbesar, dengan persentase galat masing-masing 53,03% dan 39,77%.
 - LSTM* menunjukkan peningkatan performa, dengan persentase galat 25,84% dan 19,85%.
 - BiLSTM* memberikan hasil terbaik dengan galat terkecil, yaitu hanya 18,62% dan 14,05%.
- Model *BiLSTM* terbukti paling andal dalam mengenali pola temporal data karena arsitektur dua arah, menghasilkan prediksi *RUL* yang paling akurat.