

Simulasi Pengontrol Logika *Fuzzy* Sudut *Pitch Blade* pada Turbin Angin Menggunakan Simulink MATLAB

Simulation of Blade Pitch Angle Fuzzy Logic Controller in Wind Turbine Using Simulink MATLAB

Eko Dwy Priyanto, Ahmad Azhar ZA

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Komputer Indonesia

Jl. Dipati Ukur No. 112, Bandung, Indonesia 40132

Email : eko.13119013@unikom.ac.id

Abstrak – Pada tempat dengan sumber daya angin yang terbatas, hanya pemasangan *Small Horizontal-Axis Wind Turbines* (SHAWT) yang dapat menguntungkan. Dengan kemajuan teknologi saat ini, turbin angin harus memiliki kontrol yang lebih canggih. Tujuan pada penelitian ini adalah membuat simulasi kontrol sudut *pitch blade* pada turbin angin menggunakan logika *fuzzy* berbasis *Matrix Laboratory* (MATLAB). Kemudian sudut *pitch blade* pada turbin angin dapat dikontrol secara stabil dan diketahui kecepatan *cut out speed* dan *cut in speed*. Penentuan parameter masukan kecepatan angin ditentukan terlebih dahulu agar parameter sudut *pitch blade* dapat diperoleh sehingga parameter keluaran daya mekanik yang dihasilkan sekitar 20.000 Watt. Hasil dari penelitian ini adalah simulasi dapat dibuat pada Simulink MATLAB dan *plant* sudut *pitch blade* pada turbin angin dapat mencapai kondisi yang stabil. Simulasi pengontrol logika *fuzzy* dalam *plant* sudut *pitch blade* pada turbin angin itu memiliki tingkat kestabilan yang tinggi. Apabila *plant* sudut *pitch blade* pada turbin angin tidak menggunakan pengontrol, maka daya mekanik yang dihasilkan dapat melebihi besar *rated power* sebesar 20.000 Watt. Kesimpulan dari penelitian ini adalah Simulink MATLAB dapat mensimulasikan proses pengendalian sudut *pitch blade* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Berikutnya, *plant* sudut *pitch blade* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy* dapat dikontrol secara stabil pada parameter masukan kecepatan angin 20 m/s dengan nilai *rated power* antara 18.000 Watt – 20.000 Watt.

Kata kunci : Simulasi, Turbin Angin, MATLAB, Pengontrol Logika *Fuzzy*, Sudut *Pitch Blade*.

Abstract - In places with limited wind resources, only the installation of *Small Horizontal-Axis Wind Turbines* (SHAWT) can be advantageous. With today's technological advances, wind turbines must have more sophisticated controls. The aim of this research is to simulate the blade pitch angle control in a wind turbine using fuzzy logic based on *Matrix Laboratory* (MATLAB). Then the blade pitch angle on the wind turbine can be controlled steadily. The wind speed input parameters are determined in advance so that the blade pitch angle parameter can be obtained, and the resulting mechanical power output parameters are in the 20.000 watt range. The study's findings include Simulink simulations in MATLAB and blade pitch angle plant on wind turbines that can achieve stable conditions. The fuzzy logic controller simulation in the blade pitch angle plant on the wind turbine has a high level of stability. If the blade pitch angle plant on the wind turbine does not use a controller, the resulting mechanical power can exceed the rated power of 20.000 Watts. The conclusion of this research is that Simulink in MATLAB can simulate the process of controlling the blade pitch angle on a wind turbine with a fuzzy logic controller. Next, the blade pitch angle plant on a wind turbine with a fuzzy logic controller can be controlled stably at an input wind speed of 20 m/s with a rated power value between 18.000 and 20.000 Watts.

Keywords : Simulation, Wind Turbine, MATLAB, Fuzzy Logic Controller, Blade Pitch Angle.

I. PENDAHULUAN

Energi angin merupakan energi alternatif untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat. Namun, pada tempat-tempat dengan sumber daya angin yang terbatas, hanya pemasangan *Small Horizontal-Axis Wind*

Turbines (SHAWT) atau turbin angin sumbu horizontal kecil yang dapat menguntungkan. Pada ketinggian turbin ini, hembusan angin biasanya tidak stabil dan memiliki turbulensi karena terdapat hambatan yang dilaluinya seperti bangunan dan pepohonan [1]. Kapasitas turbin angin untuk memberikan daya tergantung pada

variasi kecepatan dan arah angin. Karena itu, strategi pengendalian turbin angin sangat penting sebagai peralatan yang mengalihkan energi kinetik angin menjadi energi listrik [2]. Mengikuti kemajuan teknologi saat ini, turbin angin harus memiliki kontrol yang lebih mutakhir agar lebih mudah mengatur keluaran daya listrik yang dihasilkan oleh turbin angin. Logika *fuzzy* digunakan untuk pengaturan sudut *pitch blade* pada turbin angin, dengan tujuan mengubah sudut *pitch blade* pada turbin angin agar memiliki dampak signifikan terhadap kinerja turbin angin [3].

Penelitian sebelumnya mengenai pengontrol turbin angin pernah dilakukan oleh Jansuya dan Kumsiwan [4]. Penelitian tersebut membuat sebuah model turbin angin dengan *fixed pitch angle* pada *Matrix Laboratory* (MATLAB). Kelebihan pada penelitian tersebut yaitu simulator yang dapat menggerakkan model generator induksi dan juga dapat menampilkan karakteristik daya mekanik dan torsi mengikuti kecepatan angin. Tetapi, penelitian tersebut tidak menggunakan pengontrol otomatis sehingga menjadikan sistem tidak stabil dan hanya mengikuti kecepatan angin. Selain itu, apabila kecepatan angin terlalu tinggi sistem akan berhenti menghasilkan energi listrik dan harus dimatikan [4]. Tejaswi dan Chandra [5] dalam jurnalnya membuat sebuah sistem kontrol sudut *pitch* pada turbin angin menggunakan pengontrol *Proportional Integral Derivative* (PID). Penelitian ini dapat memvariasikan sudut kemiringan turbin angin, untuk meminimalkan penyimpangan keluaran daya dari nilai *preset*. Tetapi dinamika rotor tidak linier dengan batas saturasi pada sudut *pitch* dan laju *pitch* yang dikarenakan oleh komponen dengan frekuensi tinggi. Selain itu *overshoot* pada penelitian ini masih cenderung tinggi [5]. Logika *fuzzy* digunakan pada beberapa penelitian mengenai pengontrol *pitch angle* pada turbin angin. Arslan dan Erol [6] mempublikasikan analisis dari pengontrol sudut *pitch* pada rotor turbin angin menggunakan logika *fuzzy*. Penelitian ini memiliki kelebihan dalam keluaran yang lebih efisien dan stabil dengan mengendalikan rotor turbin dengan logika *fuzzy*. Namun, pada saat sistem berjalan frekuensi sistem terus mengalami peningkatan sehingga waktu untuk mencapai keadaan *steady state* juga meningkat [6]. Baburajan dan Ismail [7] mengusulkan dalam penelitiannya pemodelan dan pengontrol logika *fuzzy* pada sudut *pitch* dari turbin angin. Dalam penelitian ini Baburajan dan Ismail [7] menjelaskan dan membandingkan sistem dengan menggunakan pengontrol PID,

tanpa pengontrol dan dengan pengontrol logika *fuzzy* yang didapat hasil dari kontroler logika *fuzzy* mendapat respon yang optimal karena mengontrol sistem sudut *pitch* dari gangguan dan ketidakpastian yang terkait dengan sistem. Namun, *rise time* sistem dibanding dengan PID dan tanpa kontroler masih tergolong lambat [7]. Vijayan dkk [8]. mempublikasikan mengenai kontrol sudut *pitch* pada turbin angin menggunakan logika *fuzzy*. Pada penelitian ini dijelaskan pengontrol PID dimasukkan ke dalam sistem untuk kontrol kecepatan. Penelitian ini juga membandingkan *Proportional Integral* (PI) klasik dengan *fuzzy* PI dengan hasil yang diketahui bahwa *fuzzy* PI memberikan hasil yang lebih baik daripada kontroler PI klasik. Namun, daya aktif pada sistem akan mengalami *overshoot* cukup tinggi diawal *run* ketika sistem berputar diatas kecepatan pengenal pada kondisi angin kencang [8]. Ide yang sama juga dipublikasikan oleh Sahoo dkk [9]. Penelitian tersebut menjelaskan mengenai pengontrol sudut *pitch* untuk variabel kecepatan turbin angin menggunakan logika *fuzzy*. Hasilnya *Fuzzy Logic Controller* (FLC) memiliki kinerja yang lebih baik dari pada strategi kontrol *pitch* konvensional. Namun, torsi pada turbin angin sedikit mengalami fluktuasi di sekitar nilai target [9]. Munandar dan Aria [10] mempublikasikan logika *fuzzy* pada kasus pengereman otomatis. Dalam jurnalnya menjelaskan kontrol logika *fuzzy* digunakan dalam sistem pengereman otomatis untuk memilih nilai persentase rem yang akan diterapkan. Sistem dapat melakukan pengereman dengan kecepatan rendah atau tinggi dengan mampu berhenti pada jarak 10 cm dan 5 cm. Namun, penggunaan logika *fuzzy* bukan pada kasus pengontrol sudut *pitch* turbin angin [10]. Selain itu ada juga penggunaan logika *Fuzzy* mengontrol kepadatan lalu lintas pada persimpangan dua arah [11].

Berdasarkan jurnal-jurnal yang diperoleh dapat diketahui bahwa penggunaan logika *fuzzy* untuk kasus pengontrol sudut *pitch* pada turbin angin memiliki karakteristik pengontrol yang lebih baik jika dibandingkan dengan pengontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) maupun tanpa pengontrol. Kekurangan pada penelitian sebelumnya, penggunaan pada pengontrol PID akan membuat sistem menjadi cenderung kurang stabil dibandingkan dengan memakai pengontrol *fuzzy*. Kemudian jika tanpa pengontrol, sistem dapat melebihi besar *rated power* daya mekanik yang dihasilkan sebesar 20.000 Watt dan sulit untuk menentukan sudut *pitch blade* dalam suatu besar kecepatan angin tertentu. Jadi perbedaan

pada penelitian ini adalah kecepatan *cut out speed* dan *cut in speed* pada sistem pengontrol yang dapat diketahui.

Penelitian ini bertujuan untuk membuat simulasi pengontrol sudut *pitch blade* pada turbin angin menggunakan *Matrix Laboratory* (MATLAB) dan Simulink. Kemudian dapat diketahui kecepatan *cut out speed* dan *cut in speed* sudut *pitch* pada turbin angin dapat dikontrol secara stabil dengan pengontrol logika *fuzzy* sehingga daya mekanik yang dihasilkan sebesar 20.000 Watt. Sistematika pembahasan metode pada *paper* ini adalah sebagai berikut. Metodologi penelitian sistem simulasi pengontrol logika *fuzzy* pada turbin angin menggunakan Simulink MATLAB akan dibahas pada bagian kedua. Selanjutnya hasil dari simulasi dan analisis yang dilakukan pada penelitian ini akan ditampilkan pada bagian ketiga. Kemudian kesimpulan pada penelitian ini akan terdapat pada bagian keempat.

II. METODOLOGI

A. Pembuatan Model Sistem

Pada persamaan (1) menunjukkan persamaan matematis daya mekanik turbin yang dihasilkan berdasarkan kecepatan angin. Kemudian koefisien daya adalah fungsi dari *tip speed ratio* (λ) dan sudut *pitch* (β). Daya mekanik turbin angin ditentukan melalui koefisien daya. *Tip speed ratio* dapat dihitung berdasarkan persamaan (2) dan persamaan (4). Koefisien daya bergantung pada sudut *pitch blade* turbin angin dan hubungan linier antara kecepatan rotor turbin dan kecepatan angin. Selanjutnya koefisien daya menentukan efisiensi dari turbin angin. Selanjutnya besar koefisien daya pada sistem dapat dinyatakan berdasarkan pada persamaan (3).

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

P_m = Daya Mekanik (W)

ρ = Kerapatan Udara (kg/m^3)

A_r = Luas Daerah *Blade* (m^2)

C_p = Koefisien Daya

β = Sudut *Pitch Blade* (derajat)

V_m = Kecepatan Angin (m/s)

λ = *Tip Speed Ratio*

$$\lambda_T = \frac{R\omega_t}{V_w} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

λ_T = λ yang optimal

ω_t = Momen Inersia Turbin (rad/s)

R = Jari-Jari *Blade* (m)

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3 \beta - C_4 \beta^2 - C_5 \right) e^{(-C_6 \frac{1}{\lambda})} \dots\dots(3)$$

Keterangan:

C_1 = Nilai Koefisien ke-1

C_2 = Nilai Koefisien ke-2

C_3 = Nilai Koefisien ke-3

C_4 = Nilai Koefisien ke-4

C_5 = Nilai Koefisien ke-5

C_6 = Nilai Koefisien ke-6

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_T + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \dots\dots\dots(4)$$

Untuk memperoleh nilai parameter R dan parameter ω_t akan menggunakan persamaan-persamaan matematis yaitu persamaan (1) sampai dengan persamaan (4). Parameter-parameter lain seperti parameter ρ yang akan diberikan nilai yang sudah distandardisasi. Parameter ρ diberikan nilai $1,225 \text{ kg/m}^3$. Nilai parameter λ_T akan diberikan nilai yakni 8,1 dengan besar parameter β sebesar 0 derajat. Kemudian, nilai parameter V_w dan P_m diatur dengan nilai 20 m/s dan 20.000 Watt. Nilai C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , dan C_6 diberikan nilai yaitu 0,5176 untuk C_1 , 116 untuk C_2 , 0,4 untuk C_3 , 0 untuk C_4 , 2,9038 untuk C_5 , dan -2 untuk C_6 . Nilai koefisien daya yang diperoleh dapat memakai nilai $C_1 - C_6$ yang telah diberikan. Namun, nilai koefisien daya juga perlu adanya nilai λ . Nilai λ dapat didapatkan dengan menggunakan persamaan (4). Dengan menggunakan nilai parameter λ_T dan parameter β yang telah ditentukan, nilai parameter λ dapat diperoleh. Adapun proses memperoleh nilai parameter λ dapat dilihat berdasarkan persamaan matematis pada persamaan (5).

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda} &= \frac{1}{\lambda_T + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{1}{8,1 + 0,08 \cdot 0} - \frac{0,035}{0^3 + 1} \dots\dots\dots(5) \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{1}{8,1} - \frac{0,035}{1} \\ \frac{1}{\lambda} &= 0,088 \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{1}{0,088} = 11,4 \end{aligned}$$

Persamaan (5) menunjukkan nilai λ dengan memasukkan parameter-parameter pada persamaan (4). Nilai λ yang diperoleh adalah 11,4. Setelah memperoleh nilai λ , nilai koefisien daya dapat dicari dengan memasukkan nilai λ yang

diperoleh, nilai β , dan nilai $C_1 - C_6$. Proses untuk mendapatkan nilai koefisien daya dengan memasukkan parameter-parameter yang telah disebutkan dapat dilihat pada persamaan (6).

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\lambda} - C_3 \beta - C_4 \beta^2 - C_5 \right) e^{(-C_6 \frac{1}{\lambda})} \dots (6)$$

$$C_p(11,4; 0) = 0,5176 \left(116 \cdot \frac{1}{11,4} - 0,4 \cdot 0 - 0 \cdot 0^2 - 2,9308 \right) e^{(-21 \cdot \frac{1}{11,4})}$$

$$C_p(11,4;0) = 0,5943$$

Persamaan (6) menampilkan nilai koefisien daya yang diperoleh berdasarkan persamaan (3). Nilai koefisien daya yang diperoleh sebesar 0,5943. Dengan memperoleh nilai koefisien daya, nilai parameter R juga dapat diperoleh. Nilai parameter R diperoleh dengan memasukkan parameter-parameter lain berdasarkan persamaan (1). Adapun proses untuk memperoleh parameter R dapat dilihat pada persamaan (7).

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A_r C_p(\lambda, \beta) V_w^3 \dots (7)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V_w^3$$

$$20.000 = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot 0,5943 \cdot 20^3$$

$$R = \sqrt{\frac{20.000}{\frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot \pi \cdot 0,5943 \cdot 20^3}}$$

$$R = 1,48 \text{ m}$$

Persamaan (7) menyajikan nilai jari-jari *blade* pada turbin angin. Nilai parameter ini diperoleh dengan memasukkan nilai parameter-parameter yang terkait sesuai dengan yang ada pada persamaan (1) seperti kerapatan udara, koefisien daya, kecepatan angin, dan daya mekanik. Nilai parameter jari-jari *blade* yang diperoleh ini akan digunakan untuk mengetahui besar parameter momen inersia turbin berdasarkan pada persamaan (2). Dengan parameter V_w , λ , dan R, parameter momen inersia turbin akan diperoleh. Proses untuk mendapatkan nilai parameter momen inersia turbin dapat dilihat pada persamaan (8).

$$\lambda_T = \frac{R \omega_t}{V_w}$$

$$\omega_t = \frac{\lambda_T V_w}{R} \dots (8)$$

$$\omega_t = \frac{8,1 \cdot 20}{1,48}$$

$$\omega_t = 109,46 \text{ rad/s}$$

Persamaan (8) memperlihatkan nilai parameter ω_t atau parameter momen inersia turbin. Besar parameter tersebut yang diperoleh sebesar 109,46 rad/s. Parameter ω_t dan parameter R akan dijadikan sebagai acuan pembuatan model diagram blok pada Simulink MATLAB berdasarkan persamaan (7) dan persamaan (8). Kemudian, dalam memperoleh daya generator dan momen inersia generator diperlukan persamaan-persamaan matematis. Adapun persamaan-persamaan matematis yang diperlukan dapat dilihat pada persamaan (9), persamaan (10), persamaan (11), persamaan (12), dan persamaan (13).

$$\omega_{\text{total}} = \omega_g + G^2 \omega_t \dots (9)$$

Keterangan:

ω_{total} = Momen Inersia Total (rad/s)

ω_g = Momen Inersia Generator (rad/s)

G = Konstanta *Gearbox*

ω_t = Momen Inersia Turbin (rad/s)

$$C_{\text{total}} = J_{\text{total}} \frac{d\omega_{\text{mek}}}{dt} \dots (10)$$

Keterangan:

C_{total} = Momen Gaya Total (Nm)

ω_{mek} = Momen Inersia Mekanik Generator (rad/s)

Persamaan (10) menunjukkan persamaan matematis untuk memperoleh momen gaya total. Persamaan matematis ini diperoleh berdasarkan hukum Newton ke-2 pada gerak rotasi yaitu $\Sigma C = \omega \alpha$ dengan $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$. Parameter C merupakan momen gaya dan parameter ω merupakan momen inersia.

$$C_t = \frac{1}{\omega_t} P_m \dots (11)$$

Keterangan:

C_t = Momen Gaya Turbin (Nm)

$$C_g = \frac{1}{G} C_t \dots (12)$$

Keterangan:

C_g = Momen Gaya Generator (Nm)

$$C_{\text{total}} = C_g - C_{\text{em}} - C_f = \omega_{\text{total}} \frac{d\omega_{\text{mek}}}{dt} \dots (13)$$

Keterangan:

C_{em} = Momen Gaya Elektromekanik (Nm)

C_f = Momen Gaya Gesek pada Generator (Nm)

Dari persamaan (9), persamaan (10), persamaan (11), persamaan (12), dan persamaan (13) dapat diperoleh parameter momen inersia mekanik generator. Dengan adanya nilai parameter momen inersia mekanik generator, nilai parameter daya generator dapat diperoleh juga. Persamaan matematis untuk memperoleh parameter daya generator dapat dilihat pada persamaan (14).

$$P_g = C_g \omega_{mek} \dots\dots\dots(14)$$

Keterangan:

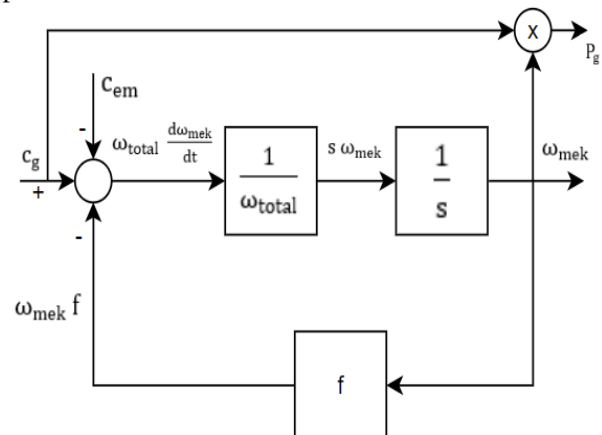
P_g = Daya Generator (Watt)

Parameter daya generator dan momen inersia mekanik generator diperoleh berdasarkan persamaan (9), persamaan (10), persamaan (11), persamaan (12), persamaan (13), dan persamaan (14). Persamaan-persamaan ini akan digunakan sebagai acuan dalam pembuatan diagram blok pada proses penentuan nilai parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik generator. Diagram blok tersebut akan menjadi bagian dalam model diagram blok yang akan dibuat pada Simulink MATLAB. Diagram blok yang dibuat pada Simulink MATLAB tersebut untuk memudahkan dalam memahami proses penentuan parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik pada generator berdasarkan persamaan (9) sampai dengan persamaan (14). Adapun diagram blok yang dibuat untuk menentukan nilai parameter daya generator dan momen inersia mekanik generator dapat dilihat pada **Gambar 1**.

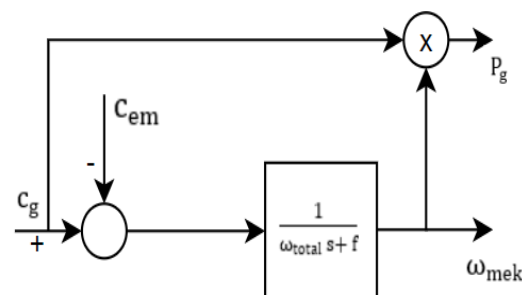
Pada **Gambar 1** menunjukkan diagram blok proses penentuan parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik generator. Diagram blok tersebut dibuat berdasarkan persamaan (13) dan persamaan (14) dalam memperoleh parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik pada generator. Dalam proses diagram blok ini juga terdapat proses transformasi *Laplace* pada bagian $\omega_{total} \frac{d\omega_{mek}}{dt}$ menjadi $\omega_{total} s \omega_{mek}$. Kemudian, diagram blok tersebut juga dapat dibuat lebih sederhana seperti pada **Gambar 2**.

Gambar 2 menunjukkan diagram blok parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik generator yang lebih sederhana dibandingkan pada **Gambar 1**. Dengan diagram blok pada **Gambar 2**, diagram blok penentuan parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik generator dengan Simulink

MATLAB dapat dibuat dengan lebih sederhana. Diagram blok yang dibuat lebih sederhana menyebabkan sistem dapat bekerja lebih efisien. Dengan sistem yang bekerja lebih efisien, parameter yang ada pada diagram blok dapat diberikan suatu nilai sehingga parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik generator dapat diperoleh. Untuk parameter yang ada pada diagram blok tersebut akan diberikan nilai. Parameter ω_{total} diberikan nilai 0,21 dan parameter f diberikan nilai 0,0001.



Gambar 1. Diagram Blok Parameter Daya Generator dan Parameter Momen Inersia Mekanik Generator



Gambar 2. Diagram Blok Parameter Daya Generator dan Parameter Momen Inersia Mekanik Generator yang Lebih Sederhana

B. Pembuatan Fungsi Keanggotaan

Karena nonlinieritas sistem tenaga dan masalah linierisasi, hukum kontrol turbin angin kecepatan variabel tidak dapat bekerja dengan benar dengan metode konvensional. Penggunaan kontrol *fuzzy* dapat mengatasi permasalahan tersebut. Kontroler berbasis logika *fuzzy* yang dapat mengatasi permasalahan tersebut terdiri atas tahap masukan, tahap pemrosesan, dan tahap keluaran.

Tahap masukan akan mengubah masukan data tajam ke representasi *fuzzy* yang menggabungkan ketidakjelasan dan ketidaktepatan dalam bahasa alami, untuk diproses lebih lanjut dalam FLC. Pemrosesan atau tahap evaluasi aturan dilakukan untuk setiap aturan yang sesuai dan menghasilkan

hasil untuk masing-masing fungsi keanggotaan, kemudian menggabungkan hasil dari aturan tersebut menggunakan metode *Centroid* keluaran atau tahap defuzzifikasi kemudian mengubah hasil gabungan kembali menjadi nilai keluaran kontrol tertentu. Sumbu x pada fungsi keanggotaan menunjukkan sudut *pitch* sedangkan sumbu y menunjukkan nilai *crisp*.

Terdapat 15 masukan fungsi keanggotaan. Dengan menggunakan fungsi keanggotaan *linear z-shape* terdapat pada WS-7, *triangle shape*, *trapezoidal shape*. Fungsi keanggotaan dipetakan untuk nilai *crisp value* dapat dilihat pada **Gambar 3**. Keluaran dari fungsi keanggotaan juga berjumlah 15 dalam bentuk konstanta. Masukan pada fungsi keanggotaan adalah *WindSpeed* dan keluaran pada fungsi keanggotaan adalah *pitch*.

Aturan pengontrol logika *fuzzy* berasal dari pengalaman dan pengetahuan tentang sistem kontrol. Dalam penelitian ini logika *fuzzy* dengan sugeno digunakan untuk mekanisme inferensi. Pengontrol logika *fuzzy* dengan sugeno akan memberikan keluaran dengan mengikuti aturan yang sudah dibuat. Adapun aturan pengontrol logika *fuzzy* pada penelitian ini terdapat pada **Tabel I**.

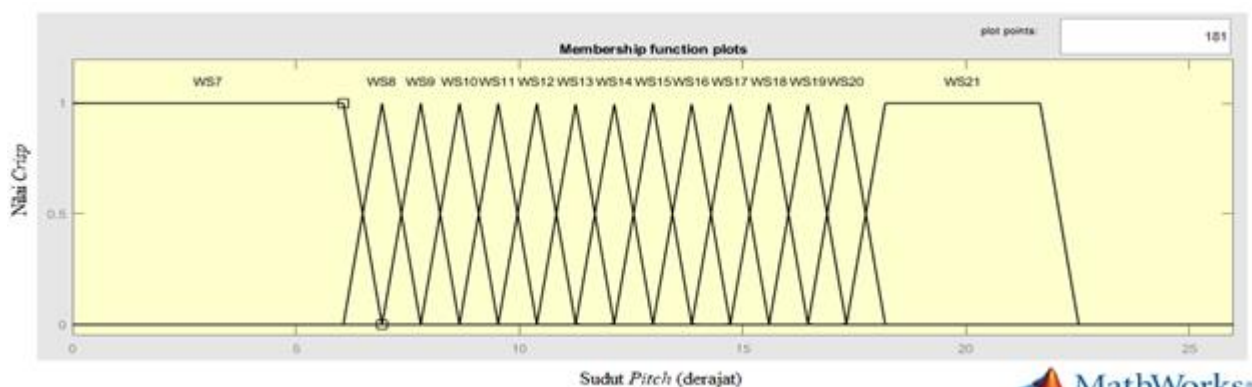
Tabel I. Aturan Pengontrol Logika Fuzzy

Masukan	Keluaran
If WindSpeed Mfs' is 7	Then pitch is 0
If WindSpeed Mfs' is 8	Then pitch is 4
If WindSpeed Mfs' is 9	Then pitch is 11,29
If WindSpeed Mfs' is 10	Then pitch is 16,58
If WindSpeed Mfs' is 11	Then pitch is 20,64
If WindSpeed Mfs' is 12	Then pitch is 23,89
If WindSpeed Mfs' is 13	Then pitch is 23,89
If WindSpeed Mfs' is 14	Then pitch is 28,8
If WindSpeed Mfs' is 15	Then pitch is 30,71
If WindSpeed Mfs' is 16	Then pitch is 32,35
If WindSpeed Mfs' is 17	Then pitch is 33,79
If WindSpeed Mfs' is 18	Then pitch is 35,05
If WindSpeed Mfs' is 19	Then pitch is 36,16
If WindSpeed Mfs' is 20	Then pitch is 37,16
If WindSpeed Mfs' is 21	Then pitch is 37,16

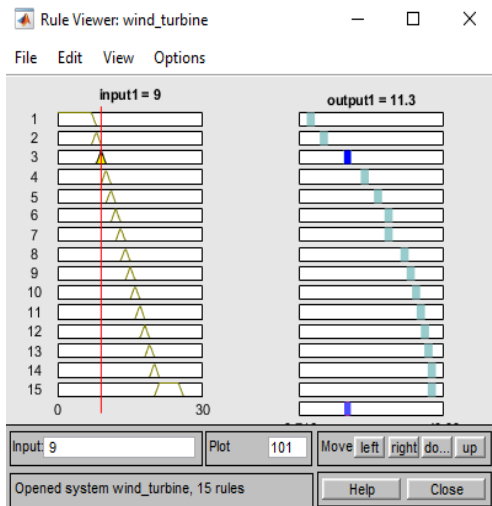
Pada **Tabel I** menunjukkan aturan-aturan yang digunakan dalam pengontrol logika *fuzzy* pada *plant* sudut *pitch blade* pada turbin angin. Aturan-aturan yang dibuat berjumlah 15 aturan. 15 aturan tersebut bergantung pada nilai parameter masukan yaitu *WindSpeed*. Parameter *WindSpeed* sebesar nilai tertentu, maka pengontrol logika *fuzzy* akan menghasilkan parameter keluaran sudut *pitch*. Parameter sudut *pitch* akan memberikan nilai sesuai dengan parameter masukan *WindSpeed* yang sudah ditentukan. Misalnya, apabila nilai parameter masukan *Windspeed* adalah 7 m/s, maka nilai parameter keluaran sudut *pitch* akan bernilai 0 derajat. Kemudian, jika nilai parameter masukan *WindSpeed* diberikan nilai 15 m/s, maka nilai parameter keluaran sudut *pitch* adalah 30,71 derajat. Oleh karena itu, 15 aturan yang digunakan pada pengontrol logika *fuzzy* tersebut bergantung pada parameter *WindSpeed* dan parameter sudut *pitch*.

C. Ilustrasi Perhitungan FIS

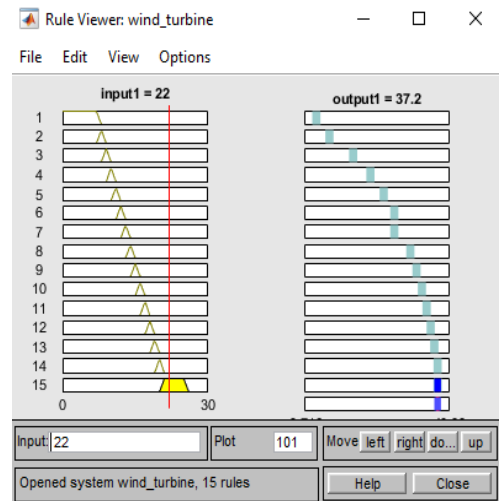
Pada penelitian ini terdapat 15 aturan yang akan digunakan untuk memperoleh nilai keluaran pada pengontrol. Nilai masukan pada penelitian ini didapat dari nilai kecepatan angin sedangkan nilai keluarannya didapat dari sudut *pitch* yang dipengaruhi oleh nilai kecepatan angin atau nilai masukan. Masukan dan keluaran sistem tersebut akan menggunakan metode FIS sebagai perhitungan yang terdapat dalam *toolbox* yang tersedia pada MATLAB yaitu *toolbox fuzzy*. Metode FIS yang digunakan pada *toobox fuzzy* yang tersedia pada MATLAB adalah sugeno. Digunakan empat masukan kecepatan yaitu 9 m/s, 14 m/s, 18 m/s dan 22 m/s. Ilustrasi perhitungan FIS pada penelitian ini terdapat pada **Gambar 4**, **Gambar 5**, **Gambar 6**, dan **Gambar 7**.



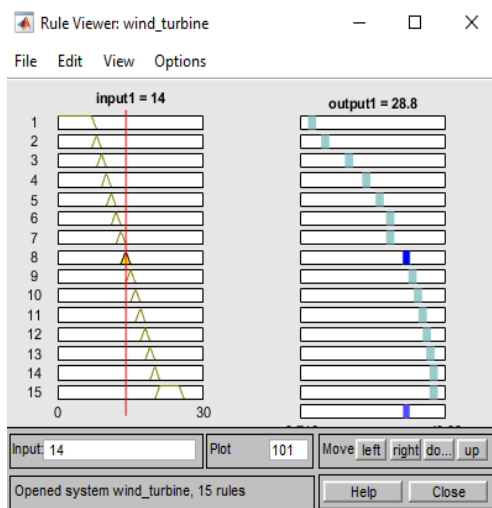
Gambar 3. Fungsi Keanggotaan



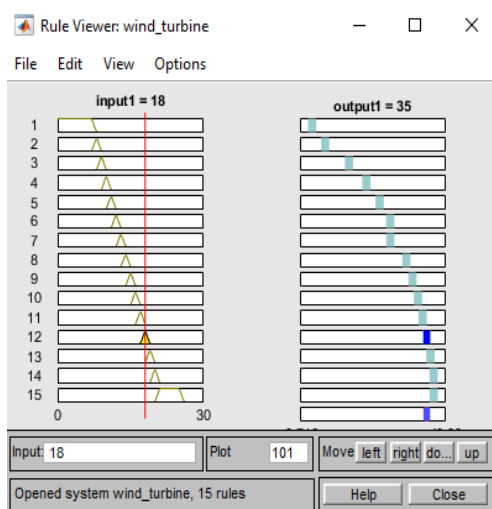
Gambar 4. Perhitungan FIS 9 m/s



Gambar 7. Perhitungan FIS 22 m/s



Gambar 5. Perhitungan FIS 14 m/s



Gambar 6. Perhitungan FIS 18 m/s

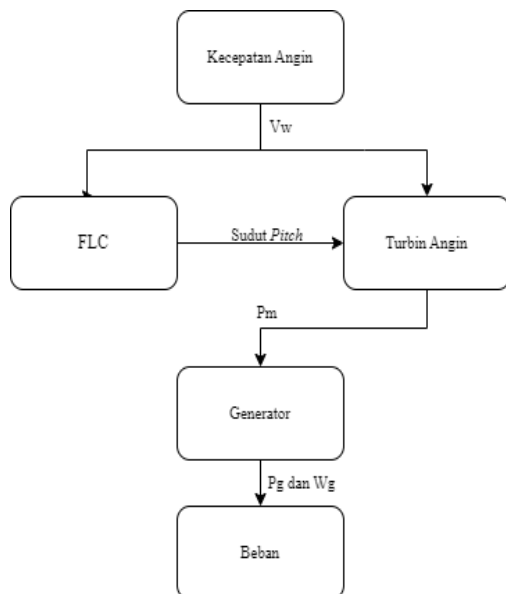
Berdasarkan **Gambar 4**, **Gambar 5**, **Gambar 6**, dan **Gambar 7** dapat diketahui bahwa keluaran dari perhitungan FIS dengan 9 m/s, 14 m/s, 18 m/s dan 22m/s pada saat masukan bernilai 9 m/s hasil keluaran yang diperoleh sebesar 11,3 derajat. Begitupun dengan nilai masukan lainnya 14 m/s, 18 m/s dan 22 m/s yang nilai keluarannya adalah 28,8 derajat, 35 derajat dan 37,2 derajat. Nilai parameter keluaran yang dihasilkan dari proses perhitungan FIS ini berdasarkan 15 aturan yang sudah dibuat. Selain itu, parameter masukan *WindSpeed* berupa fungsi keanggotaan *linear z-shape* terdapat pada WS-7, *triangle shape*, *trapezoidal shape*. Adanya 15 parameter masukan *Windspeed* yang sudah ditentukan dapat menghasilkan parameter keluaran sudut *pitch*. Nilai parameter keluaran sudut *pitch* diatur dengan nilai konstanta. Dengan demikian, proses perhitungan FIS dapat dilakukan apabila sudah terdapat aturan-aturan dengan jumlah 15 aturan yang sudah dibuat dengan diiringi adanya parameter masukan yaitu parameter *WindSpeed* dan parameter keluaran yang dihasilkan yaitu parameter sudut *pitch*.

D. Diagram Blok Pengontrol Sudut *Pitch* Menggunakan Pengontrol Logika Fuzzy

Diagram blok pengontrol sudut *pitch* menggunakan pengontrol logika fuzzy diperlukan untuk menguji sistem pengontrol sudut *pitch blade* pada turbin angin. Dengan dibuatnya diagram blok tersebut pengujian sistem pengontrol sudut *pitch blade* pada turbin angin dengan pengontrol logika fuzzy dapat disimulasikan. Simulasi sistem ini dimaksudkan untuk mengatur sudut *pitch*

dengan kecepatan angin dinamis menggunakan model matematis turbin angin yang terhubung ke *Fuzzy Logic Controller* (FLC). Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**, perubahan sudut *pitch* memiliki dampak yang besar terhadap jumlah koefisien daya, dan jumlah koefisien daya memiliki dampak yang besar terhadap daya mekanik yang dihasilkan.

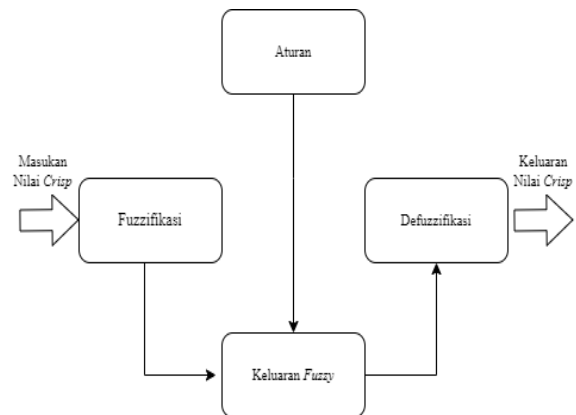
Pada **Gambar 8** menyajikan diagram blok pengontrol sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Kecepatan angin sebagai parameter masukan pada FLC digunakan untuk menentukan nilai parameter keluaran pada FLC yaitu sudut *pitch*. Setelah, nilai parameter sudut *pitch* diperoleh, nilai parameter tersebut dengan nilai parameter kecepatan angin akan menghasilkan parameter daya mekanik pada generator. Parameter daya mekanik ini juga akan digunakan untuk mendapatkan dua parameter lainnya yaitu parameter daya generator dan parameter momen inersia mekanik pada generator. Parameter-parameter tersebut membutuhkan aturan-aturan agar menghasilkan suatu nilai keluaran yang berdasarkan pada FLC. Oleh karena, aturan-aturan tersebut harus dibuat pada pengontrol logika *fuzzy*.



Gambar 8. Diagram Blok Pengontrol Sudut *Pitch*

Untuk membuat aturan pengontrol logika *fuzzy*, langkah pertama yang harus dilakukan adalah menentukan fungsi keanggotaan logika *fuzzy* untuk parameter masukan dan parameter keluaran. Langkah kedua adalah mengubah nilai *crisp* menjadi nilai *fuzzy* yang disebut dengan proses fuzzifikasi. Langkah selanjutnya adalah langkah ketiga yang memberikan aturan untuk

penalaran logika *fuzzy* dan langkah terakhir mengubah nilai *fuzzy* menjadi nilai *crisp* yang disebut proses defuzzifikasi. Blok diagram operasi kontrol logika *fuzzy* ditunjukkan pada **Gambar 9**.



Gambar 9. Diagram Blok Proses Fuzzifikasi

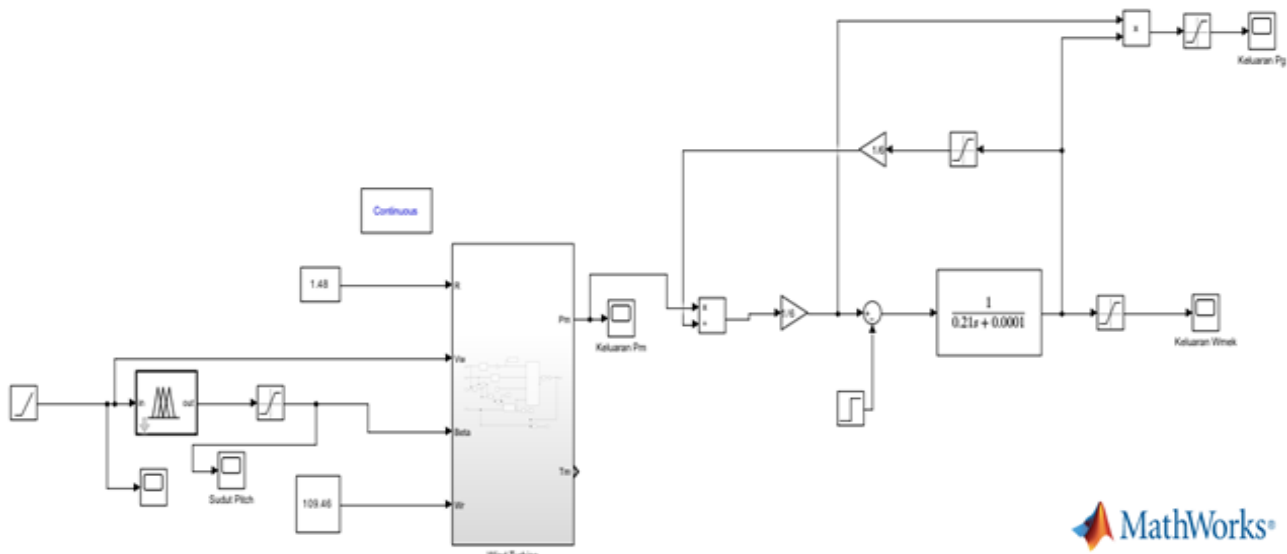
Pada **Gambar 9** menunjukkan proses fuzzifikasi pada pengontrol logika *fuzzy*. Nilai *crisp* menjadi masukan dalam proses fuzzifikasi. Dengan mengikuti aturan yang sudah dibuat, keluaran logika *fuzzy* dapat diperoleh sehingga proses defuzzifikasi dapat dilaksanakan. Proses defuzzifikasi ini diperlukan untuk memperoleh kembali keluaran dari pengontrol logika *fuzzy* dengan berbasis nilai *crisp*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengontrolan sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy* dilakukan secara simulasi. Pembuatan simulasi *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy* dan pengujian simulasi menggunakan Simulink pada perangkat lunak MATLAB.

A. Pembuatan Model Diagram Blok Simulasi *Plant* Sudut *Pitch* dengan Pengontrol Logika *Fuzzy* pada Turbin Angin

Pembuatan model diagram blok simulasi *plant* sudut *pitch* dengan pengontrol logika *fuzzy* pada turbin angin memakai menu-menu yang ada pada Simulink MATLAB. Menu-menu ini menunjang dalam pembuatan diagram blok yang dibutuhkan dalam proses dan hasil simulasi. Selain itu, menu-menu ini juga memudahkan dalam pembuatan model diagram blok karena terdapat deskripsi kegunaan dari menu tersebut. Model diagram blok *plant* sudut *pitch* pada turbin angin yang telah dibuat pada Simulink MATLAB dapat dilihat pada **Gambar 10**.



Gambar 10. Diagram Blok *Plant Sudut Pitch* pada Turbin Angin dengan Pengontrol Logika Fuzzy

Gambar 10 adalah gambar yang menampilkan model diagram blok *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Diagram blok tersebut menggunakan beberapa menu yang disediakan oleh Simulink MATLAB. Menu-menu ini terdiri atas *library* yang dapat diunduh dari laman resmi MATLAB yang membantu dalam memodelkan suatu sistem pengontrol, misalnya pengontrol sudut *pitch* pada turbin angin.

Menu *library* yang digunakan dalam pembuatan *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy* merupakan menu *library* Simulink. Menu *library* ini tidak perlu diunduh melalui laman resmi MATLAB karena ketika memasang MATLAB, menu ini sudah langsung dipasang pula. Menu *library* Simulink berisi beberapa subsistem yang akan digunakan dalam pembuatan diagram blok *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*.

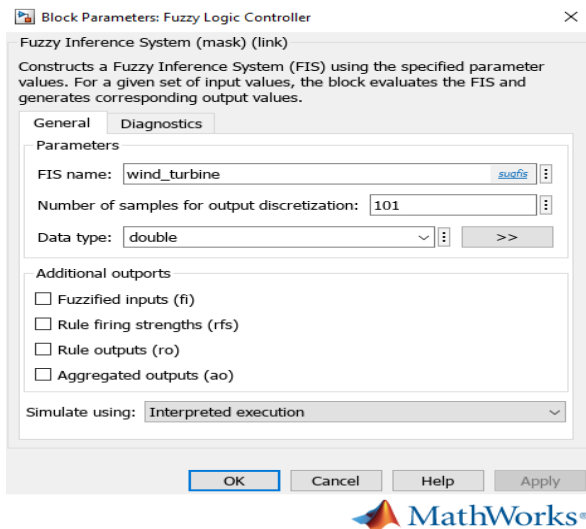
Subsistem diperlukan dalam pembuatan pembuatan diagram blok *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Beberapa subsistem yang diperlukan seperti subsistem *ramp*, subsistem *constant*, subsistem *saturation*, subsistem *product*, subsistem *logika fuzzy controller*, subsistem *continous*, subsistem *scope*, subsistem *transfer function*, subsistem *gain*, subsistem *step*, dan subsistem *wind turbine*. Selain subsistem *wind turbine*, subsistem lain merupakan subsistem bawaan yang langsung ada pada Simulink MATLAB.

Subsistem *ramp* digunakan untuk menghasilkan rentang nilai yang selalu naik dengan memberikan batasan dengan nilai tertentu.

Subsistem ini nantinya menjadi nilai masukan sistem pada diagram blok *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Kemudian, subsistem *constant* berfungsi untuk memberikan nilai konstanta yang diperlukan dalam diagram blok yang akan dibuat. Dari **Gambar 8**, konstanta dengan nilai 1,48 dan 109,46 merupakan konstanta yang diperoleh berdasarkan persamaan (7) dan persamaan (8).

Subsistem *saturation* dibutuhkan agar suatu nilai yang dihasilkan pada proses sebelumnya tidak bernilai nol dan negatif. Pada subsistem *product*, operasi matematis dapat dilakukan misalnya operasi perkalian dan operasi penjumlahan. Kemudian, subsistem *fuzzy logic controller* berguna dalam proses pengendalian sudut *pitch* pada turbin angin. Subsistem ini akan memanggil suatu fail dengan format *Fuzzy Inference System* (FIS) yang telah dibuat sebelumnya. Fail dengan format FIS ini berisi masukan, keluaran, dan aturan-aturan yang dibuat dalam pengendalian sudut *pitch* pada turbin angin. Fail ini dilakukan *export* agar dapat tersimpan pada *workspace* MATLAB sehingga dapat dipanggil subsistem tersebut pada **Gambar 11**.

Subsistem *continous* adalah subsistem berikutnya. Subsistem ini digunakan dalam proses simulasi. Dengan adanya subsistem *continous*. Proses simulasi dapat berjalan secara terus menerus. Agar dapat melihat hasil simulasi, subsistem *scope* berperan dalam hal tersebut. Subsistem *scope* menampilkan hasil simulasi berupa grafik sesuai dengan keluaran yang dihasilkan.



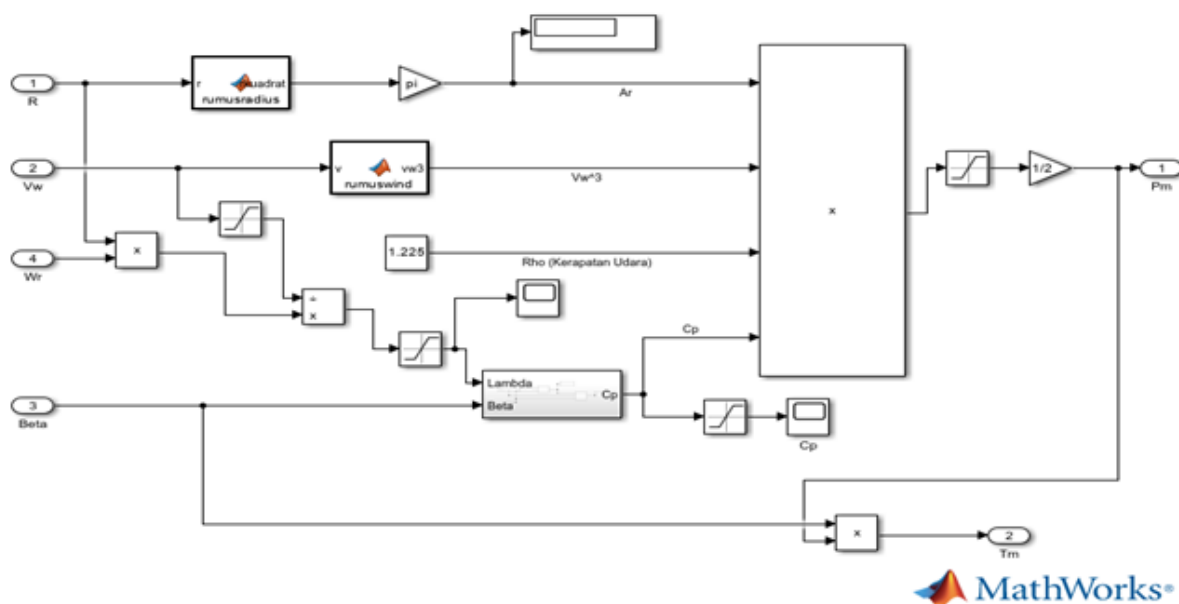
Gambar 11. Subsistem Fuzzy Logic Controller

Selanjutnya, subsistem *transfer function* berfungsi untuk memasukkan suatu fungsi transfer dalam suatu model diagram blok. Nilai yang dimasukkan pada subsistem tersebut berdasarkan nilai yang sudah diatur dan diagram blok pada **Gambar 12**. Pada subsistem *gain*, nilai *gain* yang ditentukan dapat dimasukkan dalam proses simulasi. Sama halnya dengan subsistem *ramp*, subsistem *step* juga menghasilkan suatu nilai dengan batasan tertentu. Akan tetapi, subsistem *step* menghasilkan nilai yang selalu bernilai satu sampai dengan batasan tertentu yang telah ditentukan.

Subsistem berikutnya adalah subsistem *wind turbine*. Subsistem ini terdapat enam parameter

dengan empat parameter masukan dan dua parameter keluaran. Empat masukan berupa jari-jari *blade turbine*, kecepatan angin, sudut *pitch blade turbine*, dan kecepatan sudut turbin. Kemudian dua keluarannya adalah daya mekanik yang dihasilkan dan momen inersia mekanik pada generator yang dihasilkan oleh turbin angin. Subsistem *wind turbine* ini dibuat dengan menerapkan subsistem-subsistem lain yang disediakan oleh Simulink MATLAB. Model diagram blok subsistem *wind turbine* yang telah dibuat dapat dilihat pada **Gambar 12**.

Pada **Gambar 12** dapat dilihat nilai konstanta yaitu 1,225. Nilai ini berasal dari nilai parameter ρ yang sudah ditetapkan. Kemudian, pada **Gambar 12** terdapat juga subsistem-subsistem yang telah dijelaskan sebelumnya dalam model diagram blok sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Namun, ada subsistem-subsistem yang lain seperti subsistem *display*, subsistem *inport* dan *outport*, subsistem *matlab function*, dan subsistem koefisien daya. Subsistem *display* digunakan untuk menampilkan hasil proses sebelumnya dalam bentuk nilai dengan tipe *double*. Kemudian, subsistem *inport* dan *outport* berkaitan dengan empat parameter masukan dan dua parameter keluaran pada subsistem *wind turbine*. Subsistem tersebut menghubungkan antara nilai parameter-parameter masukan yang telah ditentukan di dalam model diagram blok sudut *pitch* pada turbin angin dengan diagram blok turbin angin yang telah dibuat.



Gambar 12. Diagram Blok Subsistem Wind Turbine

Kemudian, pada subsistem *matlab function* dapat digunakan untuk memasukkan fungsi berupa persamaan matematis yang dibutuhkan dalam proses simulasi. Pada subsistem *wind turbine* menggunakan dua *matlab function* untuk memasukkan dua persamaan matematis yaitu persamaan luas dari *blade* turbin angin dan persamaan kecepatan angin yang dapat dilihat pada persamaan (1). Untuk persamaan matematis yang ditulis pada *matlab function* dapat dilihat pada **Gambar 13** dan **Gambar 14**.

```

1 function rkuadrat = rumusradius(r)
2
3 rkuadrat = r^2;

```

Gambar 13. Matlab Function rumusradius

```

1 function vw3 = rumuswind(v)
2
3 vw3 = vb^3;

```

Gambar 14. Matlab Function rumuswind

Subsistem selanjutnya adalah subsistem koefisien daya. Subsistem ini dibuat secara mandiri seperti halnya dengan subsistem *wind turbine*. Model diagram blok subsistem koefisien daya dapat dilihat pada **Gambar 15**.

Pada **Gambar 15** dapat dilihat beberapa subsistem-subsistem yang telah dijelaskan sebelumnya. Dua subsistem *matlab function* menyajikan persamaan matematis yang ditunjukkan pada persamaan (1) dan persamaan (3). Selanjutnya, dua subsistem *inport* berupa dua parameter masukan yaitu parameter *tip speed ratio* dan parameter sudut *pitch blade turbine*. Untuk subsistem *outport* ditujukan untuk parameter koefisien daya. Kemudian, ada subsistem *display* untuk menampilkan keluaran dari persamaan-persamaan matematis pada subsistem *matlab function*.

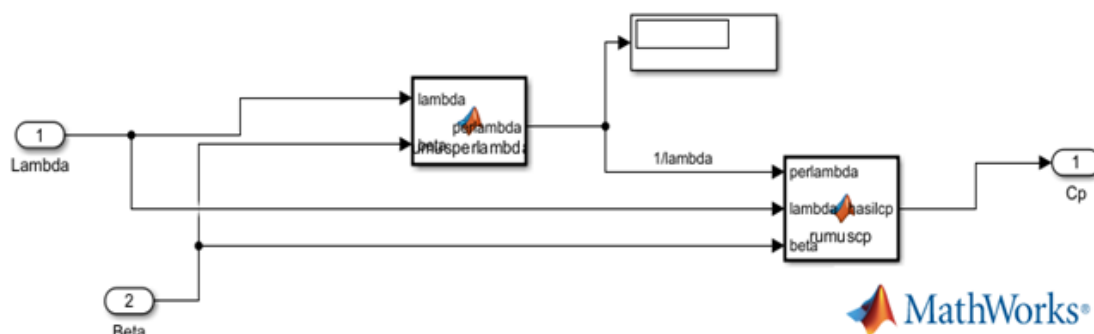
Pada **Gambar 10**, **Gambar 12**, dan **Gambar 15** dibuat berdasarkan model persamaan

matematis yang digunakan. Model persamaan matematis yang digunakan adalah persamaan matematis untuk *plant* sudut *pitch* pada turbin angin. Kemudian, pengontrol logika *fuzzy* menggunakan parameter masukan, parameter keluaran, dan parameter aturan yang dapat dilihat pada **Tabel I**.

Dengan menggunakan model diagram blok pada **Gambar 10**, **Gambar 12**, dan **Gambar 15** proses simulasi *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy* dapat dilakukan. Simulasi *plant* sudut *pitch* pada turbin angin yang dilakukan akan memperhatikan stabilan sistem dengan melihat parameter koefisien daya yang dihasilkan. Koefisien daya tersebut memengaruhi besar daya mekanik yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengendalian sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy* dapat diamati kestabilan sistem dalam menghasilkan parameter keluaran daya mekanik dan momen inersia mekanik yang diperoleh dari proses simulasi.

B. Pengujian Simulasi *Plant* Sudut *Pitch* pada Turbin Angin

Pengujian simulasi *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dilakukan dengan memasukkan nilai parameter kecepatan angin dengan rentang nilai tertentu sebagai parameter masukan. Setelah memasukkan parameter tersebut dilakukan proses simulasi yang menghasilkan parameter keluaran daya mekanik dan momen inersia mekanik pada generator yang dihasilkan oleh turbin angin. Selain itu, proses simulasi yang dilakukan akan menghasilkan parameter koefisien daya. Pengujian akan dilakukan sebanyak tiga kali. Pengujian pertama dilaksanakan dengan menerapkan kecepatan angin pada nilai 0 – 7 m/s dengan pengontrol logika *fuzzy*.



Gambar 15. Diagram Blok Subsistem Koefisien Daya

Kemudian, pengujian kedua menerapkan nilai kecepatan angin pada rentang nilai 0 – 26 m/s dengan pengontrol logika *fuzzy*. Pengujian terakhir dilakukan pada kecepatan angin pada rentang nilai 0-26 m/s tanpa adanya pengontrol. Setelah itu, tiga pengujian dilakukan untuk mengamati parameter keluaran.

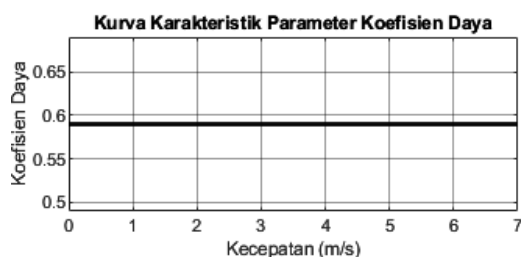
1) *Pengujian Simulasi pada Parameter Kecepatan Angin 0 – 7 m/s dengan Pengontrol Logika Fuzzy*

Pengujian pertama dilakukan dengan memberikan rentang nilai 0 – 7 m/s untuk parameter masukan kecepatan angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Ada beberapa parameter keluaran yang dapat diamati. Parameter-parameter keluaran tersebut akan disajikan dalam bentuk kurva. Parameter pertama adalah parameter sudut *pitch* yang dihasilkan. Hasil parameter sudut *pitch* yang dihasilkan pada pengujian pertama dapat dilihat pada **Gambar 16**.



Gambar 16. Kurva Karakteristik Parameter *Sudut Pitch* dengan Kecepatan Angin 0 – 7 m/s

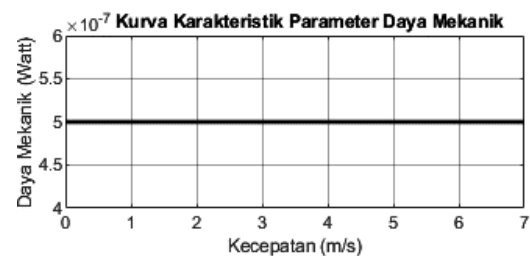
Pada **Gambar 16** terdapat kurva karakteristik parameter sudut *pitch* pada pengujian pertama. Dari kurva karakteristik tersebut dapat diamati bahwa parameter sudut *pitch* yang dihasilkan bernilai konstan pada nilai 0 derajat dengan kecepatan angin dengan interval nilai yaitu 0 – 7 m/s. Parameter selanjutnya adalah parameter koefisien daya. Parameter ini memengaruhi parameter keluaran seperti parameter daya mekanik dan momen inersia generator yang dihasilkan oleh turbin angin. Hasil parameter koefisien daya pada pengujian pertama dapat dilihat pada **Gambar 17**.



Gambar 17. Kurva Karakteristik Parameter Koefisien Daya dengan Kecepatan Angin 0 – 7 m/s

Pada **Gambar 17** menampilkan kurva karakteristik parameter koefisien daya yang dihasilkan pada pengujian pertama. Kurva karakteristik dapat diamati bahwa nilai koefisien daya pada kecepatan angin dengan rentang nilai 0 – 7 m/s berkisar 0,59. Kemudian, dua parameter keluaran yang dihasilkan yaitu daya mekanik dan momen inersia mekanik generator dapat diamati.

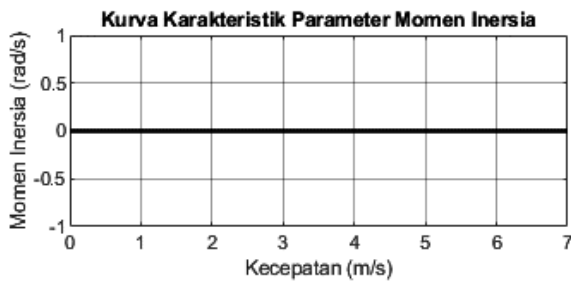
Parameter keluaran pertama adalah parameter daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin. Parameter ini yang menyajikan besarnya daya keluaran yang dihasilkan dari pergerakan turbin angin. Daya keluaran yang dihasilkan memiliki nilai maksimal 20.000 Watt. Daya maksimal ini dapat diperoleh berdasarkan model persamaan matematis yang digunakan. Adapun hasil parameter daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin dapat dilihat pada **Gambar 18**.



Gambar 18. Kurva Karakteristik Parameter Daya Mekanik dengan Kecepatan Angin 0 – 7 m/s

Gambar 18 menyajikan kurva karakteristik parameter daya mekanik pada kecepatan angin 0 – 7 m/s. Nilai parameter daya mekanik yang dihasilkan pada pengujian pertama adalah 0,0000005 Watt. Dari nilai ini dapat dikatakan bahwa besar daya mekanik yang dihasilkan adalah 0 Watt. Dengan kata lain, daya mekanik tidak dapat dihasilkan pada pengujian pertama. Hal ini menandakan bahwa pada parameter masukan kecepatan angin 0 – 7 m/s tidak dapat menghasilkan daya mekanik. Kemudian, parameter daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin berbanding lurus dengan daya pada generator. Oleh karena itu, daya generator dipengaruhi oleh besarnya daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin.

Parameter keluaran selanjutnya merupakan parameter momen inersia pada generator. Parameter ini berperan agar daya pada generator dapat mengalami kestabilan pada daya maksimal yang telah ditentukan. Adapun hasil dari parameter momen inersia generator ini dapat dilihat pada **Gambar 19**.

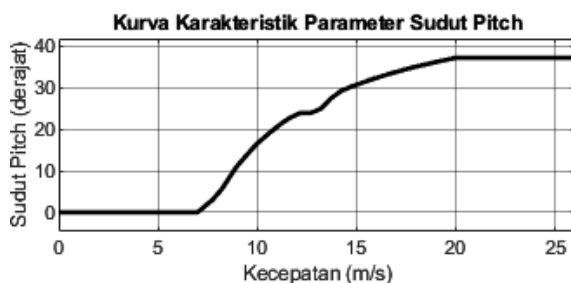


Gambar 19. Kurva Karakteristik Parameter Momen Inersia Generator dengan Kecepatan Angin 0 – 7 m/s

Pada **Gambar 19** berisi kurva karakteristik parameter momen inersia generator yang merupakan hasil dari pengujian pertama. Besar parameter momen inersia generator yang dihasilkan adalah 0 rad/s. Parameter ini berbanding lurus dengan parameter daya mekanik. Apabila semakin meningkat parameter daya mekanik, semakin meningkat pula parameter momen inersia generator, begitupun sebaliknya. Oleh karena itu, parameter keluaran daya mekanik dan parameter momen inersia saling berkaitan.

2) Pengujian Simulasi pada Parameter Kecepatan Angin 0 – 26 m/s dengan Pengontrol Logika Fuzzy

Pengujian kedua dilakukan dengan memberikan interval nilai 0 – 26 m/s untuk parameter masukan kecepatan angin dengan pengontrol logika fuzzy. Ada beberapa parameter keluaran yang dapat diamati dalam proses pengujian. Parameter-parameter keluaran tersebut akan disajikan dalam bentuk kurva karakteristik untuk pengujian simulasi pada parameter kecepatan angin 0 – 26 m/s dengan pengontrol logika fuzzy. Parameter pertama adalah parameter sudut *pitch* yang dihasilkan pada pengujian kedua. Hasil parameter sudut *pitch* yang dihasilkan pada pengujian kedua tersebut dapat dilihat pada **Gambar 20**.

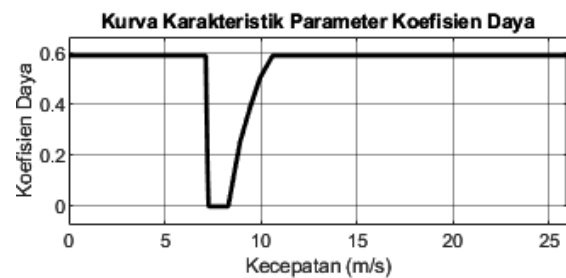


Gambar 20. Kurva Karakteristik Parameter Sudut *Pitch* dengan Kecepatan Angin 0 – 26 m/s

Gambar 20 merupakan kurva karakteristik parameter sudut *pitch* pada pengujian kedua. Dari kurva karakteristik tersebut dapat diamati bahwa

parameter sudut *pitch* yang dihasilkan memiliki nilai yang berkisar antara 0 – 38 derajat dengan kecepatan angin dengan interval nilai yaitu 0 – 26 m/s. Pada saat kecepatan angin bernilai 7 m/s, parameter sudut *pitch* mulai mengalami peningkatan dan akhirnya konstan ketika kecepatan angin berada pada nilai 20 m/s sampai dengan 25 m/s. Kemudian, parameter sudut *pitch* mengalami penurunan pada saat parameter masukan kecepatan angin lebih dari 25 m/s. Nilai parameter sudut *pitch* yang mengalami penurunan akan konstan kembali pada nilai 20 derajat ketika nilai parameter keluaran masukan angin lebih dari 25 m/s.

Parameter berikutnya adalah parameter koefisien daya. Sama halnya pada pengujian pertama, parameter ini memengaruhi parameter keluaran seperti parameter daya mekanik dan momen inersia generator yang dihasilkan oleh turbin angin. Hasil parameter koefisien daya pada pengujian pertama dapat dilihat pada **Gambar 21**.



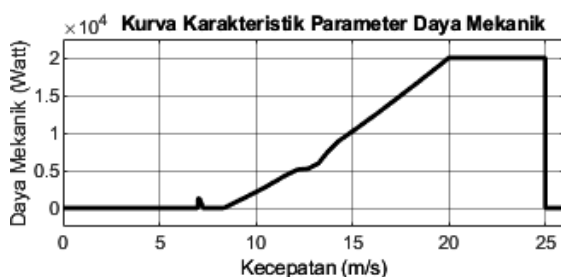
Gambar 21. Kurva Karakteristik Parameter Koefisien Daya dengan Kecepatan Angin 0 – 26 m/s

Pada **Gambar 21** terdapat kurva karakteristik parameter koefisien daya yang dihasilkan pada pengujian kedua. Kurva karakteristik dapat diamati bahwa nilai koefisien daya pada kecepatan angin dengan rentang nilai 0 – 26 m/s berkisar antara nilai 0 – 0,59. Nilai parameter koefisien daya akan semakin menurun apabila nilai parameter kecepatan angin mengalami peningkatan. Begitupun hubungan antara parameter koefisien daya terhadap parameter sudut *pitch* yang berbanding terbalik nilainya.

Selanjutnya adalah parameter keluaran daya mekanik pada pengujian kedua dengan parameter masukan kecepatan angin 0 – 26 m/s. Adapun hasil parameter daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin pada pengujian kedua dapat dilihat pada **Gambar 22**.

Gambar 22 menampilkan kurva karakteristik parameter daya mekanik pada kecepatan angin 0 -26 m/s. Nilai parameter daya mekanik yang dihasilkan pada pengujian kedua berada pada interval nilai 0 – 20.000 Watt. Nilai

parameter daya mekanik mulai meningkat ketika parameter masukan kecepatan angin bernilai 7 m/s. Peningkatan ini terus berlanjut sampai dengan parameter masukan kecepatan angin bernilai 20 m/s. Pada saat parameter masukan kecepatan angin bernilai antara 20 m/s – 25 m/s, parameter daya mekanik yang dihasilkan 20.000 Watt yang mana nilai tersebut secara terus menerus konstan. Namun, ketika parameter masukan kecepatan angin lebih dari 25 m/s, parameter daya mekanik yang dihasilkan turun secara drastis sampai dengan 0 Watt. Nilai ini terus berlanjut secara terus menerus apabila parameter masuk ke kecepatan angin lebih dari 25 m/s.

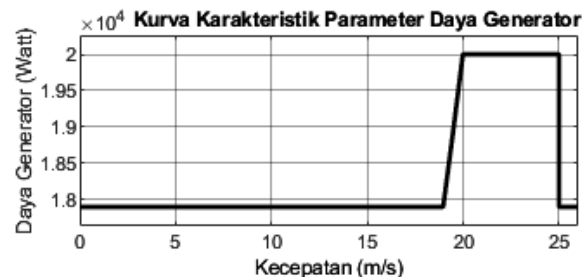


Gambar 22. Kurva Karakteristik Parameter Daya Mekanik dengan Kecepatan Angin 0 – 26 m/s

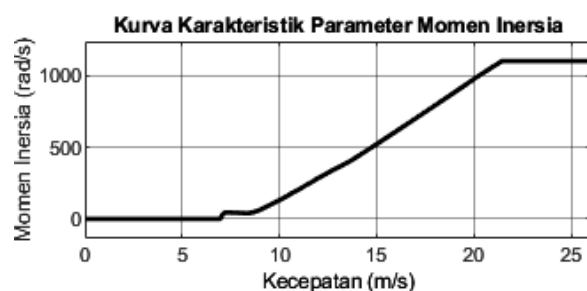
Kemudian, parameter daya generator pada pengujian kedua berbeda dengan pengujian pertama. Pada pengujian kedua apabila nilai parameter masukan kecepatan angin lebih dari 25 m/s, besar daya generator memang mengalami penurunan. Akan tetapi, penurunan yang terjadi tidak dengan perubahan nilai yang besar, melainkan masih berada pada taraf nilai yaitu 18.000 Watt – 20.000 Watt. Pada pengujian pertama parameter daya generator memiliki nilai yang sama dengan parameter keluaran daya mekanik yang dihasilkan. Namun, pada pengujian kedua, apabila parameter masukan kecepatan angin lebih dari 25 m/s, maka parameter keluaran daya mekanik akan turun secara drastis sampai dengan 0 Watt. Tidak dengan parameter daya generator pada pengujian kedua yang masih memiliki nilai antara 18.000 Watt – 20.000 Watt. Untuk kurva karakteristik parameter daya generator dapat dilihat pada **Gambar 23**.

Parameter keluaran berikutnya merupakan parameter momen inersia pada generator pada pengujian kedua dengan parameter masukan kecepatan angin sebesar 0 – 26 m/s. Parameter keluaran ini merepresentasikan besar kecepatan rotor yang ada pada turbin angin. Selain itu, parameter keluaran ini juga memengaruhi besar dari daya pada generator. Dengan stabilnya parameter keluaran momen inersia, parameter

daya generator pun akan stabil pada rentang tertentu sesuai dengan daya maksimal yang dapat dihasilkan. Adapun hasil dari parameter momen inersia generator ini pada pengujian kedua dapat dilihat pada **Gambar 24**.



Gambar 23. Kurva Karakteristik Parameter Daya Generator dengan Kecepatan Angin 0 – 26 m/s



Gambar 24. Kurva Karakteristik Parameter Momen Inersia Generator dengan Kecepatan Angin 0 – 26 m/s

Pada **Gambar 24** menyajikan kurva karakteristik parameter momen inersia generator yang merupakan hasil dari pengujian kedua. Besar parameter momen inersia generator yang dihasilkan adalah antara 0 – 1200 rad/s. Pada nilai parameter masukan kecepatan angin 7 m/s nilai parameter momen inersia generator mengalami peningkatan. Hal ini seperti pada parameter sudut *pitch* dan parameter keluaran daya mekanik yang dihasilkan. Setelah itu, pada nilai parameter masukan kecepatan angin yakni 20 m/s, nilai parameter momen inersia generator konstan secara terus menerus pada nilai 1200 rad/s.

3) Pengujian Simulasi dengan Parameter Kecepatan Angin 0 – 26 m/s Tanpa Pengontrol

Pengujian ketiga dilakukan dengan memberikan rentang nilai 0 – 26 m/s untuk parameter masukan kecepatan angin tanpa pengontrol. Pengujian ini menggunakan parameter sudut *pitch* dengan besar 37,2 derajat. Besar sudut *pitch* ini diperoleh berdasarkan kurva karakteristik parameter daya mekanik dan daya generator pada **Gambar 23** dan **Gambar 24**. Kemudian, hasil pengujian tersebut dapat diamati pada **Gambar 25**.



Gambar 25. Kurva Karakteristik Parameter Daya Mekanik dengan Kecepatan Angin 0 – 26m/s Tanpa Pengontrol

Pada **Gambar 25** menampilkan kurva karakteristik parameter daya mekanik pada kecepatan 0 – 26 m/s tanpa adanya pengontrol. Dengan tidak adanya pengontrol pada pengujian ini menyebabkan parameter keluaran daya mekanik yang dihasilkan melebihi *rated power*. Besar *rated power* yaitu 20.000 Watt. Pada kurva karakteristik tersebut sistem hanya mencapai daya mekanik sekitar 30.000 Watt. Oleh karena itu, untuk pengontrolan sudut *pitch* dibutuhkan pengontrol logika *fuzzy* agar sistem dapat mencapai *rated power* sebesar 20.000 Watt.

C. Analisis Hasil Pengujian Simulasi *Plant* Sudut *Pitch* pada Turbin Angin dengan Pengontrol Logika *Fuzzy*

Dari tiga pengujian yang telah dilakukan, ada beberapa hal yang berhubungan dengan kestabilan sistem *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*. Hal yang pertama adalah parameter daya mekanik yang dihasilkan pada turbin angin akan stabil pada saat parameter masukan kecepatan angin bernilai 20 m/s. Namun, ketika besar parameter kecepatan masukan angin adalah 25 m/s, parameter keluaran daya mekanik yang dihasilkan mengalami penurunan yang tidak dengan perubahan yang relatif besar yaitu berada pada antara nilai 18.000 Watt – 20.000 Watt. Setelah itu, parameter sudut *pitch* dan parameter keluaran daya mekanik memiliki hubungan yang berbanding lurus. Hal yang berikutnya merupakan besar parameter koefisien daya yang memiliki nilai maksimal yaitu 0,59. Hal ini sesuai dengan teorema *betz limit* yang menyatakan bahwa nilai dari koefisien daya memiliki nilai maksimal pada nilai 0,59. Hal terakhir berhubungan dengan besar *rated power* yang dihasilkan oleh sistem tanpa adanya pengontrol. Sistem yang tidak menggunakan pengontrol terutama pengontrol logika *fuzzy* melebihi besar *rated power* yaitu 20.000 Watt. Hal ini dapat menyebabkan kerusakan pada generator. Oleh karena itu, keempat hal ini dapat memengaruhi kestabilan

sistem *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy*.

D. Diskusi

Simulasi pengontrol logika *fuzzy plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan menggunakan Simulink MATLAB dapat dilakukan berdasarkan nilai parameter masukan kecepatan angin yang menghasilkan parameter sudut *pitch*, koefisien daya, keluaran daya mekanik, daya generator, dan momen inersia generator. Simulasi ini dibuat dengan diagram blok berdasarkan model persamaan matematis dan model aturan pada model pengontrol logika *fuzzy* seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Arslan dan Erol [6], Baburajan dan Ismail [7], dan Sahoo dkk. [9]. Namun, penelitian-penelitian ini masih memiliki kekurangan seperti waktu untuk mencapai kestabilan sistem meningkat. Hal ini dapat disebabkan oleh parameter momen inersia generator yang kurang stabil sehingga parameter daya mekanik yang dihasilkan oleh sistem tidak mencapai besar daya maksimal yang telah ditetapkan. Kemudian, penelitian pengontrolan sudut *pitch* dengan pengontrol PID juga dilakukan oleh Tejaswi dan Chandra [5] serta Baburajan dan Ismail [7]. Pengontrolan sudut *pitch* dengan pengontrol PID ini memiliki kekurangan seperti parameter momen inersia generator yang tidak linear sehingga memengaruhi kestabilan dalam menghasilkan parameter keluaran daya mekanik. Dari kedua pengontrol tersebut dalam mengontrol sudut *pitch* pada turbin angin, pengontrol logika *fuzzy* dapat menstabilkan sistem khususnya daya mekanik yang dihasilkan lebih baik dibandingkan dengan pengontrol PID. Selain itu, apabila sistem pengontrol sudut *pitch* pada turbin angin tidak menggunakan pengontrol maka besar daya mekanik yang dihasilkan melebihi besar *rated power* yakni 20.000 Watt. Hal ini dapat dilihat pada **Gambar 25** dengan daya mekanik yang dihasilkan mencapai 30.000 Watt. Dengan besarnya daya mekanik yang melebihi dari 20.000 Watt maka generator menerima daya melebihi kapasitas yang dapat ditampung sehingga tidak stabil pada daya mekanik 20.000 Watt.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, *plant* sudut *pitch* pada turbin angin dengan pengontrol logika *fuzzy* dapat dibuat dan disimulasikan dengan menggunakan Simulink MATLAB. Model pengontrol logika *fuzzy* pada *plant* turbin angin dapat mengontrol sudut *pitch blade* turbin angin

agar daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin stabil. Kestabilan sistem dapat dilihat berdasarkan kurva karakteristik sistem. Parameter yang ada seperti parameter sudut *pitch* dan parameter daya mekanik pada kurva karakteristik sistem dapat diamati. Selain itu, kestabilan sistem dapat dilihat dari beberapa hal. Hal yang pertama adalah parameter daya mekanik yang dihasilkan pada turbin angin akan stabil pada saat parameter masukan kecepatan angin bernilai 20 m/s. Namun, ketika besar parameter kecepatan masukan angin adalah 25 m/s, parameter keluaran daya mekanik yang dihasilkan mengalami penurunan yang tidak dengan perubahan yang relatif besar yaitu berada pada antara nilai 18.000 Watt – 20.000 Watt. Kemudian, besar parameter daya mekanik mulai meningkat pada saat parameter masukan kecepatan angin bernilai 7 m/s. Parameter masukan kecepatan angin yang bernilai 7 m/s disebut dengan *cut in speed*. Di sisi lain, parameter masukan kecepatan angin yang bernilai 20 m/s adalah *rated speed* dan parameter masukan kecepatan angin yang bernilai 25 m/s adalah *cut out speed*.

Hal yang memengaruhi kestabilan sistem tersebut adalah parameter sudut *pitch* dan parameter keluaran daya mekanik yang memiliki hubungan yang berbanding lurus. Hal yang berikutnya merupakan besar parameter koefisien daya yang memiliki nilai maksimal yaitu 0,59. Hal ini sesuai dengan teorema *betz limit* yang menyatakan bahwa nilai dari koefisien daya memiliki nilai maksimal pada nilai 0,59. Dari semua hal tersebut, kestabilan sistem dapat dicapai pada daya mekanik yang dihasilkan dengan nilai maksimal yaitu 20.000 Watt melalui fenomena *transient* terlebih dahulu sebelum mencapai *cut out speed* yaitu 25 m/s yang mana nilai *rated power* pada sistem ini adalah 18.000 – 20.000 Watt. Apabila sistem ini tidak menggunakan pengontrol maka akan terjadi beberapa masalah. Masalah yang pertama adalah daya mekanik yang diperoleh melebihi 20.000 Watt bahkan mencapai 30.000 Watt. Masalah berikutnya merupakan kerusakan yang terjadi pada generator. Kerusakan ini diakibatkan oleh besar daya mekanik melebihi daya tampung maksimal

generator. Semua masalah ini berkaitan dengan tidak tercapainya kestabilan sistem pada saat tanpa menggunakan pengontrol. Oleh karena itu, sistem dengan pengontrol dapat mengalami kestabilan dimulai pada parameter masukan kecepatan angin sebesar 20 m/s ketika parameter keluaran daya mekanik yang dihasilkan berada pada rentang nilai 18.000 – 20.000 Watt.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Chavero-Navarrete, M. Trejo-Perea, J. C. Jáuregui-Correa, R. V. Carrillo-Serrano, G. Ronquillo-Lomeli, dan J. G. Ríos-Moreno, "Pitch Angle Optimization for Small Wind Turbines Based on a Hierarchical Fuzzy-PID Controller and Anticipated Wind Speed Measurement," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, Art. no. 4, Jan 2021, doi: 10.3390/app11041683.
- [2] S. Hamoodi, F. Hameed, dan A. Hamoodi, "Pitch Angle Control of Wind Turbine Using Adaptive Fuzzy-PID Controller," *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, vol. 0, no. 0, hlm. 165500, Jul 2018, doi: 10.4108/eai.13-7-2018.165500.
- [3] D. B. Santoso, A. B. Pangestu, U. Latifa, A. Fauzi, dan L. Zahro, "Pitch Angle Control of A Wind Turbine Using Fuzzy Logic Control," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 830, no. 1, hlm. 012073, Sep 2021, doi: 10.1088/1755-1315/830/1/012073.
- [4] P. Jansuya dan Y. Kumsuwan, "Design of MATLAB/Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle Wind Turbine Simulator," *Energy Procedia*, vol. 34, hlm. 362–370, Jan 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.764.
- [5] Y. B. C. M. E. J. s l Tejaswi, "The Pitch Angle Control of Variable Speed Wind Turbine using PID Controller," *International Journal of Scientific Research and Management*, vol. 3, no. 11, hlm. 3728–3733, Nov 2015.
- [6] A. Arslan dan H. Erol, "Analysis of Wind Turbine Blade Pitch Angle Control with Fuzzy Logic," *Osmaniye Korkut Ata University, Engineering Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department*, vol. 1, hlm. 5, 2022.
- [7] S. Baburajan dan D. A. Ismail, "Modelling and Fuzzy Logic Control of the Pitch of a Wind Turbine," *Dept. of Electrical Engineering, Rochester Institute of Technology*, vol. 04, no. 09.
- [8] Parvathy Vijayan B, Anu Gopinath, dan Mar Baselios College of Engineering and Technology, "Pitch Angle Control of Wind Turbine Using Fuzzy Logic," *IJERT*, vol. V5, no. 08, hlm. IJERTV5IS080270, Agu 2016, doi: 10.17577/IJERTV5IS080270.
- [9] S. Sahoo, B. Subudhi, dan G. Panda, "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbine Using Fuzzy Logic," dalam *2016 International Conference on Information Technology (ICIT)*, Des 2016, hlm. 28–32. doi: 10.1109/ICIT.2016.019.
- [10] A. Munandar dan M. Aria, "Sistem Pengereman Otomatis Menggunakan Logika Fuzzy Berbasis Mikrokontroler," *Teknik Elektro, Universitas Komputer Indonesia*, vol. 4, no. 1, hlm. 17–17, 2016, doi: 10.34010/telekontran.v4i1.1585.
- [11] S. Sitanggang, "Pengembangan Algoritma Pengolahan Citra Untuk Mengontrol Kepadatan Lalu Lintas Pada Persimpangan Dua Arah Berbasis Logika Fuzzy". Universitas Komputer Indonesia, 2014