

# RANCANG BANGUN *PITCH CONTROL* BERBASIS *FUZZY LOGIC* SEBAGAI PENSTABIL DAYA PADA *DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR (DFIG)*

Aliffian Anwar Qaaris Hidayat<sup>1)</sup>, Belly Yan Dewantara<sup>2)</sup>

Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan Universitas Hang Tuah Surabaya, Indonesia Jl. Arif Rahman Hakim, Keputih, Kec. Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60111  
e-mail: aliffian.anwar@gmail.com

## ABSTRAK

Dalam beberapa tahun terakhir, turbin angin sebagai pemanfaatan energi angin untuk sistem pembangkit listrik mengalami perkembangan pesat. Salah satu generator yang digunakan oleh sistem pembangkit ini adalah *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)*. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi sistem kerja pembangkit listrik dengan menggunakan *doubly fed induction generator*. Artinya, ketidakstabilan daya keluaran generator akibat perubahan kecepatan angin yang berubah-ubah. Oleh karena itu diperlukan kendali untuk menstabilkan daya keluaran generator, salah satunya adalah kebutuhan kendali *pitch* pada sistem DFIG. Penelitian ini akan mengembangkan logika *fuzzy* untuk kendali *pitch angle* pada sistem DFIG, dengan harapan *pitch* dapat menyesuaikan sudut yang tepat agar turbin angin pada DFIG dapat bekerja dengan baik untuk mendapatkan daya optimal pada kecepatan angin yang tidak menentu. Dari penelitian ini kendali *fuzzy pitch control* pada DFIG diharapkan mampu menghasilkan keluaran daya optimal dengan lebih pada kecepatan angin tidak menentu, metode *fuzzy* diharapkan mampu menghasilkan daya sebesar 1MW yang mengindikasikan daya tersebut mencapai nilai daya yang optimal pada rentan waktu tertentu.

**Keywords:** *Doubly fed induction generator*, *Pitch control*, *fuzzy logic control*

## 1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, turbin angin sebagai pemanfaatan energi angin untuk sistem pembangkit listrik mengalami perkembangan pesat. Salah satu generator yang digunakan oleh sistem pembangkit ini adalah *Doubly*

*Fed Induction Generator (DFIG)*. *Doubly Fed Induction Generator (DFIG)* terdiri dari sebuah mesin induksi yang bekerja sebagai generator dan digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengonversi energi mekanik yang dihasilkan turbin angin dengan rating

Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi sistem kerja pembangkit listrik dengan menggunakan *doubly fed induction generator*. Artinya, ketidakstabilan daya keluaran generator akibat perubahan kecepatan angin yang berubah-ubah. Oleh karena itu diperlukan kendali untuk menstabilkan daya keluaran generator, salah satunya adalah kebutuhan kendali *pitch* pada sistem DFIG.

Penelitian ini akan mengembangkan logika *fuzzy* untuk kendali *pitch angle* pada sistem DFIG, dengan harapan *pitch* dapat menyesuaikan sudut yang tepat agar turbin angin pada DFIG dapat bekerja dengan baik untuk mendapatkan daya optimal pada kecepatan angin yang tidak menentu. Nilai koefisien daya optimal diperoleh pada sudut *pitch* nol, dari kecepatan angin rendah hingga kecepatan terukur, sudut *pitch* harus dijaga tetap nol untuk mendapatkan nilai koefisien daya optimal. Pada kecepatan angin tinggi yaitu di atas kecepatan tetapan, kontrol sudut *pitch* diperlukan untuk mempertahankan frekuensi konstan pada daya konstan. Pada kecepatan angin sebesar 7m/s dan 15m/s yang dikendalikan dengan menggunakan metode *fuzzy* mampu menghasilkan daya sebesar 1MW yang mengindikasikan

daya tersebut mencapai nilai daya yang optimal pada rentan waktu tertentu. Dari penelitian ini kendali *fuzzy wind turbine* DFIG diharapkan mampu menghasilkan keluaran daya yang optimal.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### A. *Doubly Fed Induction Generator*

DFIG terdiri dari sebuah mesin induksi yang bekerja sebagai generator dan digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan cara mengonversi energi mekanik yang dihasilkan turbin angin dengan rating daya yang besar. Konstruksi DFIG disusun atas sebuah mesin induksi rotor belit yang dioperasikan sebagai generator. Tujuan penggunaan mesin induksi rotor belit adalah karena pada DFIG, bagian rotor dari mesin induksi disambungkan dengan converter, sehingga pengaturan daya dapat dilakukan dari bagian rotor tersebut. DFIG mirip dengan generator listrik AC, tetapi memiliki fitur tambahan yang memungkinkan mereka berjalan dengan kecepatan sedikit di atas atau di bawah kecepatan sinkron alami mereka. Ini berguna untuk turbin angin berkecepatan variabel besar, karena kecepatan angin dapat berubah secara tiba-tiba. Ketika hembusan angin mengenai turbin angin, baling-baling mencoba untuk mempercepat, tetapi generator sinkron terkunci dengan

kecepatan jaringan listrik dan tidak dapat dipercepat. Begitu besar gaya dikembangkan di hub, gearbox, dan generator saat jaringan listrik mendorong ke belakang. Ini menyebabkan keausan dan kerusakan pada mekanisme. Jika turbin dibiarkan melaju dengan cepat saat terkena hembusan angin, tegangannya akan lebih rendah dengan daya dari hembusan angin masih diubah menjadi listrik.

Dalam sistem DFIG, energi listrik dihasilkan dari stator maupun rotor. Daya listrik yang dihasilkan oleh stator dapat dihitung menggunakan persamaan (1)[7].

$$P_s = T_{em} \omega_s \quad (1)$$

Pada saat kecepatan sudah stabil, torka elektromagnetik bernilai sama dengan torka mekanik turbin. Total daya elektrik yang dihasilkan oleh generator bernilai sama dengan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Dengan demikian, daya elektrik yang dihasilkan oleh rotor ( $P_r$ ) dapat dihitung dengan persamaan (2)

$$P_r = P_m - P_s \quad (2)$$

Apabila dihubungkan dengan torka dan kecepatan, daya yang dihasilkan rotor juga dapat dihitung berdasarkan persamaan (3)

$$P_r = -T_m \left( \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \right) \omega_s \quad (3)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2) ke persamaan (3), maka dapat dinyatakan bahwa

$$P_r = -sP_s \quad (4)$$

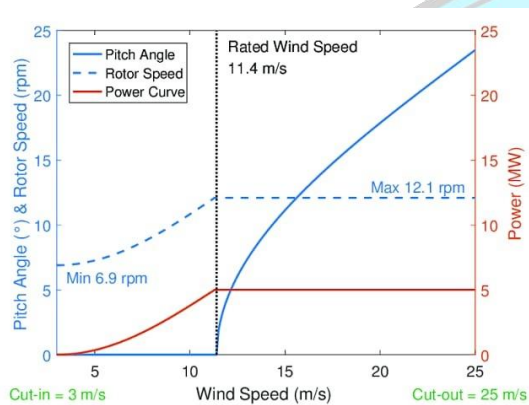
Dimana :

$$s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \quad (5)$$

### B. Pitch Control

Baling-baling pada turbin angin yang memiliki *pitch control* dapat diatur menjauhi atau mendekati arah datangnya angin saat daya keluaran sangat tinggi ataupun sangat rendah, berurutan. Sudut baling-baling rotor dapat diatur secara aktif oleh sistem kontrol untuk mengurangi daya yang tidak dibutuhkan. *Pitch control* bekerja relatif cepat dan dapat digunakan untuk membatasi kecepatan rotor dengan mengatur aliran aerodinamika energi angin. Pada saat kecepatan angin rendah atau sedang, sudut baling-baling diatur agar turbin angin bekerja pada kondisi optimumnya. Sedangkan saat kecepatan angin sedang tinggi, sudut baling-baling akan dinaikkan agar daya aerodinamika berkurang dan kecepatan rotor bertahan pada kecepatan *rating*. Manfaat yang dapat diambil dengan menggunakan kontrol sudut baling-baling ini adalah peningkatan daya tangkapan turbin angin. Dengan demikian, maka kerja turbin angin dapat ditingkatkan dan menghasilkan energi listrik yang lebih besar. Aplikasi kontrol ini memungkinkan energi yang ditangkap turbin menjadi maksimal saat kecepatan angin rendah dengan memanfaatkan efek *tip speed ratio* yang

konstan akibat penambahan kontrol tersebut. Pada saat kecepatan angin rendah, maka *pitch angle* akan diatur pada besaran yang konstan yaitu pada *pitch angle* yang menghasilkan daya terbesar. Sedangkan pada saat kecepatan angin tinggi, maka torsi dan daya akan dibatasi pada bagian yang memiliki besaran konstan. Karakteristik *pitch control* juga dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Karakteristik *pitch control*

### C. Fuzzy Logic

Dalam penelitian ini metode yang digunakan adalah metode Mamdani. Dalam metode terdapat beberapa 4 tahapan untuk dapat memperoleh output, 4 tahapan yaitu:

#### 1. Pembentukan himpunan *fuzzy*

Pada metode Mamdani, variabel input maupun variabel output dibagi menjadi satu atau lebih himpunan *fuzzy*. Setiap anggota himpunan *fuzzy* yang dibentuk, ditentukan derajat keanggotaannya dengan fungsi keanggotaan yang ditentukan.

#### 2. Aplikasi fungsi implikasi

Tiap-tiap aturan (proporsi) pada basis pengetahuan *fuzzy* akan berhubungan dengan suatu relasi *fuzzy*. Secara umum dapat dituliskan IF x is A THEN y is B dengan x dan y adalah skalar, dan A dan B adalah himpunan *fuzzy*. Proporsi yang mengikuti IF disebut sebagai anteseden, sedangkan proporsi yang mengikuti THEN disebut sebagai konsekuen.

#### 3. Inferensi aturan

Metode yang digunakan dalam melakukan inferensi aturan adalah metode Max (*Maximum*).

#### 4. Penegasan (*defuzzifikasi*)

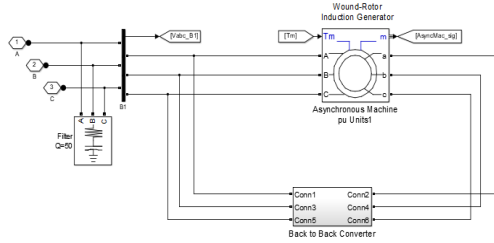
Pada metode Mamdani, metode defuzzifikasi dapat dipilih salah satu dari metode-metode defuzzifikasi, Pada penelitian ini metode yang dipilih adalah metode Centroid. Pada metode Centroid, solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil titik pusat ( $z^*$ ) daerah *fuzzy*.

## 3. METODE PENELITIAN

### A. Sistem *Doubly Fed Induction Generator* (DFIG)

Pada penelitian ini akan menjelaskan sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan sistem DFIG, dimana DFIG adalah Generator induksi

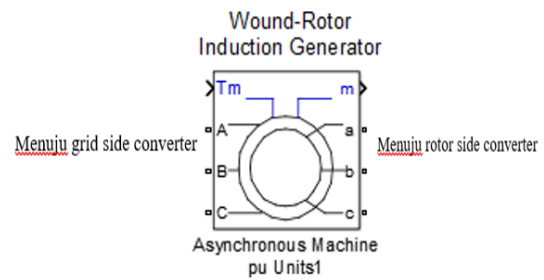
tipe rotor belit. Belitan stator terhubung langsung pada grid sedangkan belitan rotor terhubung pada *back-to-back converter* yang kemudian terhubung pada grid.



Gambar 2. Sistem DFIG

Sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan DFIG seperti ditunjukkan oleh Gambar 2. Pada gambar 1 dapat dijelaskan bahwasanya DFIG terdiri dari turbin angin, *gear box* (GB), generator induksi wound rotor dan converter yang merupakan *back to back converter*. *Gear box* sebagai pengkonversi kecepatan turbin menjadi kecepatan rotor generator, sedangkan generator induksi wound rotor dimana grid terhubung langsung dengan belitan stator dan back to back converter yang terhubung dengan belitan rotor generator. *Back to back converter* pada sistem DFIG sendiri terdiri dari *grid side converter* dan *rotor side converter*, dimana *grid side converter* terhubung dengan grid dan *rotor side converter* yang terhubung dengan rotor.

## B. Spesifikasi DFIG

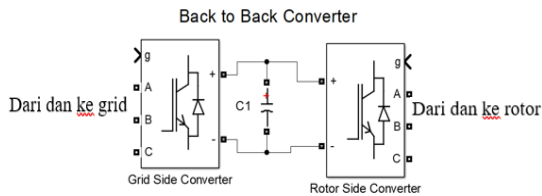


Gambar 3. Model DFIG

Gambar 3 merupakan model *Doubly Fed Induction Generator*. Variabel *state* yang digunakan pada model *Doubly Fed Induction Generator* ini yaitu arus stator dan arus rotor saling berhubungan dengan referensi sumbu dq, dimana daya mekanis yang keluar dari turbin akan dirubah menjadi daya elektromagnetis. Tujuan menggunakan generator ini adalah bagian rotor dari mesin induksi disambungkan dengan *back to back konverter* sehingga pengaturan daya dapat dilakukan dari bagian rotor tersebut. Dikarenakan pada bagian *slip ring* tersebut dihubungkan dengan konverter yang selanjutnya terhubung dengan grid. Sedangkan pada Bagian stator tersambung langsung dengan grid.

## C. Back to back converter

Pada sistem DFIG terdapat *back to back converter*, *back to back converter* ini terdiri dari dua bagian *rotor side converter* dan *grid side converter* dan dipisahkan oleh kapasitor DC ditunjukkan pada gambar 4



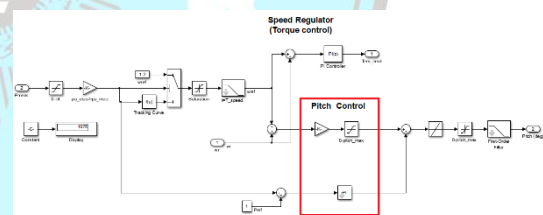
Gambar 4. *Back to back converter*

Pada model simulasi *back to back converter* ini diketahui pada bagian *rotor side converter* yang terhubung langsung dengan belitan rotor pada generator, ini berfungsi untuk mengatur putaran kecepatan rotor agar turbin angin menghasilkan daya yang maksimal. Sedangkan pada bagian *grid side converter* yang terhubung langsung dengan *grid* ini berfungsi untuk menjaga agar tegangan pada kapasitor DC bernilai konstan. Dimana *back to back converter* yang dipisahkan oleh kapasitor DC ini berfungsi sebagai media penyimpanan energi sekaligus sebagai sumber tegangan.

#### D. Pitch Control

*Control pitch* sangat diperlukan agar daya yang dihasilkan tetap stabil meskipun kondisi angin berubah ubah. Model aerodinamis dari turbin angin telah menunjukkan bahwa efisiensi aerodinamis sangat dipengaruhi oleh variasi dari *pitch* kincir angin turbin dengan memperhatikan arah dari angin atau terhadap bidang dari rotasi. Perubahan kecil pada sudut *pitch* bisa menimbulkan efek yang signifikan pada keluaran daya. Pada kecepatan angin

rendah sampai menengah, turbin seharusnya akan mencoba untuk memproduksi daya sebanyak mungkin, dengan demikian secara umum tidak perlu untuk merubah sudut *pitch*. Sudut *pitch* hanya harus berada pada nilai optimumnya untuk memproduksi daya maksimum. Pada kecepatan angin yang tinggi, kontrol *pitch* memberikan sebuah cara yang sangat efektif dalam pengaturan daya aerodinamis dan beban yang dihasilkan rotor sehingga batasan-batasan desain tidak dilewati. Pada penelitian ini menggunakan *fuzzy logic* sebagai kontrol *pitch* pada sistem DFIG. Untuk penjelasan lebih detail dari *pitch control* yang akan dikembangkan dapat ditunjukkan pada gambar 5.

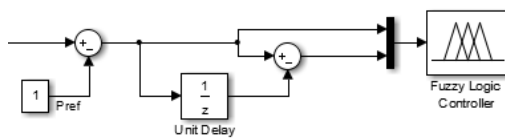


Gambar 5. Simulasi *pitch control*

Pada gambar 5 Pengontrolan *pitch angle* diatur oleh *fuzzy logic controller* yang terhubung pada turbin angin. Kontrol *Pitch Angle* menggunakan *fuzzy logic* bekerja dengan menerima masukan kecepatan angin diubah menjadi nilai daya mekanis. Sedangkan pada pengaturan *fuzzy logic* besaran sudut pada turbin angin dilakukan untuk menjaga kinerja turbin tetap pada daya yang di inginkan

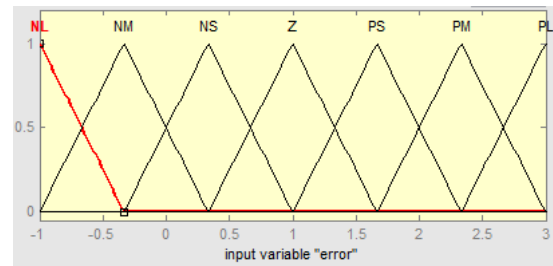
agar turbin tidak mengalami kecepatan berlebih yang mengakibatkan daya yang dibangkitkan juga berlebih. Dengan demikian penelitian ini diharapkan sistem pembangkit tenaga angin akan mendapatkan energi angin dengan maksimum.

**E. Fuzzy Logic Control**



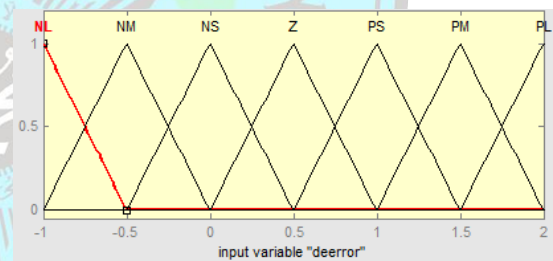
Gambar 6. Simulasi *fuzzy logic*

Pada gambar 6 sistem *fuzzy logic control* menggunakan 2 input yang berupa error dan delta error dan mempunyai satu output. *Fuzzy logic control* sendiri digunakan untuk menjaga kinerja turbin tetap pada daya yang di inginkan agar pada saat kecepatan angin tinggi turbin tidak mengalami kecepatan berlebih yang mengakibatkan daya yang dibangkitkan juga berlebih, dan pada saat kecepatan angin turun atau rendah kecepatan turbin tetap stabil sehingga daya yang dibangkitkan juga tidak terlalu rendah. Dengan demikian penelitian ini diharapkan sistem pembangkit tenaga angin akan mendapatkan energi angin dengan maksimum. Dalam kendali *fuzzy* pada simulasi ini input error, delta error dan output dapat ditunjukkan pada gambar 7, 8 dan 9



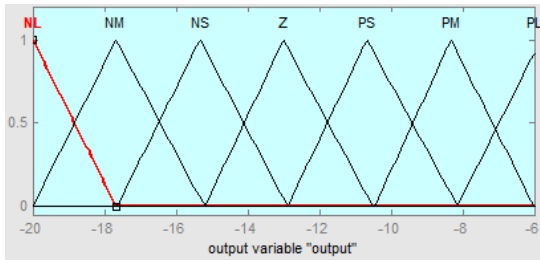
Gambar 7. *Input error fuzzy logic*

Pada gambar 7, merupakan *membership fuction* dari *input error fuzzy logic control*. *Input error fuzzy logic* menggunakan range [-1 1.5] untuk percobaan pada kecepatan angin 7m/s, 12m/s, 15m/s dan range tersebut dapat ditentukan berdasarkan hasil terendah dan tertinggi dari nilai error pada saat simulasi *pitch control* menggunakan kendali PI.



Gambar 8. *input delta error fuzzy logic*

Sedangkan pada gambar 8 menunjukkan *membersip fuction* dari *input delta error*. *Input delta error* menggunakan range [-1 0.5], range tersebut juga ditentukan berdasarkan nilai terendah dan tertinggi dari *delta error* pada saat simulasi *pitch control* kendali PI dilakukan.



Gambar 9. output fuzzy logic

Pada gambar 9 merupakan *output membership function fuzzy logic control* dengan menggunakan range [-23 -0.0001] untuk 7m/s, 12m/s, 15m/s range tersebut dapat ditentukan berdasarkan nilai terendah dan tertinggi dari output daya kendali PI pada saat simulasi pitch control.

Masing-masing input dan output mempunyai 7 *membership function* dengan 49 rulebase. *Membership function* ditulis *negative large* (NL), *negative medium* (NM), *negative small* (NS), *zero* (Z), *positive small* (PS), dan *positive medium* (PM), *positive large* (PL). Hal tersebut dapat ditunjukkan pada gambar 10.

| $\begin{matrix} e \\ ce \end{matrix}$ | NL | NM | NS | Z  | PS | PM | PL |
|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NL                                    | NL | NL | NL | NL | NM | NS | Z  |
| NM                                    | NL | NL | NL | NM | NS | Z  | PS |
| NS                                    | NL | NL | NM | NS | Z  | PS | PM |
| Z                                     | NL | NM | NS | Z  | PS | PM | PL |
| PS                                    | NM | NS | Z  | PS | PM | PL | PL |
| PM                                    | NS | Z  | PS | PM | PL | PL | PL |
| PL                                    | Z  | PS | PM | PL | PL | PL | PL |

Gambar 10. Rulebase fuzzy logic control

Rule base pada *fuzzy logic* pada umumnya menggunakan pernyataan if -

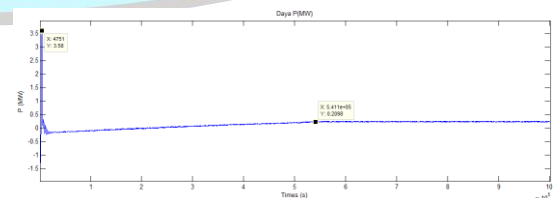
then, hal tersebut dapat dilihat pada gambar 10 yang apabila ditulis *if (e is NL) and (ce is NL) then (output is NL)* dan seterusnya.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

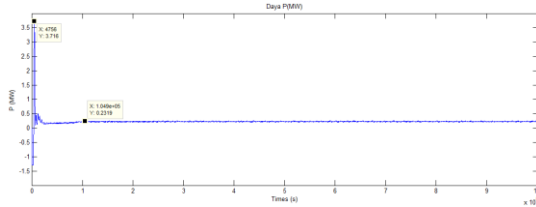
Pada bab ini akan menunjukkan hasil simulasi *pitch control* pada *doubly fed induction generator* (DFIG) dengan menggunakan kendali PI dan *fuzzy logic*. Pada penelitian ini, akan ditunjukkan hasil perbandingan daya DFIG pada *pitch control* menggunakan kendali PI dan kendali *fuzzy logic control* pada kecepatan angin konstan dan bertingkat.

##### A. Hasil simulasi dengan kecepatan angin konstan 7m/s.

Simulasi berdasarkan kecepatan angin pada DFIG menggunakan kendali PI bertujuan untuk mengontrol daya dan kecepatan rotor pada bagian *pitch control*. Pada penjelasan ini akan menganalisis daya pada DFIG dengan menggunakan kecepatan angin konstan yang berbeda.



Gambar 11. Daya PI 7m/s

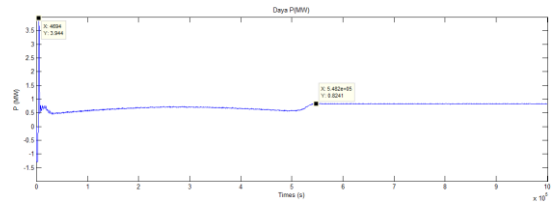


Gambar 12. Daya fuzzy 7m/s

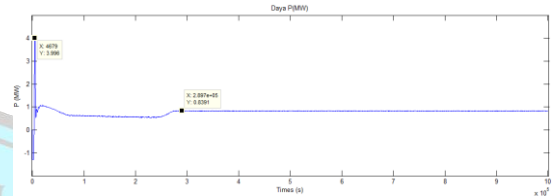
Tabel 1. Hasil simulasi dengan kecepatan angin konstan 7m/s.

| No | Parameter                              | Kecepatan angin 7 m/s |           |
|----|----------------------------------------|-----------------------|-----------|
|    |                                        | PI                    | Fuzzy     |
| 1  | Sudut pitch (derajat)                  | 26°                   | 4.8°      |
| 2  | Waktu steady state sudut pitch (s)     | 5.4s                  | 1s        |
| 3  | Daya (MW)                              | 0.2 MW                | 0.23MW    |
| 4  | Kecepatan rotor (pu)                   | 0.61 pu               | 0.61 pu   |
| 5  | Waktu steady state kecepatan rotor (s) | 5.4s                  | 2.6s      |
| 6  | Daya reaktif (Mvar)                    | -0.3 Mvar             | -0.3 Mvar |
| 7  | Vdc (V)                                | 1160 Volt             | 1159 Volt |
| 8  | Vabc (pu)                              | 1 pu                  | 1 pu      |
| 9  | Iabc (pu)                              | 0.5 pu                | 0.49 pu   |
| 10 | Tm (pu)                                | -0.27 pu              | -0.27     |

**B. Hasil simulasi dengan kecepatan angin konstan 15m/s.**



Gambar 13. Daya PI 15m/s



Gambar 14 Daya fuzzy 15m/s

Tabel 2. Hasil simulasi dengan kecepatan angin konstan 15m/s.

| No | Parameter                              | Kecepatan angin 15 m/s |           |
|----|----------------------------------------|------------------------|-----------|
|    |                                        | PI                     | Fuzzy     |
| 1  | Sudut pitch (derajat)                  | 26°                    | 13.24°    |
| 2  | Waktu steady state sudut pitch (s)     | 5.4s                   | 2s        |
| 3  | daya (w)                               | 0.82MW                 | 0.84MW    |
| 4  | Kecepatan rotor (pu)                   | 0.6 pu                 | 0.6 pu    |
| 5  | Waktu steady state kecepatan rotor (s) | 5.4s                   | 2.7s      |
| 6  | Daya reaktif (Mvar)                    | -0.36Mvar              | -0.35Mvar |
| 7  | Vdc (V)                                | 1163 Volt              | 1163Volt  |
| 8  | Vabc (pu)                              | 1 pu                   | 1 pu      |
| 9  | Iabc (pu)                              | 0.69 pu                | 0.72pu    |
| 10 | Tm (pu)                                | -0.9 pu                | -0.87 pu  |

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan perbandingan dari simulasi *pitch control* pada *wind turbine Doubly Fed Induction Generator* (DFIG) antara *PI control* dan *fuzzy logic control* sebagai penstabil daya, sehingga dapat menarik beberapa kesimpulan dari hasil simulasi antara lain sebagai berikut:

1. Pada kecepatan angin konstan 7m/s, *output* daya kendali *fuzzy* sebesar 0.23MW, hasil tersebut menunjukkan bahwasanya kendali *fuzzy* lebih optimal dibandingkan dengan kendali PI yang hanya mampu menghasilkan daya sebesar 0.2MW.
2. Pada saat kecepatan angin konstan pada 15m/s, kendali *fuzzy* juga lebih unggul jika dibandingkan dengan kendali PI, saat kecepatan angin konstan pada 15m/s kendali *fuzzy* mampu menghasilkan daya sebesar 0.84MW, sedangkan kendali hanya mampu menghasilkan daya sebesar 0.82MW.
3. Dalam kendali daya pada *pitch control* DFIG, *fuzzy logic control* lebih unggul dibandingkan dengan kendali PI hal itu dapat dilihat dari hasil perbandingan daya pada kedua kendali. Pada kecepatan angin 7m/s dan 15m/s daya yang dikeluarkan kendali *fuzzy logic* lebih unggul

dibandingkan dengan daya keluaran kendali PI.

## DAFTAR PUSTAKA

- Djalal, M. R., Imran, A., & Setiadi, H. (2017). Desain Sistem Kontrol Pitch Angle Wind Turbine Horizontal Axis Menggunakan Firefly Algorithm. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(1), 1–6. <https://doi.org/10.15294/jte.v9i1.9710>
- Elnaghi, B. E., Dessouki, M. E. S., & Elkader, F. A. (2017). Experimental investigation of pitch angle controller for DFIG based wind energy conversion system. *2017 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 - Proceedings, 2018-Febru(December)*, 1477–1482. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2017.8301378>
- Fdaili, M., Essadki, A., Nadour, M., & Nasser, T. (2018). Comparative Study of MPPT and Pitch Angle Control Strategies for a Wind Energy Conversion System. *Proceedings of 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2017*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477291>

Muneer, A., & Kadri, M. B. (2013). Pitch angle control of DFIG using self tuning neuro fuzzy controller. *Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013, October, 316–320.*  
<https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749772>

Rashid, A., & Ying, D. (2020). Fuzzy Inference Based Approach for Pitch Angle Control of Variable Speed Variable Pitch Wind Turbine. *2020 Asia Energy and Electrical Engineering Symposium, AEEES 2020, 1051–1056.*  
<https://doi.org/10.1109/AEEES48850.2020.9121505>

Wardana, I. N. K. (2013). *Desain Kendali Cerdas pada Turbin Angin.* November, 14–15.

Harumwidiah, A., & Kurniawan, A. (2016). Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Doubly Fed Induction Generator (DFIG) dengan Back-To-Back Converter. *Jurnal Nasional Teknik Elektro, 5(2), 252.*  
<https://doi.org/10.25077/jnte.v5n2.269.2016>