

Simulasi Pengujian Kinerja Kendali Pitch Turbin Angin Berbasis Matlab Simulink

Nuryanti^{1*}, Abyanuddin Salam¹, Adrian Julianto¹

¹Politeknik Manufaktur Bandung

*nuryanti@polman-bandung.ac.id

Abstrak

Angin adalah salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi cukup besar untuk dimanfaatkan. Dalam pengoperasiannya turbin angin memiliki range kecepatan angin kerja yaitu cut-in dan cut-off. Kecepatan angin melebihi cut-off dapat membahayakan komponen penyusun turbin angin akibat lonjakan energi yang dihasilkan. Maka dari itu, diperlukan mekanisme pengaturan kecepatan turbin dengan kendali pitch angle. Untuk meminimalisir faktor kegagalan dalam penelitian, digunakanlah simulasi ujicoba untuk mendapatkan hasil yang terbaik sebelum direalisasikan. Perancangan sistem kendali pitch angle agar turbin dapat melakukan pengereman saat kecepatan angin melebihi batas cut-off turbin. Simulasi kendali pitch turbin angin berbasis matlab Simulink dimana pergerakan mekanis nya dapat dianimasikan sehingga dapat ditinjau secara visual. Dengan menggunakan bilah tipe NACA 0015 dan panjangnya 40 cm disimulasikan pergerakan putaran beserta system kendalinya dengan menggunakan system fisik pneumatic dan system fisik elektrik. Hasil penelitian berupa rancangan konstruksi mekanik turbin angin yang disematkan mekanisme pengubah pitch angle menggunakan dua jenis aktuator yaitu silinder pneumatik dan motor stepper. Turbin angin harus dapat melakukan pengereman ketika kecepatan angin diatas 20 m/s serta kecepatan rotasi tidak diperbolehkan melebihi 40 RPM. Dengan mengubah-ubah variable kecepatan angin dapat diketahui respon pengereman jika kecepatan di atas 20m/s. Pengujian lainnya yaitu jika menggunakan salah satu kecepatan angin yang dibuat konstan arah dan kecepatannya, dengan mengubah-ubah sudut serang dari sudut -90° sampai +90° akan diperoleh kecepatan putar maksimal saat sudut bilah 18°. Dari simulasi ini didapatkan pula hasil respon pengereman dimana actuator pneumatic memiliki waktu respon 1.7 detik sedangkan actuator elektrik 2 detik, dengan demikian respon aktuator pneumatik lebih baik daripada aktuator elektrik. Dari simulasi diambil kesimpulan hasil yang lebih baik untuk mengimplementasikan ke benda fisik dengan bilah tipe NACA 0015, panjang 40 cm, maka kemiringan putar bilah 18° dan untuk system control menggunakan pneumatik.

Kata kunci: turbin angin, kontrol *pitch*, sistem kendali pneumatik, sistem kendali elektrik, kecepatan *cut-off*

Abstract

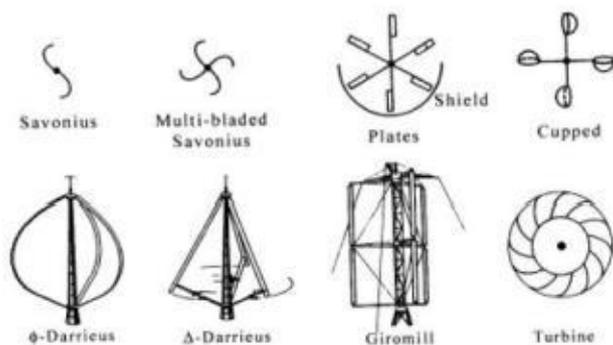
Wind is a renewable energy source that has considerable potential to be utilized. In operation, the wind turbine has a working wind speed range, namely cut-in and cut-off. Wind speeds exceeding the cut-off can harm the components of the wind turbine due to the surge in energy produced. Therefore, a turbine speed control mechanism with pitch angle control is needed. To minimize the failure factor in research, simulation is used for testing and get the best results before they are realized. By using blade type NACA 0015 with 40 cm lengt the movement of the blade could be animated and visualialized during controlled by pneumatic or electric system. By the simullation The system design is pitch angle control with the aim that the turbine can brake when the wind speed exceeds the turbine cut-off limit. The result of this research is a wind turbine mechanical construction design embedded with a variable pitch angle mechanism using a pneumatic cylinder and stepper motor. The wind turbine must be able to brake when the wind speed is above 20 m/s and the rotation speed must not exceed 40 RPM. The other experiment is by varying angle of attack from -90° sampai +90° and give maximum rotation speed result at 18° angle of blade . This test simulation produces time braking for pneumatic and electric 1.7seconds and 2 seconds respectively. In small scale turbines, pneumatic actuators produce a better response than electric actuators. From the simulation gived result that for physical implementation which using blade type NACA 0015 with 40 cm length the twist angle of blade at 18° and control system should pneumatic.

Keywords: wind turbine, pitch control pneumatic control system, electric control system, cut-off speed

PENDAHULUAN

Persediaan sumber energi fosil dimana dari hari ke hari semakin menipis dapat mengakibatkan krisis energi di masa mendatang. Oleh karena itu hadirnya energi baru dan terbarukan menjadi hal yang penting untuk dikembangkan. Indonesia merupakan salah satu negara kepulauan yang memiliki potensi energi angin cukup besar hingga 9,29 GW menurut Blueprint Pengelolaan Sumber Energi Nasional 2005-2025 dengan kecepatan angin lebih dari 5 m/s [1], [2]. Oleh karena itu, inovasi turbin angin sebagai sistem konversi energi angin (SKEA) perlu mendapat perhatian khusus[3]. Usaha untuk menangkap angin semaksimal mungkin, pada sebuah turbin angin dapat ditambahkan sistem kendali yaw, sistem kendali pitch, maupun kombinasi dari keduanya[4]. Dalam hal pengoperasian turbin angin terdapat kecepatan angin kerja minimal (cut-in) hingga kecepatan angin kerja maksimal (cut-off) yang berada pada kisaran 3 m/s sampai 20 m/s[2], [5]. Kecepatan angin melebihi cut-off dapat membahayakan komponen penyusun turbin angin akibat lonjakan energi yang dihasilkan dan juga faktor kekuatan penahan akibat lonjakan momen inersia serta torsi yang sangat tinggi[6]. Maka dari itu, pada sebuah turbin angin diperlukan mekanisme pengereman dengan mengendalikan sudut pitch pada turbin[3], [7]. Namun eksperimen yang melibatkan pembuatan alat secara langsung membutuhkan biaya yang tidak sedikit, oleh karena itu diperlukan simulasi yang dapat mengubah-ubah variabel mekanis untuk mendapatkan hasil yang terbaik sebelum direalisasikan. Selain itu, pada umumnya pengujian kinerja turbin yang diujicobakan pada range kecepatan angin dari cut-in hingga cut-off memerlukan terowongan angin dengan sistem pengaturan kecepatan angin maupun rekayasa permukaan terowongan angin agar aliran fluida udara tetap laminar[8], [9]. Pada kondisi lab yang belum memiliki fasilitas turbin angin maka kendala pengadaan terowongan angin dapat diatasi dengan pengaplikasian simulasi didalam komputer. Pemodelan turbin angin beserta sumber angin ini akan dikembangkan menggunakan software MATLAB Simulink R2020a agar lebih mudah dalam membuat simulasi fisik. Rancangan aktuator yang digunakan pada kendali pitch menggunakan sistem pneumatik dan elektrik. Hal ini dipilih karena aktuator tersebut memiliki beberapa keuntungan terutama pada skala kecil jika dibandingkan aktuator hidrolis seperti kemudahan dalam pemeliharaan, keamanan, teknik pemrograman yang mudah, kebersihan, dan usia kerja yang relatif panjang. Namun sistem pneumatik memiliki karakteristik yang tidak linear[7]. Pada penelitian ini juga akan diperbandingkan antara sistem penggerak menggunakan pneumatik maupun menggunakan motor stepper dalam membuat perubahan pitch angle pada blade karena masing-masing sistem penggerak akan memiliki keuntungan serta kerugiannya. Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan parameter desain sudut bilah yang paling optimal pada kecepatan dan arah angin yang konstan, menentukan desain mekanis yang tepat untuk masing-masing aktuator pneumatik dan elektrik serta kinerja masing-masing sistem kontrol sehingga dapat diketahui mana yang lebih baik secara teknis. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan energi baru terbarukan yang bersih dan dapat menjadi solusi krisis energi fosil.

Turbin angin adalah alat konversi energi tertua di dunia. Turbin angin adalah suatu jenis mesin yang mengkonversi energi angin menjadi energi mekanik berupa putaran. Putaran turbin ini akan diteruskan pada generator induksi sehingga dapat menghasilkan energi listrik[10]. Turbin angin modern diklasifikasikan kedalam dua jenis berdasarkan prinsip gerak rotornya yaitu turbin angin sumbu vertikal (Gambar 1) dan turbin angin sumbu horisontal (Gambar 2). Pada penelitian ini, turbin angin yang dibahas berjenis sumbu horisontal.



Gambar 1. Turbin Angin Sumbu Vertikal[11]

Udara yang bergerak melewati baling-baling mendorong sudu dengan arah yang tegak lurus dari vektor gaya angin sehingga baling – baling akan mendapatkan gaya putar. Kecepatan rotor dari turbin angin tipe ini dapat dikendalikan dengan melakukan pengaturan sudut antara chord line dengan sumbu longitudinal yang biasa disebut dengan pitch sudu. Kendali pitch seperti ini merupakan cara yang efektif untuk mengatasi overspeed ketika kecepatan angin cukup tinggi[12].



Gambar 2. Turbin Angin Sumbu Horisontal [12]

Adapun persamaan Berikut ini adalah persamaan – persamaan yang digunakan dalam perhitungan analisis kinerja turbin angin. Pada persamaan (1) hingga (4) meliputi persamaan konversi energi dimana E_k adalah energi kinetik dari angin [7]

$$E_k = \left(\frac{1}{2}\right)mv^2 \text{ [Nm]} \quad (1)$$

Dimana m adalah massa dari udara dan v (velocity) adalah kecepatan angin. Sedangkan laju aliran massa dapat ditulis sebagai berikut:

$$m = \rho . A . v . t \text{ [kg]} \quad (2)$$

Dengan ρ adalah massa jenis udara (1,225 Kg/m³), A adalah luas penampang yang dilalui angin selama waktu tertentu t dan v adalah kecepatan angin. Dengan memasukan persamaan (1) ke (2) dapat ditulis sebagai berikut:

$$E_k = \left(\frac{1}{2}\right)\rho A t v^3 \text{ [Nm]} \quad (3)$$

Atau dengan membagi dengan satuan waktu diperoleh daya (P) :

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)\rho . A . v^3 \text{ [W]} \quad (4)$$

Adapun parameter penting lainnya pada turbin angin tipe horisontal adalah tip speed ratio (λ) adalah nilai perbandingan kecepatan terluar pada ujung sudu terhadap kecepatan angin.

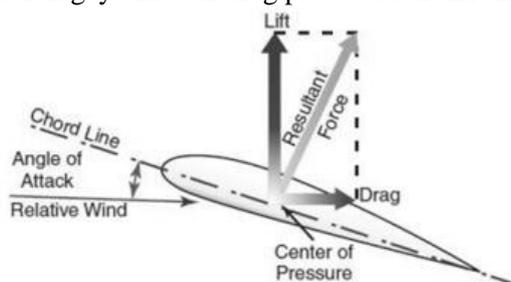
$$\lambda = \frac{2\pi \times r \times n}{60 \times v} \quad (5)$$

Desain blade memiliki peranan penting pada kinerja turbin angin. Ini dikarenakan bentuk profil blade mempengaruhi gaya yang dihasilkan. Hal ini akan mempengaruhi putaran yang dihasilkan oleh turbin. Adapun gaya yang menyebabkan bilah berputar adalah gaya lift (F_L) dan gaya drag (F_D), dengan persamaan dibawah ini[13].

$$F_L = \frac{1}{2}\rho AV^2 C_L \quad (6)$$

$$F_D = \frac{1}{2}\rho AV^2 C_D \quad (7)$$

Gambar 3 dibawah ini adalah gambaran gaya lift dan drag pada sebuah airfoil blade.



Gambar 3. Gambaran gaya lift dan drag

Turbin dapat berputar dikarenakan adanya torsi yang dihasilkan dari setiap sudu. Torsi adalah hasil kali dari gaya resultan (Fres) yang tegak lurus dengan sumbu putar rotor dengan panjang lengan gaya (r).

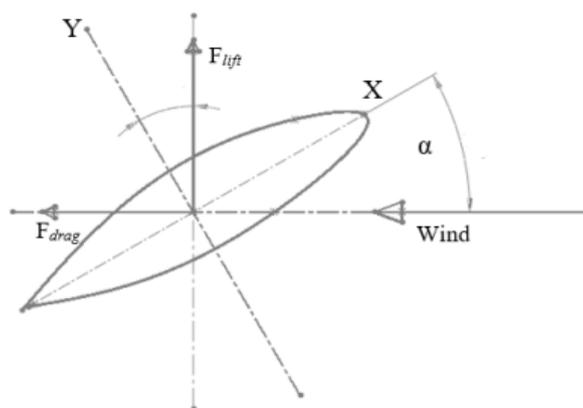
$$T = F_{res} \times r \quad (8)$$

Untuk mendapatkan gaya resultan pada profil sudu, gaya lift dan gaya drag perlu diproyeksikan pada sumbu x dan sumbu y. Maka untuk mendapatkan besaran gaya F_x dan F_y dapat dicari dengan persamaan berikut ini.

$$F_x = F_{lift} \sin \alpha - F_{drag} \cos \alpha \quad (9)$$

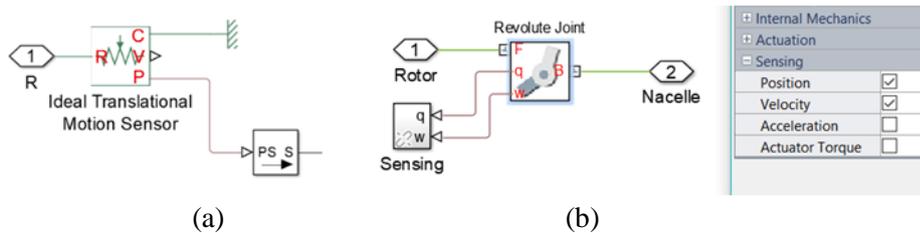
$$F_y = F_{lift} \cos \alpha + F_{drag} \sin \alpha \quad (10)$$

Berikut ini adalah gambaran proyeksi gaya lift dan drag pada sumbu x dan y.



Gambar 4. Proyeksi gaya lift dan drag

Pada penelitian ini, digunakan software MATLAB Simulink untuk membuat simulasi sistem yang telah dijabarkan diatas. Pada proses penyusunannya, diperlukan pemahaman sistem secara real serta komponen – komponen yang tersedia pada Simulink. Seluruh komponen digantikan dengan komponen-komponen Simulink yang sesuai dengan fungsinya. Ketersediaan komponen Simulink sudah sangat mendukung untuk berbagai macam model sistem fisis, sehingga pada tahap perancangan tidak diperlukan pembuat program baru untuk memodelkan sebuah komponen. Agar dapat terlihat secara jelas hasil perancangan mekanik serta kontrol sudut pitch pada turbin angin ini, dibuatlah simulasi secara fisis. Sistem ini terdiri dari 4 subsistem utama yaitu bagian sensing, kontrol, sistem aktuator baik pneumatik maupun elektrik, dan terakhir adalah plant turbin. Untuk sensor misal diambil antara lain sensor posisi translasi, sensor putaran



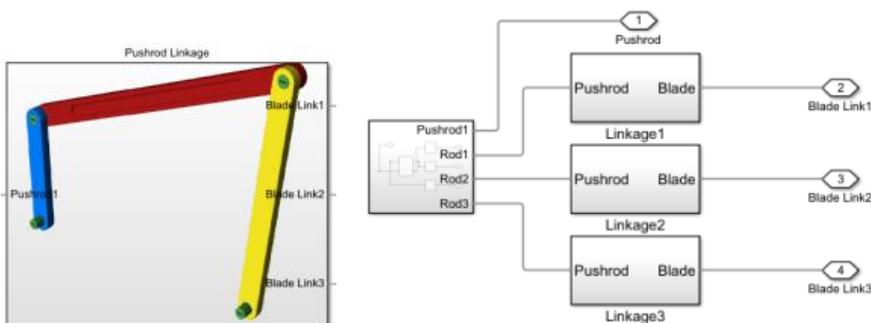
Gambar 5. Komponen yang memodelkan sensor pada Simulink ; a) sensor posisi translasi, b) sensor putaran,

Sedangkan untuk besaran fisis seperti kecepatan angin dapat juga dimodelkan pada blok system dan signal builder seperti ditunjukkan pada Gambar 6

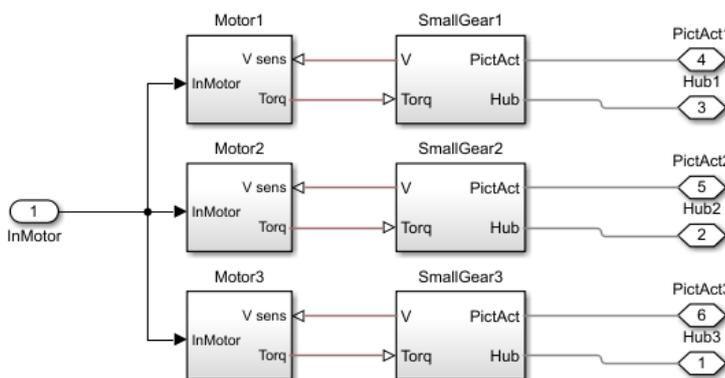


Gambar 6. Subsistem angin beserta komponen penyusun didalamnya; a) Blok subsistem, b) Signal builder besaran angin,

Sedangkan untuk system mekanik control pneumatik dimana ada tuas yang menghubungkan ketiga bilah (*linkage pushrod*) maka dirangkai 3 buah *linkage pushrod* untuk masing-masing bilah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7. Sedangkan untuk system elektrik yang menggunakan motor stepper, maka blok simulasinya dengan menggunakan blok motor dan system gir (Gambar



Gambar 7. Subsistem linkage pushrod pneumatik beserta komponen penyusunnya



Gambar 8. Subsistem motor stepper dan mekanisme gear beserta komponen penyusunnya

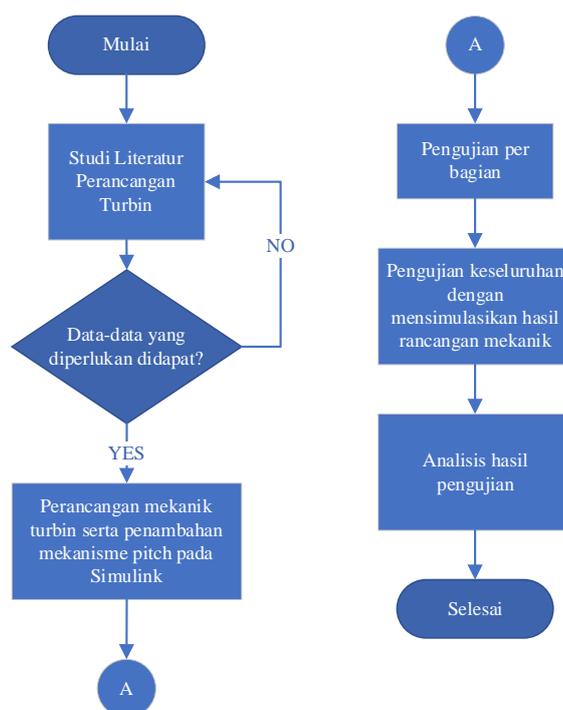
Dengan simulasi ini maka tujuannya akan mendapatkan desain terbaik yang siap untuk direalisasikan ke benda nyata. Dalam hal ini seberapa besar sudut putar bilah yang akan diterapkan dan pilihan system control pitch yang terbaik dari pneumatic dan elektrik, karena pilihan control ini memberikan konsekuensi pembuatan system transmisi mekanik yang berbeda. Sehingga memiliki manfaat pada perbaikan kinerja turbin angin secara keseluruhan.

METODE PENELITIAN

Dalam melakukan perancangan sistem tentu perlu melewati tahapan – tahapan yang jelas. Setelah tema penelitian ditentukan, tahapan pertama yang dilakukan adalah melakukan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan berbagai data yang diperlukan, baik untuk mendukung latar belakang penelitian, landasan teori, ataupun metode yang akan digunakan untuk menyelesaikan permasalahan. Tahapan berikutnya adalah perancangan mekanik turbin. Untuk menyelesaikan penelitian ini dipilihlah software MATLAB Simulink untuk membangun simulasi turbin. Tahap ketiga adalah pengujian hasil perancangan yang dilakukan per bagian. Pada bagian ini, program kendali, gerakan aktuator pneumatik maupun elektrik, serta mekanisme turbin angin diuji secara terpisah. Pengambilan data – data keluaran sistem berupa kecepatan putaran juga dilakukan pada pengujian sub sistem mekanisme turbin ini. Tahap keempat adalah pengujian keseluruhan sistem secara terintegrasi. Pada bagian ini, sistem diuji agar mencapai tujuan yang ditentukan. Kemudian tahap terakhir adalah analisis hasil dari beberapa pengujian yang telah dilakukan serta penarikan kesimpulan. Adapun data pengujian meliputi:

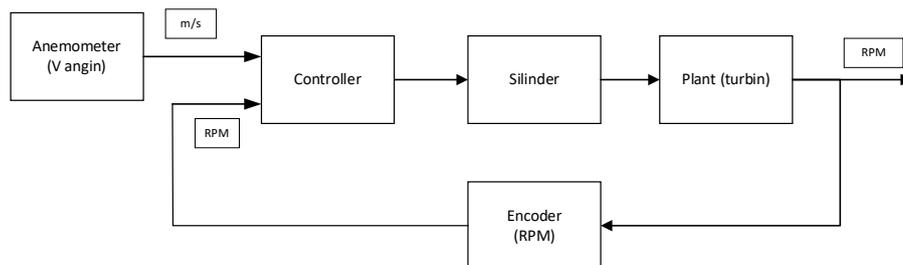
- Data pengujian hardware aktuator silinder pneumatik dan motor stepper
- Data pengujian arah sudut bilah dengan kecepatan angin bervariasi, dan arah angin konstan (diambil sampel kecepatan angin 4m/s, 6m/s, dan 8m/s)
- Data kontrol pitch saat melakukan pengereman ketika kecepatan angin di atas cut off.

Berikut Gambar 9 adalah diagram alir metodologi penelitian ini.

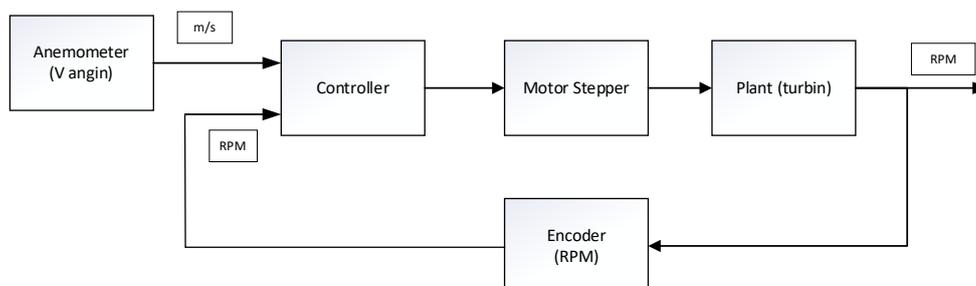


Gambar 9. Metodologi Penelitian

Adapun Diagram Blok masing-masing sistem kendali seperti ditunjukkan pada Gambar 10 untuk sistem kendali pneumatik dan Gambar 11 dengan sistem kendali elektrik motor.



Gambar 10. Blok diagram sistem dengan pneumatik

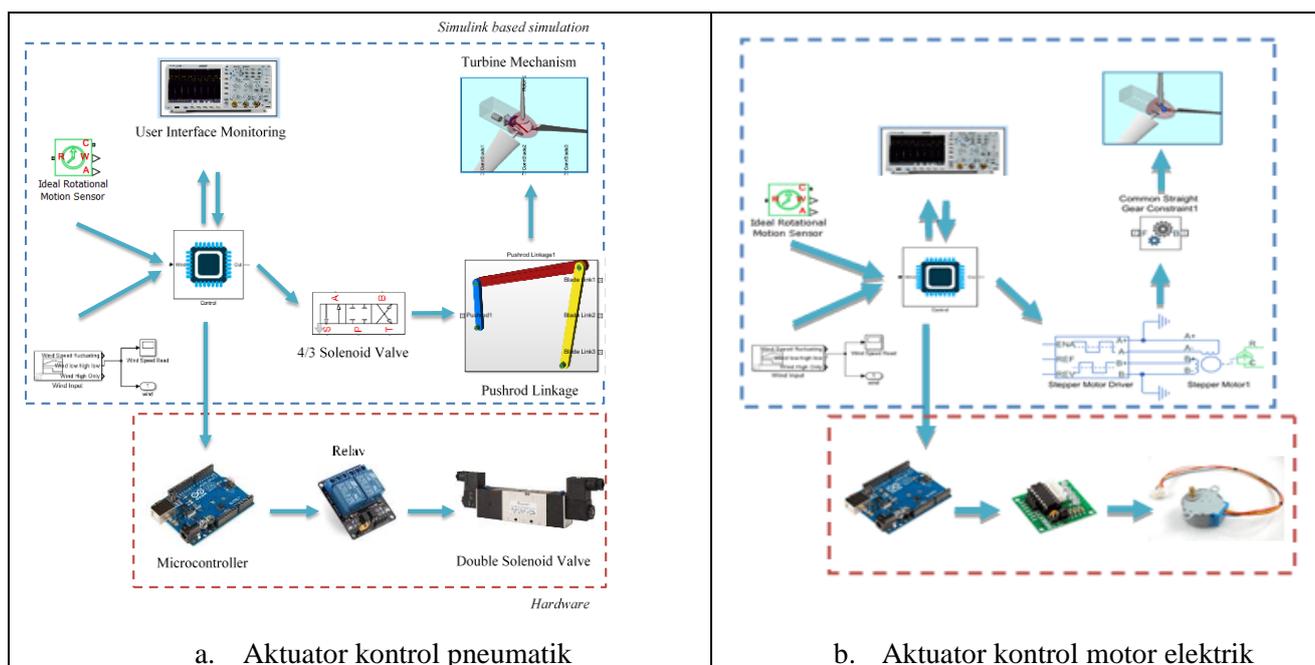


Gambar 11 Blok diagram sistem dengan motor stepper

Sistem ini mendapatkan input berupa kecepatan angin serta kecepatan putaran turbin yang kemudian diproses oleh kontroller. Kontroller akan membaca dan mengubah sinyal sensor menjadi perintah digital kepada aktuator untuk mengubah sudut *pitch* untuk pengereman ataupun kembali ke posisi semula. Ketika kecepatan angin melebihi batas yang ditentukan, kontroller harus memerintahkan aktuator untuk bergerak mundur agar turbin mengalami pengereman dan berhenti. Disamping itu, encoder juga membaca kecepatan putaran aktual turbin. Jika kecepatan putaran turbin sudah melebihi batas maksimum yaitu 40 RPM, aktuator akan bergerak sehingga turbin akan berada pada kondisi *pitching* sehingga mengalami pengereman. Namun sensor akan terus membaca kecepatan angin, hingga ketika kecepatan angin kembali dibawah batas yang telah ditentukan, maka kontroller akan memerintahkan aktuator agar kembali ke posisi semula sehingga turbin dapat kembali berputar.

Arsitektur Sistem

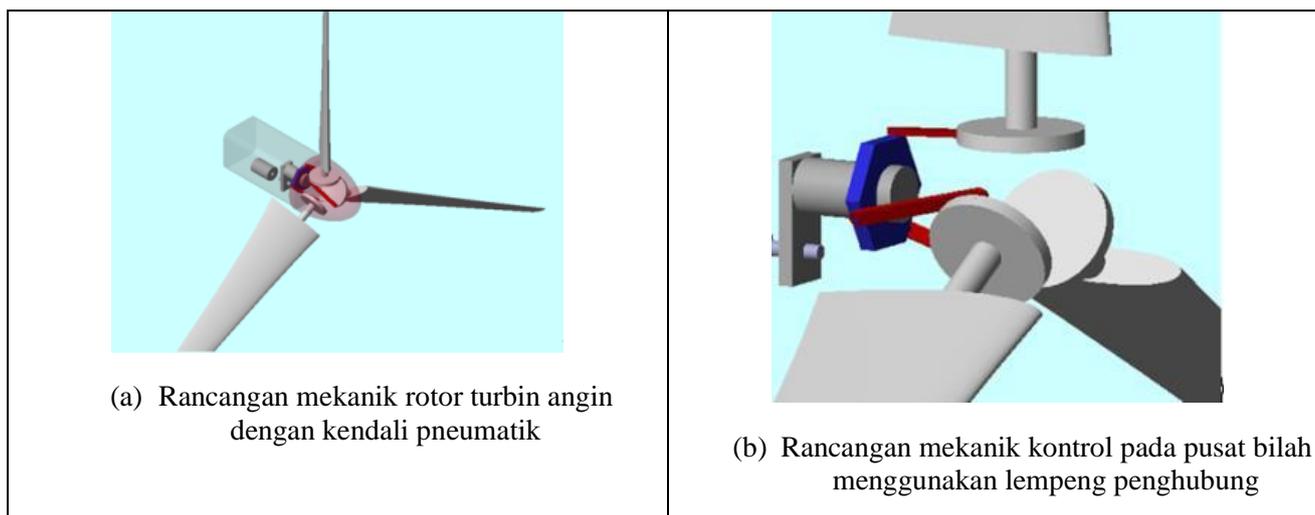
Dalam proses membuat suatu sistem, diperlukan gambaran umum terlebih dahulu agar mempermudah perancangan. Gambar 8 dibawah ini merupakan gambaran arsitektur sistem pengendalian *pitch angle* pada turbin angin yang akan dibuat dengan menggunakan aktuator pneumatik dan elektrik.



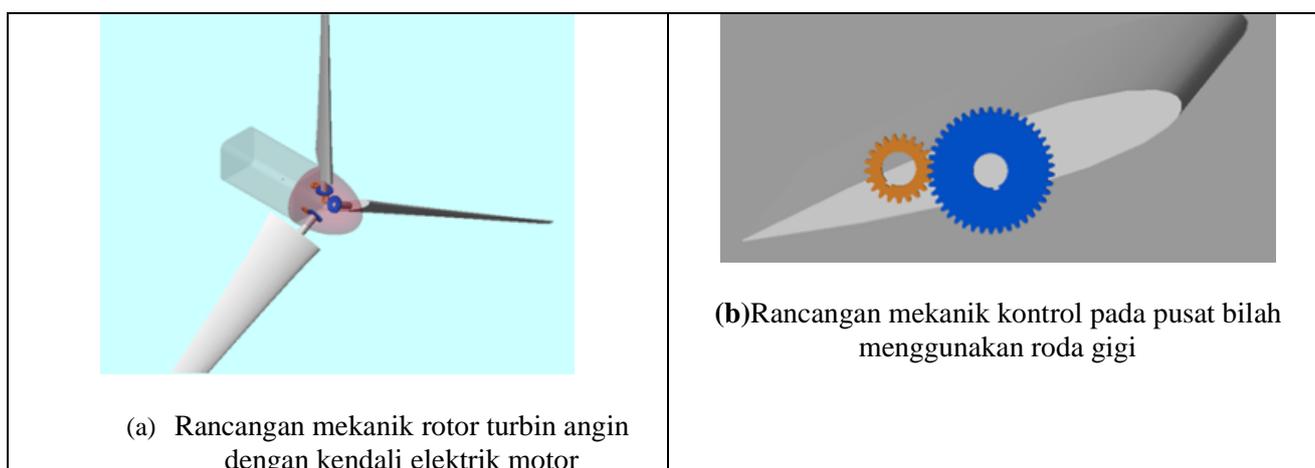
Gambar 12. Arsitektur aktuator Pneumatik dan Elektrik

Gambar 12 menjelaskan secara umum sistem pengontrolan *pitch angle blade* pada sebuah turbin. Pada bagian ini, sistem kendali *pitch* menggunakan aktuator pneumatik pada bagian 8a dan aktuator elektrik pada 8b. Sistem akan mendeteksi kecepatan angin yang menerpa turbin serta sensor putaran juga akan mendeteksi kecepatan putaran yang dihasilkan oleh turbin. Pada sistem yang dirancang ini, kecepatan putaran turbin dibatasi hingga 40 RPM. Kedua sinyal tersebut diolah oleh program layaknya pada mikrokontroler yang kemudian memberikan sinyal output kepada *control valve pneumatic* ketika kecepatan angin terlalu kencang diatas 20 m/s dan diprediksi akan merugikan sistem. Sinyal output itu merupakan perintah untuk mengubah sudut kemiringan *blade* agar terjadi pengereman hingga turbin berhenti berputar. Namun, ketika kecepatan angin kembali normal di batas yang aman, kontroller akan kembali memberi sinyal untuk mengembalikan sudut kemiringan *blade* ke posisi semula. Pada kondisi ini, turbin akan dapat kembali berputar dengan bebas. Sinyal kontrol yang ada pada simulasi akan dikirimkan kepada mikrokontroler sungguhan yaitu Arduino Uno melalui komunikasi serial. Arduino akan memproses data tersebut untuk memberikan perintah kepada relay agar mengaktifkan solenoid valve. Sehingga pada penelitian ini, simulasi yang dibuat akan dihubungkan secara realtime dengan hardware yang merupakan aktuator. Sedangkan untuk perancangan sistem dengan menggunakan aktuator motor stepper output dari kontroller adalah jumlah step yang menjadi input untuk motor stepper agar dapat menggerakkan *blade* dalam mengubah *pitch angle*.

Untuk desain mekanik ditunjukkan pada Gambar 13 turbin keseluruhan yang telah disematkan seperti pada gambar 9a dan mekanisme aktuator pneumatik untuk mengubah sudut *pitch blade* menggunakan lempeng seperti ditunjukkan gambar 9b. Sedangkan gambar 10 merupakan konstruksi turbin dengan aktuator elektrik pada sistem kendali sudut *pitch*. Sistem mekanik yang menggerakkan *pitch* menggunakan roda gigi.



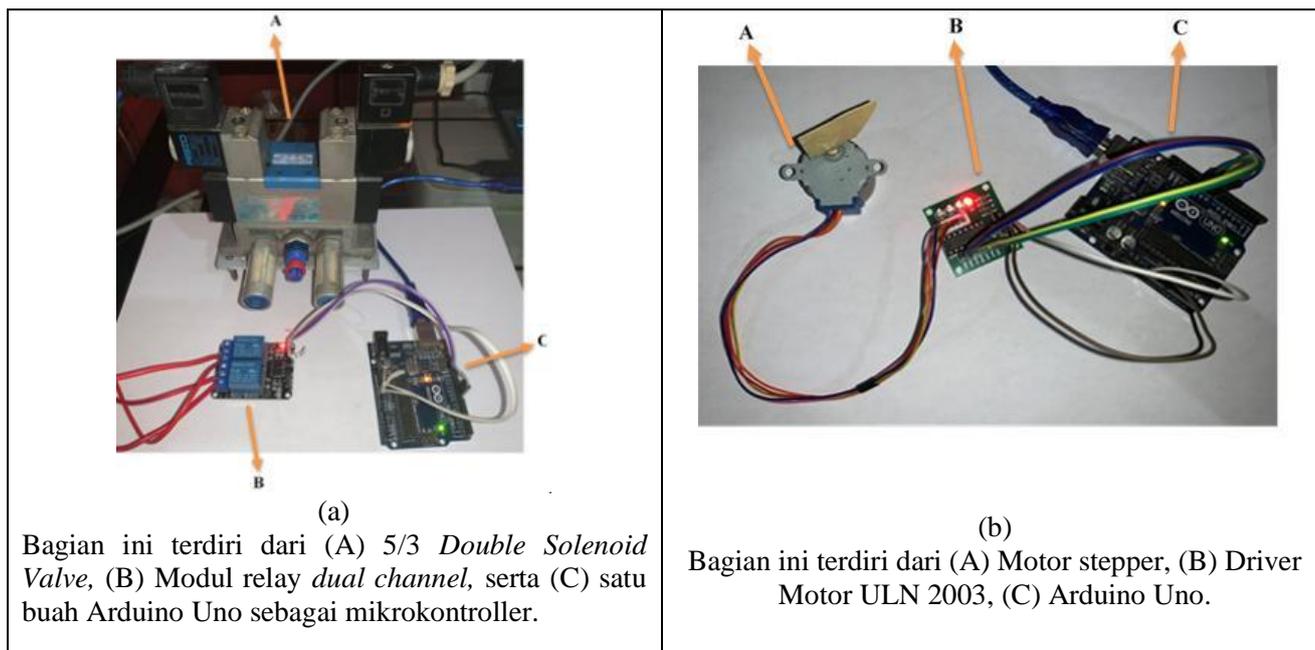
Gambar 13. Simulasi rancangan mekanik turbin dengan mekanisme pengubah sudut *pitch* aktuator (a) Rotor Turbin Angin keseluruhan (b) Bagian mekanik Lempeng penghubung



Gambar 14. Simulasi rancangan mekanik turbin dengan mekanisme pengubah sudut *pitch* aktuator (a) Rotor Turbin Angin keseluruhan (b) Roda gigi yang menggerakkan pitch

HASIL DAN PEMBAHASAN

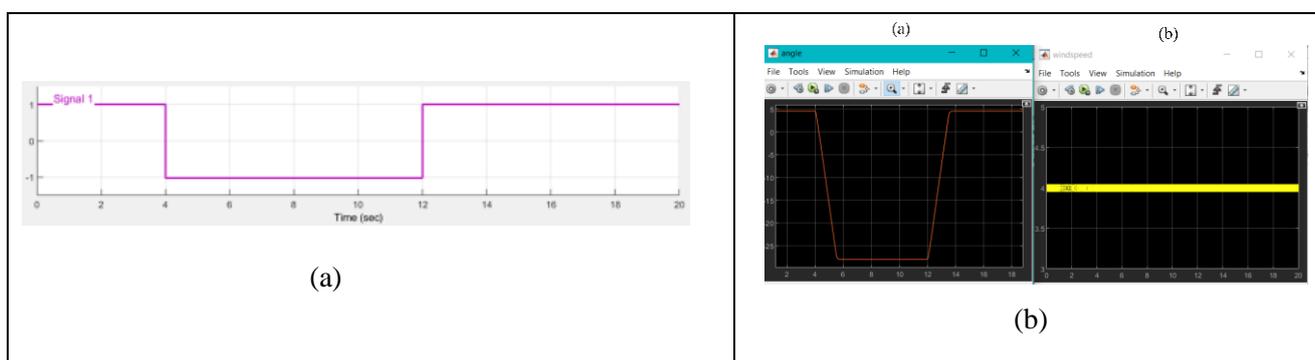
Untuk mengambil data percobaan adalah menyetting aktuator hardware dengan komputer. Pada aktuator silinder terdiri dari 5/3 double solenoid, modul relay dual channel, dan mikrokontroler arduino. Sedangkan pada aktuator elektrik menggunakan motor stepper, driver motor ULN 2003 dan mikrokontroler Arduino Uno. Seperti ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Hardware Aktuator (a) Sistem Aktuator Silinder Pneumatik, (b) Silinder Aktuator Elektrik Motor

a. Data pengujian hardware aktuator silinder pneumatik dan motor stepper

Untuk uji coba aktuator silinder pneumatik diberikan sinyal yang berasal dari Pengujian dilakukan dengan cara membuat sinyal kontrol agar blade pitching ke posisi maksimal dan kembali lagi ke posisi semula. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 15 sinyal kontrol memerintahkan sistem untuk pitching ke posisi maksimal untuk menghasilkan putaran pada detik ke-4. Kemudian pada detik ke-12 sinyal kontrol memberi perintah agar blade kembali pada posisi pengereman (posisi awal saat tidak bergerak). Proses pengujian ini disimulasikan pada beberapa kecepatan angin dari mulai kecepatan angin rendah, menengah, hingga kecepatan angin yang tinggi yang menghasilkan beban yang berat pada blade.



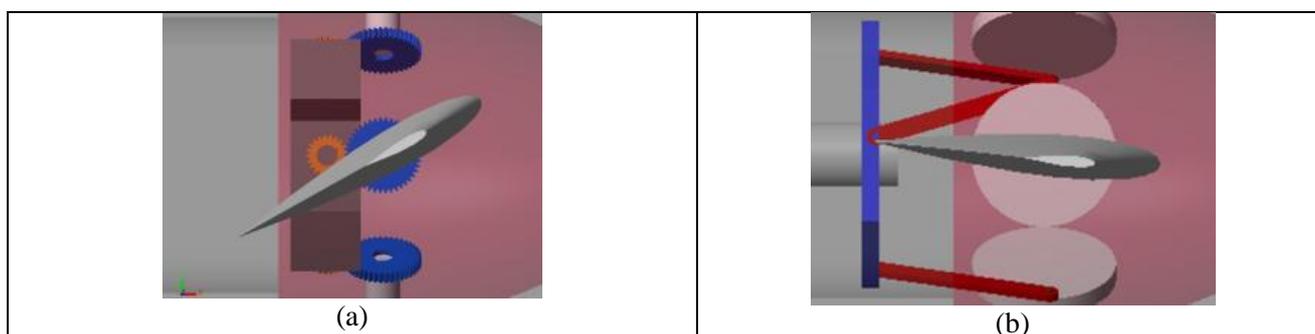
Gambar 16. Grafik pengujian pada antarmuka untuk kontrol pneumatik (a) Sinyal input kontrol, (b) Sudut bilah dan salah satu contoh pada kecepatan angin tertentu

Uji coba untuk mengetahui kecepatan respon dari aktuator motor stepper pada beberapa kondisi kecepatan angin. Motor stepper yang digunakan untuk mengubah sudut pitch pada masing-masing blade memiliki torsi 2 Nm. Berdasarkan literatur yang menjadi acuan, penggunaan motor servo dengan torsi 19,8 Kg.cm cukup untuk menggerakkan blade seberat 900 gram dengan radius turbin 1,1m [1]. Dapat dilihat pada grafik angle, blade pitching ke posisi maksimal membutuhkan waktu 1,95 detik.



Gambar 17. Grafik pengujian pada antarmuka untuk kontrol elektrik (a) Sinyal input kontrol, (b) Sudut bilah dan salah satu contoh pada kecepatan angin tertentu

Kemudian diujicobakan pula pergerakan bilah ketika kontrol pitch terjadi secara mekanik, salah satu contoh pergerakan mekanik bilah baik pada kontrol elektrik maupun pneumatik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 18a dimana pergerakan bilah dengan penampakan bilah dari arah depan, dimana roda gigi akan memutar bilah sesuai sudut tertentu. Pada Gambar 18b, pergerakan bilah rotor dengan susunan mekanik lempeng penghubung yang menyebabkan bilah berubah sudut.



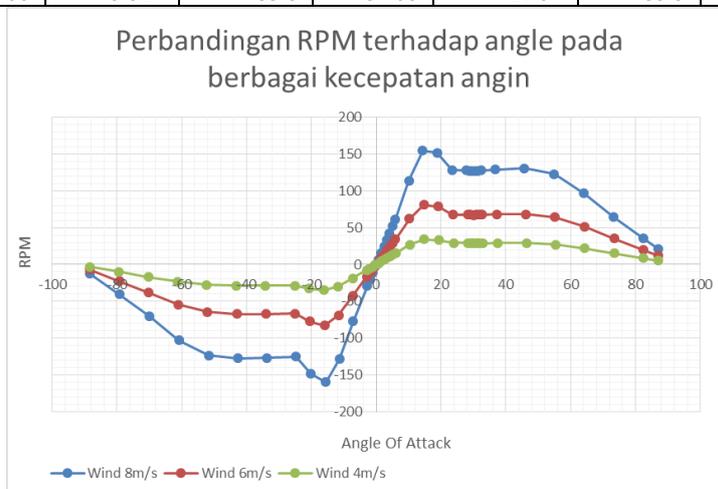
Gambar 18. Simulasi pengujian pergerakan bilah dengan variasi kecepatan angin (a) Pergerakan bilah karena roda gigi pada sistem kontrol elektrik, (b) Pergerakan bilah karena lempeng tuas pada sistem kontrol pneumatik.

b. Data pengujian arah sudut bilah dengan kecepatan angin bervariasi, dan arah angin konstan (diambil sampel kecepatan angin 4m/s, 6m/s, dan 8m/s)

Dengan mengatur-atur kecepatan angin diambil sampel yaitu 4m/s, 6m/s, dan 8 m/s dimana kecepatan angin ini pada umumnya yang ada di Indonesia. Maka akan terlihat kecepatan rotor (dalam RPM) dan sinyal kontrol pitch yang akan menggerakkan blade sehingga sudut pitch menyesuaikan sebagaimana tahapannya seperti pada blok diagram (Gambar 10 dan Gambar 11). Dalam simulasi juga diperlihatkan variasi sudut bilah ketika kecepatan angin berubah-ubah sedangkan arah anginnya tetap. Diperlihatkan perubahan sudut bilah (θ) dan sudut serang angin (Aoa) seperti pada data di **Tabel 1** dan dibuat grafiknya seperti pada Gambar 19. Disini terlihat bahwa pada sudut sekitar 18° memberikan kecepatan putar rotor tertinggi. Kecepatan putar rotor tertinggi berhubungan dengan energy yang dapat dihasilkan. Sehingga dapat menjadi salah satu parameter rujukan ketika akan melakukan implementasi ke benda fisik.

Tabel 1. Data Variasi Sudut Bilah (θ) dan sudut serang dari angin (Aoa) pada kecepatan 4m/s, 6 m/s dan 8m/s

Wind 4m/s			Wind 6m/s			Wind 8m/s		
Angle(θ)	Aoa	RPM	Angle(θ)	Aoa	RPM	Angle(θ)	Aoa	RPM
90.01	-88.41	-3.112	90.02	-88.4	-6.993	90	-88.39	-12.46
63	-61.29	-23.25	62.96	-61.15	-54.24	62.86	-60.91	-102.4
53.98	-52.28	-27.36	53.91	-52.07	-64.43	53.69	-51.72	-123.4
44.98	-43.31	-28.56	44.91	-43.03	-67.06	44.67	-42.67	-127.4
36	-34.23	-28.73	35.94	-34.05	-67.24	35.69	-33.7	-126.8
17.99	-16.18	-34.93	17.94	-16.01	-82.86	17.71	-15.63	-159.6
13.53	-11.74	-29.78	13.48	-11.57	-68.85	13.37	-11.4	-128.1
9.022	-7.323	-18.91	8.975	-7.219	-42.75	8.939	-7.165	-77.03
-3.565	5.069	12.98	-3.564	5.039	29.2	-3.613	4.988	52.08
-4.514	5.965	15.3	-4.52	5.901	34.43	-4.494	5.84	61.52
-9	10.37	26.86	-8.969	10.25	61.84	-8.893	10.06	113.7
-13.48	14.8	34.31	-13.43	14.63	80.87	-13.24	14.34	154.3
-62.98	64.41	22.18	-62.96	64.27	51.52	-62.84	64.07	96.71
-72.01	73.47	15.5	-71.97	73.38	35.46	-71.94	73.34	64.49
-85.49	87.06	5.327	-85.8	87.03	11.97	-85.5	87	21.3

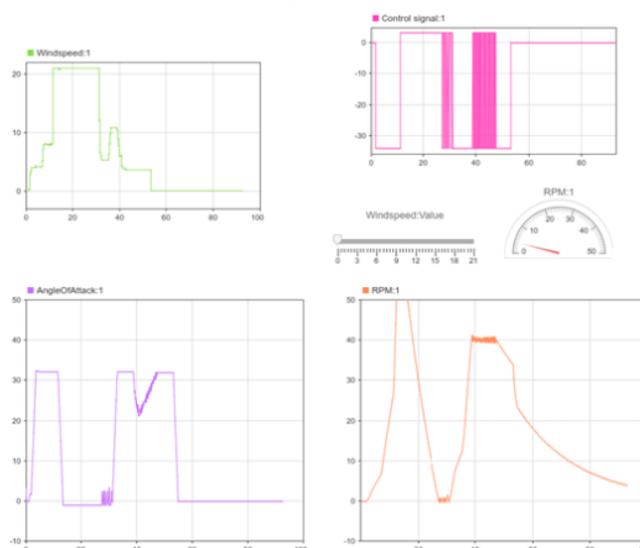


Gambar 19. Variasi sudut bilah dengan kecepatan rotor (RPM) pada kecepatan angin
 (a) saat $v_{\text{angin}} : 4 \text{ m/s}$, (b) $v_{\text{angin}} : 6 \text{ m/s}$, (c) $v_{\text{angin}} : 8 \text{ m/s}$

c. Data kontrol pitch saat melakukan pengereman ketika kecepatan angin di atas cut off.

Pada pengujian data pengereman rotor ketika kecepatan angin melebihi kecepatan cut-off baik pada sistem kontrol pitch dengan elektrik ditunjukkan pada Gambar 20 maupun pneumatik pada Gambar 21. Terlihat pada antarmuka di komputer saat melakukan simulasi pada berbagai kecepatan angin namun arah angin konstan, diperoleh respon kecepatan rotor yang awalnya cenderung naik, namun ketika mencapai kecepatan cut-off maka akan terjadi pitching (gerakan mengubah sudut bilah) yang mengakibatkan resultan gaya angkat dan gaya geser turun drastis sehingga mengakibatkan torsi menjadi nol. Saat itulah terjadi pengereman.

• *Simulasi Bagian Kendali Pitch Turbin dengan Elektrik Motor*



Gambar 20. Tampilan respon sistem dengan aktuator elektrik pada variasi kecepatan angin

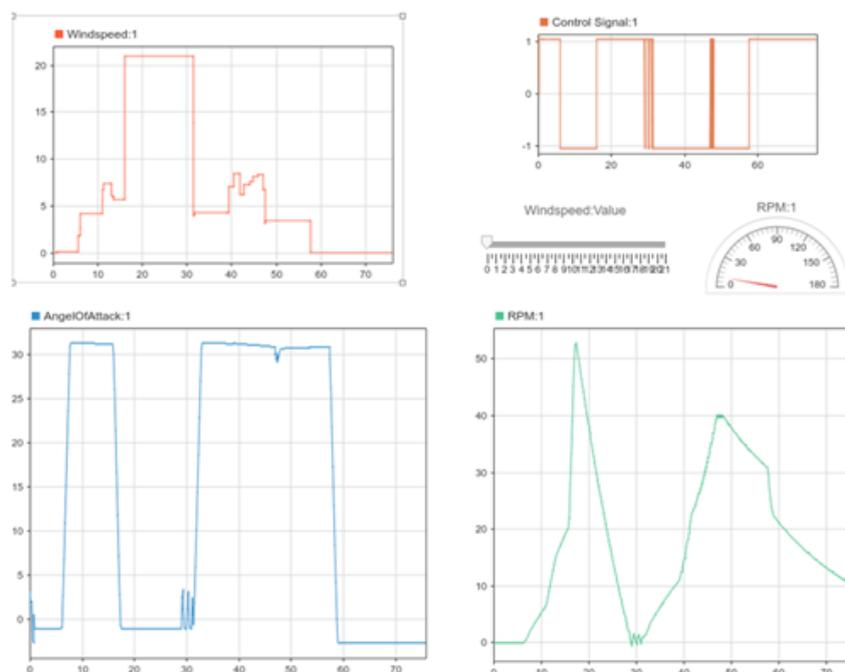
Tabel 2. Data Simulasi Aktuator Elektrik Turbine Angin

Wind Speed	Blade Condition	Pulse Command	AOA	Rotation Speed
0 m/s	Zero Pos	0	0 deg	0 RPM
8 m/s	Normal	-34	32 deg	30 RPM
21 m/s	Pitching	3	(-1) deg	0 RPM
6 m/s	Normal	-34	32 deg	20 RPM
11 m/s	Normal	-34	32 deg	40 RPM

Pada Tabel 2 didapatkan cuplikan data simulasi yaitu saat kecepatan 0 dimana kondisi di 0 derajat, dan laju putarnya 0 RPM, sedangkan saat 8m/s, 6m/s dan 11 m/s memiliki laju putar rotor 30 RPM, 30 RPM, dan 40 RPM. Namun saat kecepatan angina di atas 20 m/s, maka bilah berubah sudut yang mengakibatkan bilah terpitching atau kecepatan putar 0 RPM

• *Simulasi Bagian Kendali Pneumatik*

Pada tabel 2 didapatkan cuplikan data simulasi yaitu saat kecepatan 0 dimana kondisi di 0 derajat, dan laju putarnya 0 RPM, sedangkan saat 7m/s, 4m/s dan 9 m/s memiliki laju putar rotor 25 RPM, 20 RPM, dan 40 RPM. Namun saat kecepatan angina di atas 20 m/s, maka bilah berubah sudut yang mengakibatkan bilah terpitching atau kecepatan putar 0 RPM



Gambar 21. Tampilan respon sistem dengan aktuator pneumatik pada kecepatan angin bervariasi

Table 3. Pneumatic actuator wind turbine simulation results sampling data

Wind Speed	Blade Condition	Command	AOA	Rotation Speed
0 m/s	Pitching	For	(-1) ^o	0 RPM
7 m/s	Normal	Rev	32 ^o	25 RPM
22 m/s	Pitching	For	(-1) ^o	0 RPM
4 m/s	Normal	Rev	32 ^o	20 RPM
9 m/s	Normal	Rev	32 ^o	40 RPM

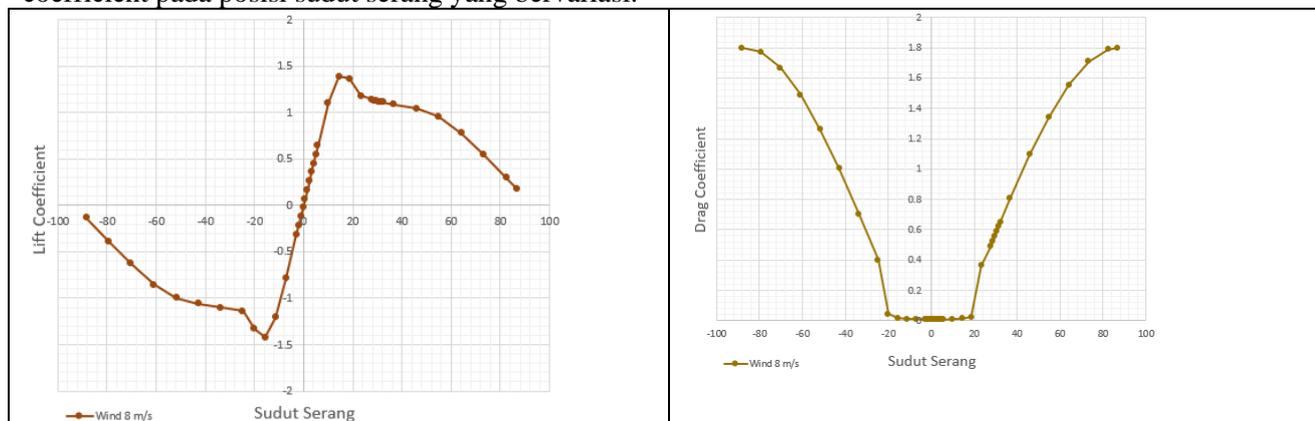
Untuk perubahan kecepatan angin yang berbeda-beda didapat respon waktu baik dari control pneumatic dan elektrik dimana respon waktu ini menunjukkan kecepatan perubahan sudut pitch. Untuk variasi kecepatan angina yang sama respon waktu setiap kendali menunjukkan variasi yang konsisten. Namun terlihat respon waktu control pneumatic lebih pendek yaitu 1.7 detik daripada respon waktu system kendali elektrik motor yaitu 2 detik. Sehingga control pneumatic menunjukkan waktu yang lebih cepat daripada control elektrik motor.

Tabel 4. Data respon time aktuator elektrik dan aktuator pneumatik pada berbagai kondisi kecepatan angin

No	Kecepatan Angin (m/s)	Respon Time Kontrol Pneumatik (s)	Respon Time Kontrol Elektrik Motor (s)
1	4	1,7	2
2	8	1,7	2
3	12	1,7	2
4	16	1,7	2
5	20	1,7	2

Hubungan antara C_L dan C_D terhadap sudut serang

Pada penelitian ini, profil sudu yang digunakan adalah jenis airfoil NACA 0015. Dari data yang didapatkan, dengan beberapa posisi sudut serang yang sama dengan pengujian sebelumnya, dihasilkan data lift coefficient dan drag coefficient yang berikutnya akan diperhitungkan pada penentuan besaran gaya lift dan gaya drag. Dari data yang didapatkan, lift coefficient terbesar berada pada sudut serang 16 derajat atau pada sudut bilah 18°. Drag coefficient yang terbesar berada pada sudut serang yang paling besar yaitu pada posisi sudut serang 87 derajat. Dalam hal ini, semakin besar sudut serangnya, maka drag coefficient akan semakin besar. Gambar 22 dibawah ini adalah grafik yang menunjukkan nilai lift coefficient dan drag coefficient pada posisi sudut serang yang bervariasi.



Gambar 22. Grafik sudut serang terhadap (a) Lift Coefficient, (b) Drag Coefficient

PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian simulasi pengujian kinerja kendali pitch turbin angin berbasis MATLAB Simulink yang telah dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan diantaranya adalah Simulasi control pitch pada turbin angin berbasis Matlab Simulink telah dapat memadukan perputaran mekanis rotor turbin yang ditunjukkan oleh software dengan hardware actuator silinder pneumatic dan elektrik motor stepper. Dari simulasi dapat diperoleh parameter mekanik maupun system control jika akan diimplementasikan ke benda fisik dengan bilah tipe NACA 0015, panjang 40 cm, maka kemiringan putar bilah dibuat 18° yang menunjukkan putaran motor terbesar saat arah angin bervariasi dan jika akan menerapkan system control menggunakan pneumatic dikarenakan memberikan respon pengereman lebih cepat (1.7 detik) daripada system control elektrik (2 detik).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Ismail, "Desain Blade Angle Pitch Control Pada Turbin Angin Tipe Propeller Menggunakan Fuzzy Logic Controller Di Pantai Pancer Puger Jember," Universitas Jember, 2016.
- [2] Arifin, "Optimasi Daya pada Sistem Turbin Angin Menggunakan Kontrol Pitch Angle dengan Fuzzy Logic Control (Aplikasi pada Kecepatan Angin Daerah Nias Utara)," Universitas Sumatera Utara, 2017.
- [3] F. Zhou and J. Liu, "Pitch Controller Design of Wind Turbine Based on Nonlinear PI/PD Control," *Shock Vib.*, vol. 2018, pp. 1–14, Oct. 2018, doi: 10.1155/2018/7859510.
- [4] Z. Dzulfikri, "Rancang Bangun Penerapan Jaringan Saraf Tiruan Untuk Memprediksi Arah Angin Pada Pengontrolan Yaw Purwarupa Turbin Angin," Bandung Polytechnic of Manufacturing, 2019.
- [5] Ismail and T. Arrahman, "Perancangan Turbin Angin Sumbu Horizontal Tiga Sudu Dengan Kapasitas 3 MW," *Presisi*, vol. 6, no. 3, p. 113, 2017.
- [6] E. L. Pahlevi and S. Yana, "Pengaturan Pitch Angle Turbin Angin Berbasis Kendali Logika Fuzzy (Aplikasi Pada Data Angin Daerah Medan Tuntungan dan sekitarnya)," *J. Singuda Ensikom Vol.14*, vol. VOL.14 NO., no. 1, pp. 89–94, 2016.

- [7] M. Ramadhan, "Rancang Bandung Kontrol Pitch Pada Prototipe Turbin Angin Berbasis Servo Pneumatik," Bandung Polytechnic of Manufacturing, 2018.
- [8] N. Hadi, S. Satwiko, and K. Natalia, "Karakteristik Wind Turbine Tipe Horizontal Tiga Sudu Menggunakan Wind Tunnel Sederhana," pp. 3–6, 2013.
- [9] A. M. Siregar, "Rancang Bangun Wind Tunnel Sederhana Untuk Alat Pendukung Studi Eksperimental," *J. Ilm. Mek. Tek. Mesin ITM*, vol. 2, no. 2, pp. 92–97, 2016.
- [10] A. Musyafa', "Design And Development Of Fuzzy Logic Controller On The Pitch Angle Of The Wind Turbine For Electrical Power Optimization In The East Java Wind Farm - Indonesia," Sepuluh Nopember Institute of Technology, 2012.
- [11] J. V. Tuapetel, I. A. Triprayoga, and P. M. Santika, "Analisis Dan Pengujian Kinerja Turbin Angin Savonius 4 Sudu," *J. Tek. Mesin ITI*, vol. 3, no. 2, p. 46, 2019, doi: 10.31543/jtm.v3i2.307.
- [12] ph. D. David A. Spera, *Wind Turbine Technology*, Second Edi. 2009.
- [13] H. Ameur and K. Boukhadia, "Numerical Study of the Air Flow over a NACA 0015 Wind Turbine Airfoil," no. April, 2018, doi: 10.20944/preprints201804.0002.v1.

Biodata Penulis

Nuryanti, lahir di Jakarta, 26 April 1976. Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Fisika ITB 2001. Tahun 2005 memperoleh gelar Master of Science dari TU-Muenchen Jerman dengan bidang Teknik Fisika (Ilmu Material). Staf pengajar di jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika sejak tahun 2009-sekarang.

Abyanuddin Salam, dilahirkan di Bandung 4 Oktober 1989. Menyelesaikan D4 pada jurusan Teknik Manufaktur konsentrasi Elektromekanik Politeknik Manufaktur Bandung dan pendidikan Pascasarjana (S2) Master of Science dari FH Coburg Jerman. Staf Pengajar di jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika sejak tahun 2019- sekarang.

Adrian Julianto, dilahirkan di Bandung. Menyelesaikan pendidikan D4 Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi Jurusan Teknik Otomasi dan Mekatronika Politeknik Manufaktur Bandung tahun 2020