



Implementasi Metode *Fuzzy* dan PID dalam Perancangan Sistem Kontrol Kecepatan Motor *Chain Conveyor*

Sofi Berliana Rizky¹, Isa Rachman², Ii Munadhif³

^{1, 2, 3}Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Program Studi Teknik Otomasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
sofiberliantarizky@gmail.com^{*}, isarachman@ppns.ac.id, iimunadhif@ppns.ac.id

Abstract

In industrial production systems, chain conveyors are critical components for efficiently transferring materials. However, dynamic load variations can cause disturbances in the performance of the driving motor, such as increased current and temperature, which may lead to damage. This study aims to design a motor speed control system for a chain conveyor using the Sugeno fuzzy and PID methods to address these issues. The system relies on inputs from Load Cell sensors (material weight), PT100 (motor temperature), and PZEM-004T (electric current), which are processed using fuzzy rules to determine the inverter frequency setpoint, allowing the motor speed to adjust according to load variations. PID control is employed to maintain the stability of the motor speed to match the determined setpoint. The design incorporates sensor integration, ESP32, and actuators such as relays and servo motors, with PWM signals converted into analog voltage. System simulations using Matlab software demonstrate that the Sugeno fuzzy method can accurately determine the inverter frequency setpoint based on actual inputs. In testing with a material weight of 900 grams, a motor temperature of 33.2°C, and an electric current of 1.1 A, the system successfully generated a motor frequency of 15 Hz. Meanwhile, the PID auto-tuning results yielded optimal parameters with $K_p = 0.16423$, $K_i = 0.166618$, and $K_d = 0.0030726$. The system showed a rise time of 0.158 seconds, a settling time of 2.79 seconds, and an overshoot of 11.6%. These results indicate that the combination of Fuzzy and PID methods is effective in maintaining motor performance stability, adaptively adjusting the speed according to load variations, and minimizing the risk of overload during operation.

Keywords: fuzzy, control, speed, motor, PID

Abstrak

Dalam sistem produksi industri, *chain conveyor* merupakan komponen penting untuk memindahkan material secara efisien. Namun, variasi beban secara dinamis dapat menyebabkan gangguan pada kinerja motor penggerak, seperti peningkatan arus dan suhu yang berisiko menyebabkan kerusakan. Penelitian ini bertujuan merancang sistem kontrol kecepatan motor *chain conveyor* menggunakan metode *fuzzy* Sugeno dan PID untuk mengatasi permasalahan tersebut. Sistem mengandalkan *input* dari sensor *Load Cell* (berat material), PT100 (suhu motor), dan PZEM-004T (arus listrik) yang diproses menggunakan aturan *fuzzy* untuk menentukan *set point* frekuensi *inverter* sehingga kecepatan motor dapat disesuaikan dengan perubahan beban. Sedangkan kontrol PID digunakan untuk menjaga kestabilan kecepatan motor agar sesuai dengan nilai *set point* yang ditentukan. Perancangan dilakukan dengan integrasi sensor, ESP32, serta aktuator seperti *relay* dan motor servo, dengan pengaturan sinyal PWM yang dikonversi menjadi tegangan analog. Simulasi sistem menggunakan *software* Matlab menunjukkan bahwa metode *fuzzy* Sugeno mampu menentukan *set point* frekuensi *inverter* yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor secara akurat berdasarkan *input* aktual. Pada pengujian dengan berat material 900 gram, suhu motor 33,2°C, dan arus listrik 1,1 A, sistem berhasil menghasilkan frekuensi motor sebesar 15 Hz. Sementara itu, hasil *auto tuning* PID memberikan parameter optimal dengan $K_p = 0,16423$, $K_i = 0,166618$, dan $K_d = 0,0030726$. Sistem menunjukkan *rise time* 0,158 detik, *settling time* 2,79 detik, dan *overshoot* 11,6%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi metode *Fuzzy* dan PID efektif dalam menjaga kestabilan performa motor, menyesuaikan kecepatan secara adaptif terhadap perubahan beban, serta meminimalkan risiko *overload* selama operasi.

Kata kunci: fuzzy, kontrol, kecepatan, motor, PID

Diterima Redaksi : 14-05-2025 | Selesai Revisi : 08-07-2025 | Diterbitkan Online : 31-12-2025

1. Pendahuluan

Industri manufaktur modern terus berupaya meningkatkan keandalan proses produksi, salah satunya

melalui penerapan sistem transportasi material yang andal seperti *chain conveyor*. *Chain conveyor* merupakan sistem pemindahan material secara horizontal atau miring yang terdiri dari rantai yang

bergerak dalam rel tertutup dan digerakkan oleh motor roda gigi yang terhubung ke sproket melalui kopling fleksibel atau poros roda gigi heliks [1]. Salah satu tantangan utama dalam pengoperasian *chain conveyor* adalah menjaga kinerja motor penggerak tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban secara dinamis. Beban berlebih dapat menyebabkan peningkatan arus, kenaikan suhu, dan bahkan kerusakan motor, sehingga diperlukan sistem kontrol yang adaptif terhadap variasi kondisi operasi.

Dalam upaya mengatasi tantangan tersebut, dibutuhkan sistem kontrol kecepatan motor yang mampu menyesuaikan diri secara fleksibel terhadap perubahan beban. Salah satu pendekatan yang efektif untuk tujuan ini adalah dengan menerapkan metode *fuzzy*. Metode *fuzzy* dikenal memiliki kemampuan dalam menangani data yang bersifat tidak pasti serta mampu membuat keputusan berdasarkan himpunan aturan linguistik, sehingga sangat sesuai digunakan pada sistem dengan variabilitas tinggi dan ketidakpastian data [2]. Dalam konteks sistem kontrol kecepatan motor, metode *fuzzy* dapat digunakan untuk menentukan *set point* frekuensi *inverter* berdasarkan *input* seperti berat material, suhu, dan arus motor. *Output* dari sistem *fuzzy* kemudian digunakan sebagai referensi untuk pengaturan kecepatan motor agar tetap bekerja dalam kondisi optimal.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan beban pada motor induksi dapat memicu kenaikan arus rotor, meningkatkan slip, serta menurunkan kecepatan rotor [3]. Dalam konteks ini, metode *fuzzy* memungkinkan sistem menjadi lebih responsif, menghindari kondisi *overload*, serta menjaga motor tetap beroperasi dalam batas aman. Selain itu, beberapa studi juga menunjukkan bahwa kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) mampu menjaga kestabilan sistem secara presisi. PID digunakan untuk meminimalkan kesalahan antara kecepatan aktual dan *set point* yang ditentukan, serta mempercepat respons sistem tanpa menimbulkan *overshoot* yang berlebihan [4]. Sistem ini akan mampu meningkatkan keandalan dan stabilitas motor *chain conveyor* secara signifikan, terutama dalam lingkungan produksi yang dinamis.

Dengan menggabungkan metode *fuzzy* yang adaptif dan PID yang presisi, sistem kontrol kecepatan motor dapat dirancang untuk responsif sekaligus stabil. Metode *fuzzy* digunakan untuk menentukan *set point* frekuensi *inverter* yang digunakan untuk mengatur kecepatan motor berdasarkan kondisi aktual, sedangkan PID bertugas memastikan kecepatan motor tetap stabil terhadap *set point* tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kontrol kecepatan motor *chain conveyor* berbasis metode *fuzzy* dan PID. Sistem ini dirancang menggunakan sensor *load cell* untuk mengukur berat material, sensor suhu PT100 untuk mengukur suhu motor, dan sensor arus PZEM-004T untuk mengukur

beban listrik. Hasil dari metode *fuzzy* digunakan sebagai referensi frekuensi *inverter*, yang selanjutnya distabilkan menggunakan pengendali PID. Fokus utama penelitian adalah menganalisis efektivitas sistem dalam mengatur kecepatan motor secara adaptif terhadap variasi beban, serta memastikan motor bekerja secara efisien dan aman tanpa mengalami *overloading*.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini mengimplementasikan metode *fuzzy* tipe Sugeno yang dikombinasikan dengan kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*) dalam sistem kendali kecepatan motor induksi pada aplikasi *chain conveyor*. Pemilihan metode Sugeno didasarkan pada keunggulannya dalam menghasilkan *output* yang berbentuk linier atau konstan, sehingga lebih mudah diintegrasikan dengan sistem kontrol digital seperti *inverter*. Sementara itu, kontrol PID digunakan untuk menjaga kestabilan kecepatan motor agar tetap sesuai dengan *set point* yang dihasilkan oleh sistem *fuzzy*.

Sistem ini dirancang untuk merespons variasi beban secara dinamis menggunakan data dari beberapa sensor, yaitu *Load Cell* sebagai pengukur berat material secara *real time*, sensor PT100 untuk mengukur suhu motor, dan sensor PZEM-004T guna mengukur tegangan, arus, dan daya listrik.

Tahapan penelitian ini terdiri atas beberapa proses utama yang saling terintegrasi. Proses pertama adalah fuzzifikasi terhadap *input* yang diperoleh dari sensor, yaitu mengubah nilai numerik menjadi representasi linguistik berdasarkan fungsi keanggotaan tertentu. Proses selanjutnya adalah inferensi *fuzzy*, di mana sistem menggunakan aturan IF-THEN berdasarkan kombinasi kondisi *input* untuk menentukan *output* berupa nilai frekuensi. Pada metode *fuzzy* tipe Sugeno, setiap aturan memiliki *output* linier yang langsung dihitung melalui perhitungan matematis berbobot terhadap hasil inferensi. *Output* akhir dari sistem digunakan untuk mengatur frekuensi *inverter* sehingga kecepatan motor dapat disesuaikan dengan perubahan beban.

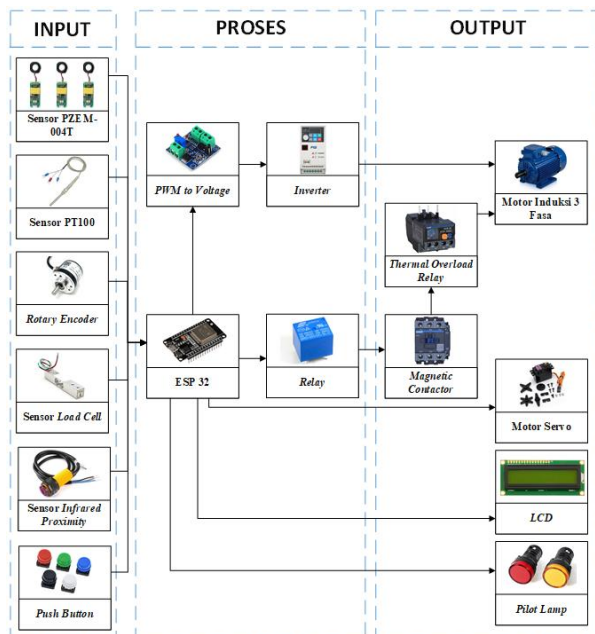
Nilai frekuensi yang dihasilkan dari sistem *fuzzy* digunakan sebagai *set point* bagi kendali PID. Pengendali PID berfungsi menjaga kecepatan motor tetap stabil dengan meminimalkan *error* antara kecepatan aktual dan nilai *set point*. Kecepatan aktual motor diperoleh melalui pembacaan dari *rotary encoder* atau *feedback* sinyal *inverter*. Keseluruhan sistem ini dijalankan oleh mikrokontroler ESP32 yang berperan dalam membaca data sensor, menjalankan metode *fuzzy*, menghitung respon PID, serta menghasilkan sinyal PWM untuk mengendalikan frekuensi *inverter*. Selain itu, sistem dilengkapi dengan fitur pemantauan *real-time* Melalui LCD, sehingga pengguna dapat memantau performa motor dan status sistem secara berkala.

Penelitian ini mengacu pada karya Muhammad Isnain Saichoni (2021) dalam proyek akhirnya yang berjudul “Sistem Proteksi Motor Induksi Tiga Fasa pada Mesin Hot Press dengan Metode Fuzzy Logic” berfokus pada pengembangan sistem proteksi motor induksi tiga fasa dari kerusakan akibat arus lebih, tegangan tidak stabil, dan suhu berlebih. Sistem menggunakan sensor ACS712, ZMPT101B, dan thermocouple tipe K, serta memutus daya saat parameter melebihi batas [5]. Meskipun efektif, sistem hanya berfungsi sebagai proteksi dan belum mengatur kecepatan motor secara adaptif.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Muhammad Nur Ramadani (2021) dalam skripsinya berjudul “Implementasi Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID”. Penelitian ini menerapkan kontrol PID untuk mengatur kecepatan motor induksi menggunakan inverter [6]. Pengujian menunjukkan respons sistem yang baik terhadap perubahan *set point*, namun belum mampu menyesuaikan kecepatan motor secara otomatis terhadap variasi beban.

Berbeda dari kedua penelitian tersebut, penelitian ini mengombinasikan metode *fuzzy* dan PID untuk merancang sistem kontrol kecepatan motor yang lebih adaptif. Sistem tidak hanya berfungsi sebagai proteksi, tetapi juga mampu menyesuaikan kecepatan motor secara *real-time* berdasarkan beban aktual melalui integrasi sensor, sehingga dapat menjaga performa motor tetap optimal dan terhindar dari risiko *overload* dalam kondisi operasional industri yang dinamis.

2.1 Diagram Blok Sistem



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

Gambar 1 menunjukkan diagram blok sistem kontrol kecepatan motor *chain conveyor* yang mengintegrasikan berbagai sensor dan aktuator dengan

ESP32 sebagai pengendali utama. Sistem menerima *input* dari sensor PZEM-004T (arus), sensor suhu PT100 (suhu motor), *rotary encoder* (kecepatan motor), *Load Cell* (berat material), sensor *infrared proximity* (keberadaan material), dan *push button* (pemicu proses). *Output* dari ESP32 berupa sinyal PWM dikonversi menjadi tegangan analog oleh modul *PWM to Voltage* untuk mengontrol *inverter*, yang mengatur kecepatan motor induksi. ESP32 juga mengontrol *relay* untuk mengaktifkan *Magnetic Contactor*, serta berkoordinasi dengan *Thermal Overload Relay* sebagai proteksi suhu. Motor servo digunakan untuk membuka-tutup pintu penimbang berdasarkan berat material. Data sensor ditampilkan secara *real-time* melalui LCD dan *pilot lamp* sebagai indikator status sistem. Perancangan ini mendukung implementasi metode *fuzzy* Sugeno untuk menentukan *set point* frekuensi *inverter* berdasarkan kondisi beban aktual, yang kemudian disempurnakan melalui kendali PID agar kecepatan motor tetap stabil dan presisi.

2.2 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Arus pada kumparan stator menghasilkan medan magnet berputar, yang kemudian menginduksi arus pada rotor dan menyebabkan rotor berputar [7]. Kecepatan sinkron motor dipengaruhi oleh frekuensi sumber listrik dan jumlah kutub motor, dengan persamaan

$$N_s = 120 \times \frac{f}{p} \quad (1)$$

Pada motor dengan daya 0,55 kW dan kecepatan 2790 RPM, torsi nominal berkisar 1,883 Nm, dan saat starting dapat mencapai 2,82 hingga 4,71 Nm (sekitar 1,5–2,5 kali torsi nominal) [8].

Motor induksi tiga fasa pada penelitian ini berfungsi sebagai aktuator utama untuk menggerakkan *chain conveyor*. Motor induksi tiga fasa yang digunakan ditampilkan pada Gambar 2, sedangkan spesifikasinya dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Motor Induksi Tiga Fasa

Tabel 1. Spesifikasi Motor Induksi Tiga Fasa

Parameter Spesifikasi	Keterangan
Tipe	A-Y3A-71M2-2 B3
Output	0,75HP/0.55KW
Tegangan	220/380V 50/60Hz
Ampere	2,4/1,4
RPM	2790/3348

Number	240970032
CL	F
IP	55

2.3 Inverter

Inverter merupakan komponen penting dalam sistem penggerak motor listrik karena berfungsi mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC) dengan frekuensi yang dapat diatur sesuai kebutuhan. Kemampuan ini memungkinkan *inverter* mengontrol kecepatan motor secara efisien, sehingga sangat bermanfaat dalam sistem industri dan aplikasi kendaraan listrik. *Inverter* digunakan sebagai variable speed drive (VSD), yang mampu meningkatkan efisiensi operasi motor, menurunkan konsumsi energi, serta mengurangi emisi gas buang [9]. Keunggulan utama *inverter* terletak pada presisi pengaturan torsi dan kecepatan motor sesuai dengan beban yang diterima, yang berkontribusi pada usia pakai motor yang lebih panjang. Seiring perkembangan teknologi, inovasi *inverter* kini telah dilengkapi dengan sistem kendali berbasis mikrokomputer, yang membuat kinerja dan keandalan sistem semakin meningkat.

Dalam penelitian ini, *inverter* tipe VSD digunakan sebagai pengatur kecepatan motor induksi tiga fasa yang menjadi penggerak utama *chain conveyor*. Spesifikasi *Inverter* VSD yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Inverter VSD

Parameter Spesifikasi	Keterangan
<i>Manufacture</i>	FGI
Model	FD100M-0R7G-S2
Input Voltage	1 Phase 220VAC
Output Voltage	3 Phase 220VAC
Applied Motor/Power	0,75kW/1HP
Rated Current	4A
Frequency Input	50Hz/60Hz
Frequency Output	0-1000Hz

2.4 Metode Fuzzy Sugeno

Metode *fuzzy* merupakan pendekatan logika yang menggunakan aturan berbentuk IF-THEN. Pada bagian IF (*antecedent*), kondisi dinyatakan dalam himpunan *fuzzy*, sementara bagian THEN (konsekuen) memberikan keluaran dalam bentuk nilai tegas (*crisp*). Dalam model Sugeno, *output* sistem *fuzzy* diperoleh melalui fungsi matematis yang tergantung pada nilai *input*. Secara umum, aturan dasar dalam *fuzzy* Sugeno dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{if } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ then } z = f(x, y) \quad (2)$$

Dalam rumus tersebut, A dan B merupakan himpunan *fuzzy* pada bagian *antecedent*, sedangkan $z = f(x, y)$ adalah fungsi tegas pada bagian konsekuen [10]. Berdasarkan bentuk fungsi $f(x, y)$, model Sugeno terbagi menjadi dua jenis. Pertama, apabila $f(x, y)$ merupakan polinomial orde satu, maka model tersebut disebut model *fuzzy* Sugeno orde satu karena *output* dihitung berdasarkan hubungan linear antara *input*.

Kedua, jika nilai f adalah konstan, maka sistem disebut sebagai model Sugeno orde nol, di mana keluaran berupa nilai tetap tanpa tergantung pada *input* [11].

Keunggulan utama dari model Sugeno terletak pada kemampuannya menghasilkan *output* yang lebih presisi, responsif, dan sesuai untuk sistem pengendalian maupun optimasi yang memerlukan respon waktu nyata.

Penerapan sistem inferensi *fuzzy* memerlukan tahapan awal berupa identifikasi parameter masukan (*input*) dan keluaran (*output*) dari sistem. Tahap ini krusial untuk memastikan setiap *input* dapat dikonversikan menjadi *output* yang sesuai dengan tujuan kendali sistem. Adapun variabel *input* dan *output* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variabel *Input* dan *Output* Sistem

Input	Output
Sensor Load Cell (Berat Material)	Set Point Frekuensi Inverter
Sensor PT100 (Suhu Motor)	
Sensor PZEM-004T (Arus Motor)	

Dengan Setiap variabel *input* dan *output* pada sistem diklasifikasikan ke dalam beberapa himpunan *fuzzy* berdasarkan domain nilainya. Untuk pembentukan himpunan *fuzzy*, digunakan fungsi keanggotaan yang sesuai dengan karakteristik masing-masing variabel. Fungsi keanggotaan yang digunakan akan berpengaruh langsung pada sensitivitas sistem dalam merespon perubahan kondisi *input*.

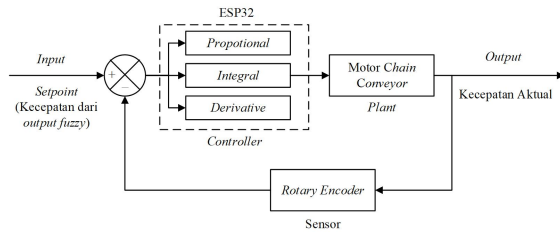
Dalam implementasinya, metode *fuzzy* Sugeno ini dirancang untuk mengendalikan kecepatan motor induksi tiga fasa secara adaptif berdasarkan kondisi nyata sistem. Sistem *fuzzy* mengolah data dari sensor-sensor tersebut dan menghasilkan *set point* frekuensi *inverter* yang optimal guna menjaga kinerja motor induksi. Dengan struktur aturan *fuzzy* yang disesuaikan, sistem ini diharapkan mampu memberikan respons yang cepat dan akurat terhadap perubahan parameter beban.

2.5 Propotional Integral Derivative (PID)

Pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan teknik kendali yang digunakan untuk menjaga kestabilan sistem dengan mengoreksi selisih antara nilai *set point* dan nilai aktual. Dalam penelitian ini, pengendali PID diterapkan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa yang menggerakkan *chain conveyor*. *Set point* kecepatan berasal dari *output* sistem *fuzzy*, yang kemudian dibandingkan dengan nilai aktual untuk menghasilkan sinyal *error*.

Sinyal *error* tersebut diolah oleh pengendali PID yang tertanam pada mikrokontroler ESP32, menggunakan parameter *proportional* (K_p), *integral* (K_i), dan *derivative* (K_d) yang telah ditentukan. Hasil kendali PID kemudian digunakan untuk mengatur tegangan *input* motor melalui konversi sinyal PWM ke tegangan analog menggunakan modul PWM-to-voltage. Kecepatan aktual motor dibaca menggunakan sensor

rotary encoder, yang memberikan umpan balik ke sistem untuk proses penyesuaian berkelanjutan hingga *error* mendekati nol.



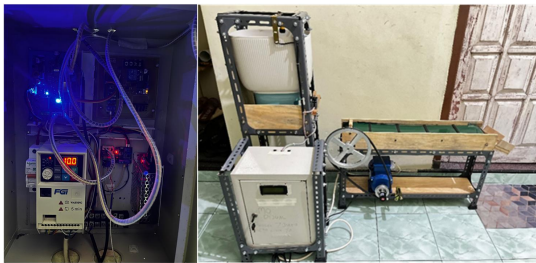
Gambar 3. Diagram Blok Kontrol PID

Diagram blok kendali PID menunjukkan alur sistem yang dimulai dari pemberian *set point*, pemrosesan sinyal *error*, hingga pengaturan kecepatan motor berdasarkan *feedback* sensor. Proses ini berlangsung secara *real-time* dan berulang guna memastikan kecepatan motor tetap stabil sesuai kebutuhan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Penelitian Metode Fuzzy

Bagian ini menyajikan data yang diperoleh secara langsung dari pengukuran pada motor induksi tiga fasa yang digunakan dalam penelitian ini. Data yang dikumpulkan meliputi waktu pengukuran, berat material yang dibawa oleh *chain conveyor*, suhu motor, dan arus listrik yang mengalir pada motor selama pengujian. Pengambilan data dilakukan untuk mengetahui respon motor terhadap berbagai kondisi beban yang diberikan.



Gambar 4. Pengambilan Data Metode Fuzzy

Gambar 4 menunjukkan proses pengambilan data dalam kegiatan penelitian ini. Pengukuran berat material dilakukan dengan memanfaatkan sensor *load cell* yang dipasang pada bagian penyangga material. Sementara itu, suhu motor diperoleh dari sensor PT100 yang ditempelkan langsung pada rangka motor, sedangkan data arus listrik motor diambil dari sensor pzem-004T, yang secara langsung mengukur besarnya arus yang mengalir ke motor selama sistem beroperasi. Proses ini bertujuan untuk memperoleh data *input* yang diperlukan dalam pengujian dan analisis sistem kontrol.

Tabel 4. Hasil Pengambilan Data Penelitian Metode Fuzzy

No.	Waktu	Berat Material (Gr)	Suhu Motor (°C)	Arus Motor (A)
1	21.10	300	30,3	1,1
2	21.15	600	32,4	1,1

3	21.20	900	33,2	1,1
4	21.25	1200	33,8	1,1
5	21.30	1500	33,5	1,1
6	21.35	1800	33,8	1,2
7	21.40	2100	34,3	1,2
8	21.45	2400	34,4	1,2
9	21.50	2700	34,9	1,2
10	22.00	3000	36,2	1,1

Pada Tabel 4 menunjukkan hasil pengambilan data yang dilakukan secara berkala setiap 5 menit dengan variasi beban material dalam kelipatan 300 gram. Pengujian dilakukan dengan kecepatan motor yang diatur melalui *inverter* pada frekuensi tetap sebesar 10 Hz. Tujuan dari pengambilan data ini adalah untuk memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai pengaruh variasi beban terhadap suhu dan arus listrik pada motor induksi tiga fasa yang digunakan dalam sistem *chain conveyor*. Berdasarkan hasil pengukuran, suhu motor tercatat paling rendah sebesar 30,3°C. Sementara itu, arus listrik yang mengalir pada motor menunjukkan nilai minimum sebesar 1,1A dan maksimum mencapai 1,2A. Data ini menjadi acuan penting dalam mengevaluasi kinerja sistem kontrol kecepatan motor, khususnya dalam penerapan metode pengendalian yang dirancang pada penelitian ini.

3.2 Pengolahan Sistem Fuzzy

Pengolahan sistem kendali berbasis *fuzzy* dilakukan melalui beberapa tahap yang saling berkaitan untuk menjamin sistem bekerja secara optimal. Tahapan pertama yang dilakukan adalah menentukan variabel *fuzzy*, yaitu parameter-parameter yang memengaruhi sistem, seperti berat material, suhu motor dan arus listrik pada motor induksi. Setelah variabel-variabel tersebut ditetapkan, langkah selanjutnya adalah menetapkan variabel linguistik, yaitu istilah-istilah yang digunakan untuk mendeskripsikan nilai dari setiap variabel *fuzzy*. Sebagai contoh, untuk berat material digunakan istilah seperti “Ringan”, “Sedang”, dan “Berat”, sedangkan suhu motor digunakan istilah seperti “Dingin”, “Normal”, dan “Panas”, dan untuk arus motor digunakan istilah seperti “Rendah”, “Sedang”, dan “Tinggi”.

Tahap berikutnya adalah fuzzifikasi, yakni proses mengubah nilai numerik dari masing-masing variabel menjadi nilai *fuzzy* dengan bantuan fungsi keanggotaan. Fungsi ini berperan dalam menentukan tingkat keanggotaan suatu nilai terhadap masing-masing kategori linguistik. Misalnya, suhu motor sebesar 35°C dapat memiliki tingkat keanggotaan tertentu dalam kategori “Normal” dan “Dingin” secara bersamaan. Selanjutnya, dibentuk aturan-aturan *fuzzy* dalam bentuk pernyataan “jika-maka” (IF-THEN), yang menghubungkan kondisi *input* dengan aksi *output* yang diharapkan. Sebagai contoh, aturan seperti “Jika berat material sedang, suhu motor panas dan arus sedang, maka kecepatan motor diturunkan”.

Tahap inferensi dilakukan dengan menggabungkan aturan-aturan *fuzzy* tersebut berdasarkan *input* yang sudah difuzzifikasi. Mesin inferensi akan memproses semua aturan dan menghasilkan kesimpulan dalam bentuk *Output fuzzy*. Terakhir, dilakukan proses defuzzifikasi, yaitu tahap mengubah hasil *Output fuzzy* menjadi nilai numerik yang dapat diterapkan secara nyata dalam sistem. Misalnya, sistem akan menentukan nilai kecepatan motor dalam satuan frekuensi (Hz) setelah tahap inferensi memberikan *Output* dalam bentuk linguistik seperti “10Hz” atau “15Hz”. Melalui seluruh tahapan ini, metode *fuzzy* mampu menangani ketidakpastian dan memberikan keputusan yang fleksibel serta adaptif dalam sistem pengendalian motor pada *chain conveyor*.

3.2.1 Variabel Linguistik

Pada tahap ini, ditentukan nilai-nilai linguistik dari setiap variabel *fuzzy* yang digunakan dalam sistem pengendali kecepatan motor. Penentuan variabel linguistik ini dilakukan dengan mengacu pada hasil analisis data penelitian yang diambil, dan kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga kategori untuk tiap variabel.

Variabel pertama adalah berat material, yang diukur menggunakan sensor *load cell*. Variabel ini dibagi ke dalam tiga himpunan linguistik, yaitu "ringan", "sedang", dan "berat", dengan rentang nilai sebagai berikut:

- a. Ringan : 0 – 1500 gr
- b. Sedang : 1000 – 2000 gr
- c. Berat : 1500 – 3000 gr

Rentang nilai ini diperoleh dari pengamatan langsung pada proses uji coba sistem dengan variasi bobot material pada *chain conveyor*.

Variabel kedua adalah suhu motor, yang diukur menggunakan sensor suhu PT100. Suhu motor dikategorikan ke dalam tiga kondisi linguistik, yaitu "dingin", "normal", dan "panas". Rentang masing-masing kategori adalah sebagai berikut:

- a. Dingin : 30 – 35°C
- b. Normal : 33 – 42°C
- c. Panas : 40 – 45°C

Rentang ini didasarkan pada karakteristik suhu kerja normal motor induksi tiga fasa.

Variabel ketiga adalah arus motor, yang diukur menggunakan sensor PZEM-004T. Nilai arus motor diklasifikasikan ke dalam tiga himpunan linguistik, yaitu "rendah", "sedang", dan "tinggi", dengan rincian sebagai berikut:

- a. Rendah : 1 – 1,1 A
- b. Sedang : 1,08 – 1,16 A
- c. Tinggi : 1,14 – 1,2 A

Nilai ini diperoleh dari hasil pengujian arus listrik pada saat motor bekerja dengan beban berbeda.

Adapun untuk variabel *output*, yaitu *set point* frekuensi *inverter*, dibagi menjadi tiga kategori linguistik, yaitu "kondisi pelan", "kondisi normal", dan "kondisi cepat", dengan nilai kecepatan yang ditetapkan sebagai berikut:

- a. Kondisi Pelan : 5 Hz
- b. Kondisi Normal : 10 Hz
- c. Kondisi Cepat : 15 Hz

Nilai-nilai ini merupakan representasi dari kecepatan motor yang akan dikirim sebagai perintah ke *inverter* untuk mengatur kecepatan kerja motor.

Melalui penetapan variabel linguistik ini, sistem *fuzzy* dapat menganalisis kondisi motor berdasarkan *input* sensor dan memberikan keputusan pengaturan kecepatan secara adaptif.

3.2.2 Fuzzifikasi

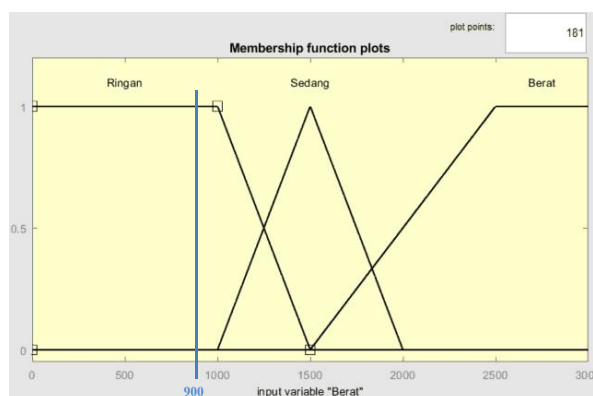
Fuzzifikasi adalah proses awal dalam sistem *fuzzy* yang bertujuan mengubah *input* numerik dari sensor menjadi nilai *fuzzy* berdasarkan derajat keanggotaan pada masing-masing himpunan linguistik. Dalam penelitian ini, tiga *input* utama yang difuzzifikasi meliputi berat material (dari sensor *load cell*), suhu motor (dari sensor PT100), dan arus motor (dari sensor PZEM-004T). Masing-masing nilai *input* dikonversi menggunakan fungsi keanggotaan segitiga ke dalam kategori linguistik.

Tabel 5. Data Pengujian *Fuzzy*

Berat Material (Gr)	Suhu Motor (°C)	Arus Motor (A)
900	33,2	1,1

Tabel 5 menunjukkan data *input* berupa berat material, suhu motor, dan arus motor yang akan diuji menggunakan *software* MATLAB serta melalui perhitungan manual. Hasil dari proses fuzzifikasi terhadap data tersebut akan digunakan pada tahap inferensi *fuzzy* untuk menentukan *output* berupa kecepatan motor. Dengan demikian, sistem dapat menyesuaikan respons secara otomatis berdasarkan kondisi yang terdeteksi oleh sensor.

3.2.2.1 Variabel Berat Material



Gambar 5. *Membership Function* Berat Material

Gambar 5 menunjukkan kurva keanggotaan pada variabel berat material yang dibentuk menggunakan

software MATLAB. Nilai derajat keanggotaan dari variabel ini dapat dihitung menggunakan rumus keanggotaan sebagai berikut:

Himpunan ringan ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 1000 \\ \frac{1500-x}{1500-1000} & ; 1000 < x \leq 1500 \\ 0 & ; x > 1500 \end{cases} \quad (3)$$

Himpunan sedang ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x < 1000 \\ \frac{x-1000}{1500-1000} & ; 1000 \leq x < 1500 \\ \frac{2000-x}{2000-1500} & ; 1500 \leq x < 2000 \\ 0 & ; x \geq 2000 \end{cases} \quad (4)$$

Himpunan berat ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq 1500 \\ \frac{x-1500}{2500-1500} & ; 1500 < x \leq 2500 \\ 1 & ; 2500 \leq x \leq 3000 \\ 0 & ; x > 3000 \end{cases} \quad (5)$$

Berdasarkan nilai berat material sebesar 900 Gr, dilakukan simulasi perhitungan derajat keanggotaan, maka diperoleh hasil sebagai berikut:

Ringan $\mu(900) = 1$

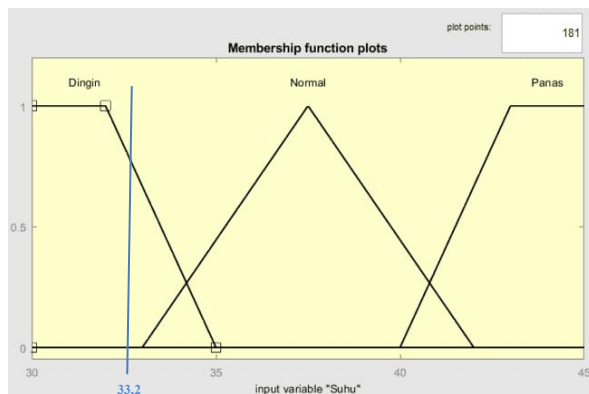
Sedang $\mu(900) = 0$

Berat $\mu(900) = 0$

Dengan demikian, pada berat material sebesar 900 Gr, nilai derajat keanggotaan adalah:

Ringan = 1, Sedang = 0, dan Berat = 0.

3.2.2.2 Variabel Suhu Motor



Gambar 6. Membership Function Suhu Motor

Gambar 6 menunjukkan kurva keanggotaan pada variabel suhu motor yang dibentuk menggunakan software MATLAB. Nilai derajat keanggotaan dari variabel ini dapat dihitung menggunakan rumus keanggotaan sebagai berikut:

Himpunan dingin ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 32 \\ \frac{35-x}{35-32} & ; 32 < x \leq 35 \\ 0 & ; x > 35 \end{cases} \quad (6)$$

Himpunan normal ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x < 33 \\ \frac{x-33}{37,5-33} & ; 33 \leq x < 37,5 \\ \frac{42-x}{42-37,5} & ; 37,5 \leq x < 42 \\ 0 & ; x \geq 42 \end{cases} \quad (7)$$

Himpunan panas ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x < 40 \\ \frac{x-40}{43-40} & ; 40 \leq x \leq 43 \\ 1 & ; 43 \leq x \leq 45 \\ 0 & ; x > 45 \end{cases} \quad (8)$$

Berdasarkan nilai suhu motor sebesar 37,4°C, dilakukan simulasi perhitungan derajat keanggotaan, maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\text{Dingin } \mu(33,2) = \frac{35-33,2}{35-32} = \frac{1,8}{3} = 0,6$$

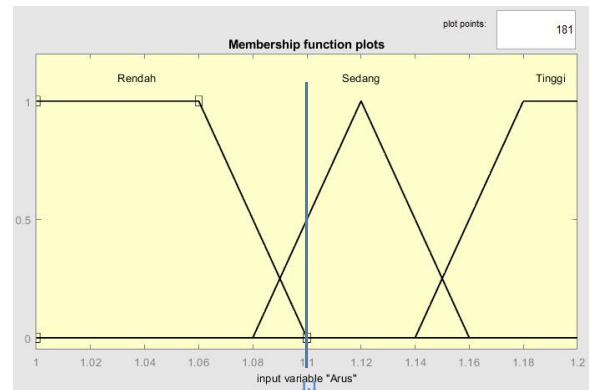
$$\text{Normal } \mu(33,2) = \frac{33,2-33}{37,5-33} = \frac{0,2}{4,5} = 0,044$$

$$\text{Panas } \mu(33,2) = 0$$

Dengan demikian, pada suhu motor sebesar 33,2°C, nilai derajat keanggotaan adalah:

Dingin = 0,6, Normal = 0,044, dan Panas = 0.

3.2.2.3 Variabel Arus Motor



Gambar 7. Membership Function Arus Motor

Gambar 7 menunjukkan kurva keanggotaan pada variabel arus motor yang dibentuk menggunakan aplikasi MATLAB. Nilai derajat keanggotaan dari variabel ini dapat dihitung menggunakan rumus keanggotaan sebagai berikut:

Himpunan rendah ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 1,06 \\ \frac{1,1-x}{1,1-1,06} & ; 1,06 < x \leq 1,1 \\ 0 & ; x > 1,1 \end{cases} \quad (9)$$

Himpunan sedang ((x))

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x < 1,08 \\ \frac{x-1,08}{1,12-1,08} & ; 1,08 \leq x < 1,12 \\ \frac{1,16-x}{1,16-1,12} & ; 1,12 \leq x < 1,16 \\ 0 & ; x \geq 1,16 \end{cases} \quad (10)$$

Himpunan tinggi (x)

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x < 1,14 \\ \frac{x-1,14}{1,18-1,14} & ; 1,14 \leq x < 1,18 \\ 1 & ; 1,18 \leq x \leq 1,2 \\ 0 & ; x > 1,2 \end{cases} \quad (11)$$

Berdasarkan nilai arus motor sebesar 1,1A, dilakukan simulasi perhitungan derajat keanggotaan, maka diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\text{Rendah } \mu(1,1) = \frac{1,1-1,1}{1,1-1,06} = \frac{0}{0,04} = 0$$

$$\text{Sedang } \mu(1,1) = \frac{1,1-1,08}{1,12-1,08} = \frac{0,02}{0,04} = 0,5$$

$$\text{Tinggi } \mu(1,1) = 0$$

Dengan demikian, pada arus motor sebesar 2,29A, nilai derajat keanggotaan adalah:

Rendah = 0, Sedang = 0,5, dan Tinggi = 0.

Tabel 6. Hasil Fuzzifikasi Data Penelitian

Variabel	Berat Material	Suhu Motor	Arus Motor
Himpunan	Ringan = 1	Dingin = 0,6	Rendah = 0
	Sedang = 0	Normal = 0,044	Sedang = 0,5
	Berat = 0	Panas = 0	Tinggi = 0

Tabel 6 menunjukkan hasil fuzzifikasi dari tiga variabel penelitian, yaitu berat material, suhu motor, dan arus motor. Nilai-nilai numerik dari setiap variabel diubah menjadi derajat keanggotaan *fuzzy* menggunakan metode *fuzzy*. Pada variabel berat material, keanggotaan tertinggi berada pada himpunan sedang, sementara suhu motor menunjukkan keanggotaan tertinggi pada himpunan panas. Untuk arus motor, keanggotaan tertinggi berada pada himpunan rendah. Proses ini merupakan tahap penting dalam sistem *fuzzy* karena memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih fleksibel terhadap perubahan kondisi operasional motor.

3.2.3 Fuzzy Rules

Aturan *fuzzy* (*fuzzy rules*) merupakan inti dari system *fuzzy* yang menghubungkan *input* dan *output* berdasarkan pengetahuan atau pengamatan terhadap sistem. Dalam penelitian ini, telah dirancang sebanyak 27 aturan *fuzzy* yang menggambarkan hubungan antara tiga variabel *input*, yaitu berat material, suhu motor, dan arus motor, dengan satu variabel *output*, yaitu kecepatan motor.

Tabel 7. Fuzzy Rules

Rule	Inpput			Output
	Berat Material	Suhu Motor	Arus Motor	Kecepatan Motor
R1	Ringan	Dingin	Rendah	15Hz

R2	Ringan	Dingin	Sedang	15Hz
R3	Ringan	Dingin	Tinggi	10Hz
R4	Ringan	Normal	Rendah	15Hz
R5	Ringan	Normal	Sedang	15Hz
R6	Ringan	Normal	Tinggi	10Hz
R7	Ringan	Panas	Rendah	10Hz
R8	Ringan	Panas	Sedang	10Hz
R9	Ringan	Panas	Tinggi	5Hz
R10	Sedang	Dingin	Rendah	15Hz
R11	Sedang	Dingin	Sedang	15Hz
R12	Sedang	Dingin	Tinggi	10Hz
R13	Sedang	Normal	Rendah	15Hz
R14	Sedang	Normal	Sedang	10Hz
R15	Sedang	Normal	Tinggi	5Hz
R16	Sedang	Panas	Rendah	10Hz
R17	Sedang	Panas	Sedang	5Hz
R18	Sedang	Panas	Tinggi	5Hz
R19	Berat	Dingin	Rendah	10Hz
R20	Berat	Dingin	Sedang	10Hz
R21	Berat	Dingin	Tinggi	5Hz
R22	Berat	Normal	Rendah	10Hz
R23	Berat	Normal	Sedang	5Hz
R24	Berat	Normal	Tinggi	5Hz
R25	Berat	Panas	Rendah	5Hz
R26	Berat	Panas	Sedang	5Hz
R27	Berat	Panas	Tinggi	5Hz

Tabel 7 menunjukkan keseluruhan aturan *fuzzy* yang digunakan dalam sistem ini. Sebagai contoh, jika berat material termasuk ringan, suhu motor dalam kondisi normal, dan arus motor tergolong sedang, maka kecepatan motor yang dihasilkan adalah 15 Hz (R5). Setiap kombinasi dari ketiga *input* menghasilkan keluaran yang telah ditentukan berdasarkan pengetahuan sistem.

Penerapan aturan *fuzzy* ini memungkinkan sistem mengatur kecepatan motor secara otomatis berdasarkan kombinasi kondisi aktual dari parameter yang diamati. Hal ini penting untuk menjaga kinerja motor, menghindari *overheat*, serta memperpanjang umur operasional motor. Dengan demikian, *fuzzy rules* dalam sistem ini berperan besar dalam menentukan logika pengambilan keputusan yang adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi lapangan.

3.2.4 Fuzzy Inference System (FIS)

Tabel 8. Kombinasi aturan IF–THEN *fuzzy*

Jenis	Rules
R1	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 15 Hz
R2	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 15 Hz
R3	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R4	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 15 Hz
R5	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor

	[33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 15 Hz
R6	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R7	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R8	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R9	If Berat Material [900] is Ringan [1] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R10	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 15 Hz
R11	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 15 Hz
R12	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R13	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 15 Hz
R14	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R15	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R16	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R17	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R18	If Berat Material [900] is Sedang [0] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R19	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R20	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R21	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Dingin [0,6] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R22	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 10 Hz
R23	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R24	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Normal [0,044] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R25	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Rendah [0] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R26	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Sedang [0,5] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz
R27	If Berat Material [900] is Berat [0] AND Suhu Motor [33,2] is Panas [0] AND Arus Motor [1,1] is Tinggi [0] THEN Kecepatan Motor = 5 Hz

Tabel 8 menunjukkan daftar kombinasi aturan *fuzzy* berbasis logika IF-THEN yang digunakan dalam sistem kontrol kecepatan motor induksi tiga fasa. Dalam sistem ini, terdapat tiga variabel *input* utama,

yaitu berat material, suhu motor, dan arus motor. Masing-masing variabel memiliki nilai linguistik yang telah difuzzifikasi sebelumnya. Terdapat total 27 aturan *fuzzy* yang mengarahkan sistem dalam menentukan kecepatan motor, dengan tiga kemungkinan *output*, yaitu 5 Hz untuk kecepatan rendah, 10 Hz untuk kecepatan sedang, dan 15 Hz untuk kecepatan tinggi. Aturan-aturan ini dibangun untuk menyesuaikan respon motor terhadap perubahan kondisi beban, suhu, dan arus, guna mencegah terjadinya *overload* sekaligus menjaga kerja sistem *chain conveyor*.

3.2.5 Defuzzifikasi

Setelah proses inferensi dilakukan, langkah selanjutnya adalah mengubah nilai *fuzzy* menjadi nilai tegas yang dapat digunakan secara langsung dalam sistem kendali. Proses ini disebut defuzzifikasi. Defuzzifikasi merupakan tahapan dalam *fuzzy* yang bertujuan untuk mengonversi hasil inferensi yang berupa nilai *fuzzy* ke dalam bentuk nilai *crisp* atau pasti, sehingga dapat diaplikasikan dalam pengendalian sistem nyata [12]. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah metode *fuzzy* Sugeno dengan operator logika AND yang diwakili oleh fungsi minimum (MIN). Proses perhitungan dilakukan berdasarkan derajat keanggotaan terkecil dari setiap aturan yang berlaku. Nilai hasil perhitungan ini kemudian digunakan untuk menentukan *output* sistem, dalam hal ini adalah *set point* frekuensi *inverter*. Hasil akhir dari proses defuzzifikasi ini ditampilkan secara rinci dalam Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Perhitungan AND (MIN)

Rule	Input			Output
	Berat Material	Suhu Motor	Arus Motor	Kecepatan Motor
R1	(1) Ringan	(0,6) Dingin	(0) Rendah	15Hz
R2	(1) Ringan	(0,6) Dingin	(0,5) Sedang	15Hz
R3	(1) Ringan	(0,6) Dingin	(0) Tinggi	10Hz
R4	(1) Ringan	(0,044) Normal	(0) Rendah	15Hz
R5	(1) Ringan	(0,044) Normal	(0,5) Sedang	15Hz
R6	(1) Ringan	(0,044) Normal	(0) Tinggi	10Hz
R7	(1) Ringan	(0) Panas	(0) Rendah	10Hz
R8	(1) Ringan	(0) Panas	(0,5) Sedang	10Hz
R9	(1) Ringan	(0) Panas	(0) Tinggi	5Hz
R10	(0) Sedang	(0,6) Dingin	(0) Rendah	15Hz
R11	(0) Sedang	(0,6) Dingin	(0,5) Sedang	15Hz
R12	(0) Sedang	(0,6) Dingin	(0) Tinggi	10Hz
R13	(0) Sedang	(0,044) Normal	(0) Rendah	15Hz
R14	(0) Sedang	(0,044) Normal	(0,5) Sedang	10Hz
R15	(0) Sedang	(0,044) Normal	(0) Tinggi	5Hz
R16	(0) Sedang	(0) Panas	(0) Rendah	10Hz
R17	(0) Sedang	(0) Panas	(0,5) Sedang	5Hz
R18	(0) Sedang	(0) Panas	(0) Tinggi	5Hz
R19	(0) Berat	(0,6) Dingin	(0) Rendah	10Hz
R20	(0) Berat	(0,6) Dingin	(0,5) Sedang	10Hz
R21	(0) Berat	(0,6) Dingin	(0) Tinggi	5Hz
R22	(0) Berat	(0,044) Normal	(0) Rendah	10Hz
R23	(0) Berat	(0,044) Normal	(0,5) Sedang	5Hz
R24	(0) Berat	(0,044) Normal	(0) Tinggi	5Hz

R25	(0) Berat	(0) Panas	(0) Rendah	5Hz
R26	(0) Berat	(0) Panas	(0,5) Sedang	5Hz
R27	(0) Berat	(0) Panas	(0) Tinggi	5Hz

Tabel 9 menunjukkan hasil perhitungan nilai keluaran sistem berdasarkan metode *fuzzy* Sugeno dengan menggunakan operator AND (MIN). Dalam metode ini, nilai minimum dari derajat keanggotaan masing-masing variabel *input* yaitu berat material, suhu motor, dan arus motor dipilih untuk setiap aturan *fuzzy* (*rule*). Nilai tersebut kemudian dikalikan dengan nilai *output* (kecepatan motor) yang telah ditentukan untuk masing-masing aturan. Tujuan dari tahapan ini adalah untuk memperoleh keluaran akhir berupa nilai *crisp* yang merepresentasikan frekuensi kerja motor induksi dalam sistem kendali. Proses ini disebut defuzzifikasi, dan dilakukan dengan rumus sebagai berikut:

Output

$$= \frac{\sum (\text{derajat keanggotaan} \times \text{nilai output})}{\sum (\text{derajat keanggotaan})}$$

$$\text{Output} = \frac{(0,5 \times 15) + (0,044 \times 15)}{0,5 + 0,044}$$

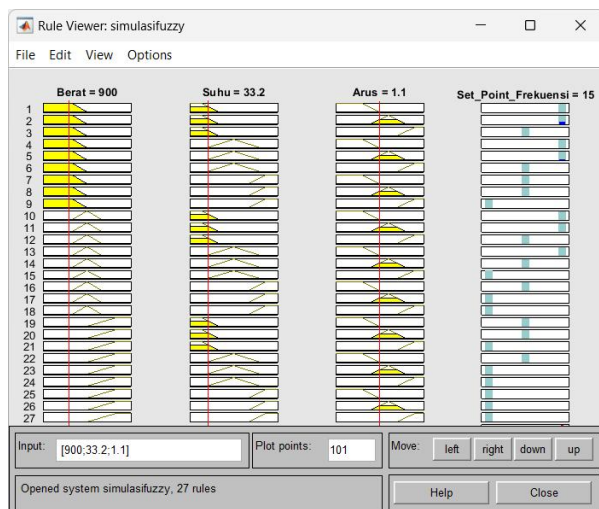
$$\text{Output} = \frac{7,5 + 0,66}{0,544}$$

$$\text{Output} = \frac{8,16}{0,544}$$

$$\text{Output} = 15 \text{ Hz}$$

Dengan demikian, nilai *crisp* yang diperoleh dari proses defuzzifikasi adalah 15 Hz, yang menunjukkan kecepatan motor yang disarankan oleh sistem kendali *fuzzy* berdasarkan kondisi berat material, suhu motor, dan arus motor saat itu. Hasil ini mendukung tujuan sistem dalam menyesuaikan kecepatan motor secara adaptif untuk menghindari beban berlebih dan menjaga kerja motor.

3.3 Simulasi Fuzzy Pada Software Matlab



Gambar 8. Hasil Simulasi Matlab

Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi menggunakan *Software* Matlab dengan *input* berupa berat material sebesar 900 gram, suhu motor 33,2°C, dan arus listrik sebesar 1,1 A. Dari simulasi tersebut, sistem kendali *fuzzy* menghasilkan *set point* frekuensi *inverter* sebesar 15 Hz. yang juga sesuai dengan perhitungna manual yang telah dilakukan. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis *fuzzy* mampu merespons variasi nilai masukan dengan menentukan frekuensi *inverter* untuk mengatur kecepatan motor yang sesuai secara otomatis.

3.4 Data Penelitian Metode PID

Sistem pengendalian PID diterapkan untuk menjaga kestabilan kecepatan motor penggerak utama *chain conveyor*, dengan acuan *set point* yang berasal dari keluaran sistem logika *fuzzy*. Nilai *set point* tersebut menjadi referensi kecepatan yang akan dibandingkan dengan kecepatan aktual motor yang dibaca melalui sensor *rotary encoder*. Selisih antara nilai referensi dan nilai aktual menghasilkan sinyal kesalahan (*error signal*) yang diolah oleh algoritma PID secara berulang hingga mencapai nilai mendekati nol, yang menandakan bahwa kecepatan motor telah mendekati nilai yang diharapkan.

Untuk menunjang proses identifikasi sistem serta penyetelan parameter kendali PID yang akurat, dilakukan pengumpulan data melalui serangkaian uji coba langsung. Data yang dikumpulkan terdiri atas pasangan nilai frekuensi *inverter* sebagai *input* dan kecepatan putaran motor (RPM) sebagai *output*. Frekuensi dikendalikan secara bertahap mulai dari 2 Hz hingga 50 Hz, sementara nilai RPM diperoleh dari hasil pembacaan sensor *rotary encoder* yang terpasang pada poros motor.



Gambar 9. Pengambilan Data Metode PID

Tabel 10 . Hasil Pengambilan Data Penelitian Metode PID

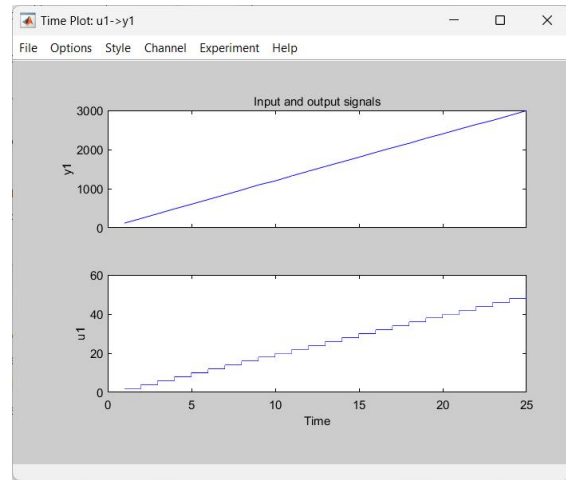
No	Frekuensi Inverter (Hz)	Kecepatan Motor (RPM)
1.	2	120
2.	4	240
3.	6	362
4.	8	487
5.	10	603
6.	12	724
7.	14	844
8.	16	966
9.	18	1097

10.	20	1200
11.	22	1327
12.	24	1450
13.	26	1570
14.	28	1687
15.	30	1805
16.	32	1930
17.	34	2049
18.	36	2160
19.	38	2288
20.	40	2402
21.	42	2523
22.	44	2642
23.	46	2748
24.	48	2872
25.	50	2994

Gambar 9 menunjukkan proses pengambilan data yang dilakukan dalam penelitian ini, sedangkan Tabel 10 menyajikan hasil lengkap dari pengujian tersebut. Berdasarkan data yang diperoleh, dapat diamati bahwa terdapat hubungan linier antara peningkatan frekuensi *inverter* dan kecepatan motor. Misalnya, pada frekuensi 30 Hz, kecepatan motor tercatat sebesar 1805 RPM, dan meningkat secara konsisten hingga mencapai 2994 RPM pada frekuensi 50 Hz. Pola ini menunjukkan bahwa motor induksi merespons perubahan frekuensi dengan peningkatan kecepatan yang proporsional, yang merupakan karakteristik penting dalam sistem kendali. Data ini menjadi fondasi dalam proses identifikasi fungsi alih (*transfer function*) dari motor induksi, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam simulasi performa sistem.

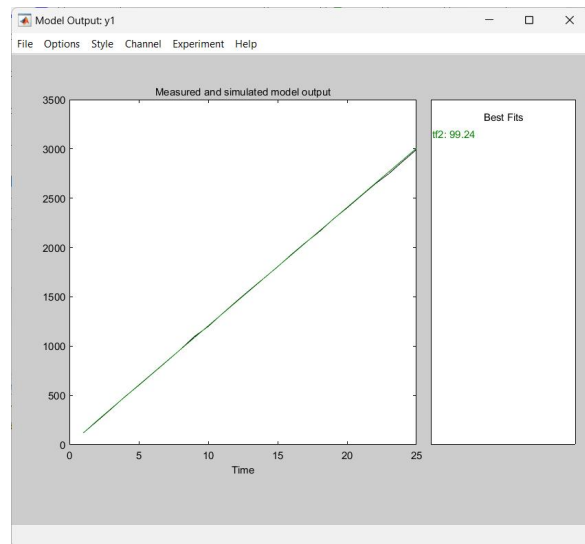
3.5 Simulasi PID Pada Software Matlab

Simulasi metode kendali *Proportional Integral Derivative* (PID) dilakukan sebagai tahap lanjutan setelah proses identifikasi sistem berhasil diselesaikan. Pada tahap ini, model matematis sistem yang diperoleh melalui *toolbox System Identification* pada software MATLAB digunakan sebagai dasar untuk melakukan simulasi dan analisis sistem kontrol. Model yang dihasilkan merepresentasikan hubungan antara sinyal masukan berupa nilai frekuensi *inverter* dan sinyal keluaran berupa kecepatan motor (RPM). Data hasil identifikasi kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik *time plot* untuk menganalisis pola dan kualitas hubungan antara sinyal masukan dan keluaran terhadap waktu.



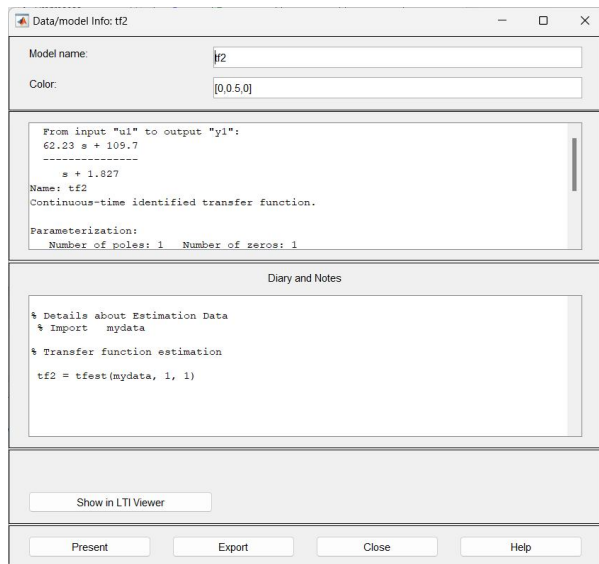
Gambar 10. Grafik Time Plot

Gambar 10 menunjukkan grafik *time plot* yang menggambarkan hubungan sinyal *input* ($u1$) dan *output* ($y1$) terhadap waktu. Grafik ini membantu dalam menilai konsistensi serta kecocokan respons sistem.



Gambar 11. Model Output

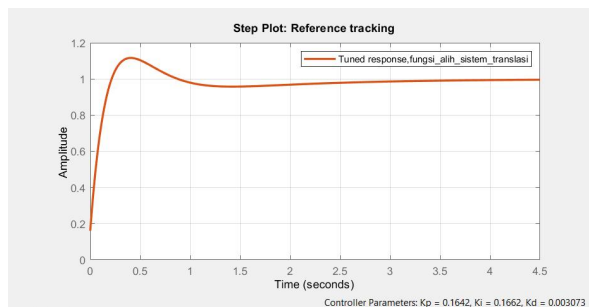
Setelah proses identifikasi sistem selesai, hasil validasi model divisualisasikan pada Gambar 11. Dari grafik tersebut, diperoleh nilai best fit sebesar 99,24%, yang menunjukkan bahwa model yang dihasilkan memiliki tingkat kesesuaian yang sangat tinggi dan mampu merepresentasikan sistem secara akurat.

Gambar 12. Model *Transfer Function*

Selanjutnya, dilakukan proses identifikasi untuk memperoleh model fungsi alih sistem (*transfer function*), seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Fungsi alih yang dihasilkan adalah:

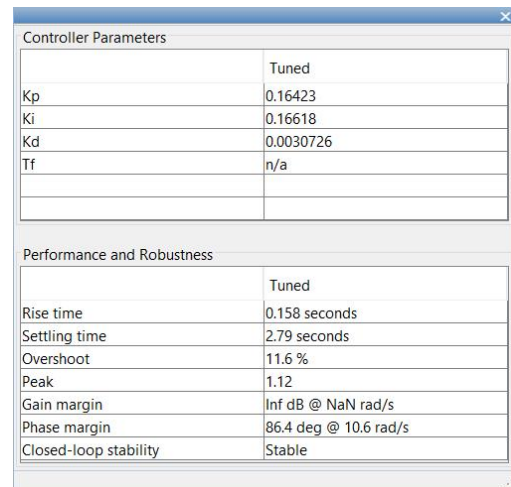
$$\frac{62,23 s + 109,7}{s + 1,827}$$

Model tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki karakteristik orde satu, dengan komponen dinamis sebesar 62,23 pada variabel s , yang mengindikasikan kepekaan sistem terhadap perubahan sinyal *input*. Sementara itu, konstanta 109,7 mencerminkan bagian statis dari sistem. Nilai *pole* sebesar 1,827 menunjukkan parameter redaman dan frekuensi alami sistem. Fungsi alih ini diperoleh dari estimasi sistem dengan satu *zero* dan satu *pole* menggunakan MATLAB.

Gambar 13. Grafik Simulasi *Step Response Sistem*

Simulasi lebih lanjut dilakukan untuk menganalisis respons sistem terhadap perubahan sinyal referensi, yang divisualisasikan dalam Gambar 13. Grafik tersebut menunjukkan *step response* dari sistem setelah dilakukan proses *auto tuning* PID menggunakan fitur bawaan MATLAB. Pada grafik terlihat bahwa sistem merespons perubahan dari 0 ke 1,2 dengan waktu naik yang cepat dan *overshoot* awal sekitar 10–15% dari nilai referensi. Setelah itu, sistem menunjukkan sedikit osilasi sebelum akhirnya mencapai kondisi tunak

(*steady state*) dalam waktu 2 hingga 3 detik. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki respon yang cukup cepat dan stabil terhadap perubahan sinyal kendali.



Gambar 14. Parameter Kontrol PID

Parameter kendali PID yang diperoleh dari hasil *auto tuning* ditampilkan pada Gambar 14, dengan nilai K_p sebesar 0,16423, K_i sebesar 0,166618, dan K_d sebesar 0,0030726. Parameter ini menunjukkan bahwa kendali telah disesuaikan untuk menghasilkan respon sistem yang optimal. Berdasarkan hasil simulasi, sistem memiliki waktu naik sebesar 0,158 detik, waktu tunak sebesar 2,79 detik, dan *overshoot* sebesar 11,6%. Selain itu, margin fasa sebesar 86,4 derajat pada frekuensi 10,6 rad/s menunjukkan bahwa sistem dalam kondisi *closed-loop* berada dalam keadaan stabil. Secara keseluruhan, hasil tuning PID menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti sinyal referensi secara stabil dan responsif.

4. Kesimpulan

Penerapan metode *Fuzzy Sugeno* dan PID pada sistem kontrol kecepatan motor *chain conveyor* terbukti efektif dalam menjaga kestabilan sistem. Dalam simulasi menggunakan *software* MATLAB dengan *input* berat material 900 gr, suhu motor 33,2°C, dan arus listrik 1,1 A, sistem *fuzzy* berhasil menentukan *set point* frekuensi *inverter* sebesar 15 Hz, yang sesuai dengan perhitungan manual sebelumnya. Pengendalian PID yang diterapkan dengan *set point* dari *fuzzy* mampu menjaga kestabilan kecepatan motor, dengan parameter kontrol $K_p = 0,16423$, $K_i = 0,166618$, dan $K_d = 0,0030726$. Kombinasi kedua metode ini efektif dalam menjaga kestabilan performa motor, menyesuaikan kecepatan secara adaptif terhadap perubahan beban, serta meminimalkan risiko *overload* selama operasi.

Daftar Rujukan

- [1] H. and Forbes, "Instruction Manual Instruction Manual," *Int. Bus.*, p. 37, 2012.
- [2] E. S. Munthe, I. A. T. Sitorus, F. Gerald, C. Manoppo, and D. P. Sari, "Sistem Pakar untuk Identifikasi Risiko Proyek Teknologi Informasi Berbasis Metode Fuzzy Logic," vol.

- 13, no. November, pp. 1710–1716, 2024.
- [3] J. Siburian, ¹) Jumari, A. Simangunsong, U. Darma, and A. Medan, “Studi Sistem Star Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Star Delta Pada Pt.Toba Pulp Lestari Tbk,” *J. Teknol. Energi Uda J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 81–87, 2021, [Online]. Available: <https://ejurnal.darmaagung.ac.id/index.php/teknologienergi/article/view/964>
- [4] A. Yafioda *et al.*, “Perbaikan Unjuk Kerja Motor 3 Fasa Sebagai Penggerak Konveyor Menggunakan Kontrol PID,” *J. Tek. Elektro*, vol. 12, no. I, pp. 83–91, 2023.
- [5] MUHAMMAD ISNAN SAICHONI, “Sistem Proteksi Motor Induksi Tiga Fasa Pada Mesin Hot Press Dengan Metode Fuzzy Logic,” *ITS Repos.*, 2021, [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/id/eprint/89423>
- [6] M. N. Ramadani, “Implementasi Kendali Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler Pid,” 2021, [Online]. Available: <https://repository.ubt.ac.id/repository/UBT17-12-2021-103536.pdf>
- [7] Baharuddin, *Instrumentasi Industri*, 5rd ed. PSGC Mechatronic Department, 2021.
- [8] B. Majid, S. Nisworo, and A. Trihasto, “Studi Transien Motor Induksi 3 Fasa Rotor Sangkar Kapasitas 2300V 700 Hp Pada Pt. Pertamina Ru Iv Cilacap,” *Theta Omega J. ...*, pp. 14–20, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.untidar.ac.id/index.php/thetaomega/article/view/5512>
- F. Fuad, D. Bagus, and D. Cahyono, “Perbandingan Konsumsi Energi Motor Induksi 3 Fasa Antara Kontaktor Dan Variable Frequency Drive (Inverter) Pada Mesin Moulding Di PT. Sejin Lestari Furniture,” *Mult. J. Glob. Multidiscip.*, vol. 2, no. 3, pp. 1446–1459, 2024, [Online]. Available: <https://journal.institiercom-edu.org/index.php/multiple>
- [10] S. Mulyana, “Fuzzy Logics and Its Applications,” *Univ. Gadjah Mada*, pp. 221–240, 2020.
- [11] M. Khalil, S. Bahri, and G. S. A, “Perbandingan Logika Fuzzy Metode Mamdani Dan Sugeno Untuk Memprediksi Jumlah Produksi Roti,” *Snti*, pp. 635–645, 2022.
- A. S. I. Akbar, “Sistem Pengambilan Keputusan Untuk Pemilihan Bidang Keahlian Bagi Mahasiswa Teknik Elektro, UniversitasMataram Menggunakan Logika Fuzzy Mamdani Bertingkat,” *Dielektrika*, vol. 8, no. 1, p. 68, 2021, doi: 10.29303/dielektrika.v8i1.257.