

Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan *Human Machine Interface*

Salihul Fajri^{*)1}, Muldi Yuhendri²

^{1,2}Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang

^{*)}Corresponding author, salihulfajri.20@gmail.com

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga angin adalah salah satu jenis energi terbarukan yang mulai berkembang di Indonesia. Pembangkit listrik tenaga angin ini menggunakan turbin angin untuk mengkonversikan daya angin menjadi daya mekanik yang akan menggerakkan generator listrik. Generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin ini memiliki batas maksimum. Turbin angin yang beroperasi harus dibawah batas maksimum generator agar tidak terjadi kerusakan pada generator tersebut. Agar tidak terjadi operasi melampaui batas maksimum generator, maka perlu dilakukan monitoring dan proteksi terhadap komponen-komponen yang ada pada pembangkit listrik tenaga angin tersebut. Dengan hal itu paper ini mengusulkan monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan *Human Machine Interface* (HMI) yang dilengkapi dengan *Programable Logic Controller* (PLC). Alat yang dibuat dalam penelitian ini diujicobakan pada pembangkit listrik tenaga angin yang menggunakan turbin angin sumbu horizontal dan generator sinkron jenis magnet permanent. Monitoring pembangkit listrik tenaga angin ini dirancang dengan menggunakan *Programable Logic Controller* (PLC) S7 1200 1215C DC/DC/Relay dan *Human Machine Interface* (HMI) Simatic KTP 700 Basic PN untuk display dari parameter yang dimonitor yaitu arus, tegangan, kecepatan angin, kecepatan putaran dan daya. Monitoring ini dilengkapi dengan sensor tegangan, sensor arus, sensor kecepatan angin, sensor kecepatan putaran dan kontaktor sebagai pemutus arus ketika telah melebihi batas arus yang telah diatur sebelumnya. HMI sudah berhasil menampilkan data tegangan, arus, kecepatan angin, kecepatan putaran dan daya. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa monitoring pembangkit listrik tenaga angin yang diusulkan telah bekerja dengan baik sesuai dengan tujuan.

Abstract

Wind power plants are one of the renewable energy sources that are beginning to develop in Indonesia. These wind power plants utilize wind turbines to convert wind energy into mechanical power, which in turn drives an electric generator. The generator used in wind power plants has a maximum limit. The operating wind turbines must remain below this maximum limit to prevent damage to the generator. To ensure that the operation stays within the generator's limits, monitoring and protection of the components in the wind power plant are necessary. Therefore, this paper proposes the use of a Human-Machine Interface (HMI) equipped with a Programmable Logic Controller (PLC) for monitoring wind power plants. The device created in this research was tested on a wind power plant that utilizes horizontal-axis wind turbines and permanent magnet synchronous generators. The monitoring system for the wind power plant was designed using the Siemens S7-1200 1215C DC/DC/Relay PLC and the Simatic KTP 700 Basic PN HMI for displaying the monitored parameters, including current, voltage, wind speed, rotational speed, and power. This monitoring system is equipped with voltage sensors, current sensors, wind speed sensors, rotational speed sensors, and a contactor to interrupt the current when it exceeds a pre-set limit. The HMI successfully displays voltage, current, wind speed, rotational speed, and power data. The experimental results demonstrate that the proposed monitoring system for wind power plants operates effectively and achieves its intended objectives.

INFO.

Info. Artikel:

No. 421

Received. June, 19, 2023

Revised. July, 12, 2023

Accepted. July, 19, 2023

Page. 434 - 444

Kata kunci:

- ✓ PLTB
- ✓ Turbin Angin
- ✓ Generator
- ✓ Human Machine Interface
- ✓ PLC
- ✓ Sistem Monitoring

PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu dari sekian banyaknya masalah yang dialami oleh setiap negara. Energi listrik dari generator berbahan bakar fosil yang selama ini menjadi sumber energi utama dikebanyakan negara kini sudah semakin langka. Kelangkaan energi listrik semakin lama semakin terasa. Setiap harinya ada pemadaman bergilir di beberapa wilayah salah satunya di negara Indonesia, efeknya sangat terasa sekali bagi masyarakat yang sedang melakukan aktifitas. Tidak hanya pada masyarakat, perusahaan besar pun masih sering merasakan masalah ini meskipun perusahaan tersebut memiliki sumber tenaga listrik cadangan generator. Akan tetapi sumber cadangan ini terkadang tidak mampu memenuhi kebutuhan listrik secara terus menerus [1]. Di daerah-daerah yang masih belum terjangkau jaringan listrik maka pemanfaatan energi terbarukan untuk pembangkit tenaga listrik adalah pilihan yang tepat untuk memperoleh daya listrik. Beberapa sumber energi terbarukan yang dapat digunakan untuk pembangkit tenaga listrik antara lain kecepatan angin, mikro hidro, cahaya matahari dan sebagainya [2]-[4].

Matahari dan angin adalah sumber energi paling populer saat ini dikarenakan peningkatan luar biasa dibidang elektronika dan sistem transmisi, lingkungan pengoperasian sistem transmisi biasanya kompleks. Seiringan dengan perluasan kapasitas, instalasi tenaga angin banyak digunakan pada masa ini [5]-[7]. Kemajuan pesat dalam teknologi yang digunakan untuk pengumpulan energi terbarukan telah menghasilkan peningkatan sumber energi. Salah satu energi terbarukan adalah energi angin, dimana energi angin ditangkap melalui penggunaan turbin angin yang ditempatkan di daratan (darat) atau lepas pantai (laut). Ladang angin semakin banyak digunakan di lepas pantai dikarenakan kondisi angin yang lebih kuat dan lebih stabil [8]-[11]. Oleh sebab itu, pemanfaatan angin untuk pembangkit tenaga listrik sangat berkemungkinan untuk dikembangkan. Energi angin dapat dikoversikan menjadi daya listrik dengan menggunakan turbin angin. Oleh karena itu perlunya pemantauan proses konversi energi kinetik menjadi tenaga listrik. Adapun komponen pada pembangkit listrik tenaga angin yaitu turbin angin, generator, gearbox, poros dan sistem yaw [12]-[15].

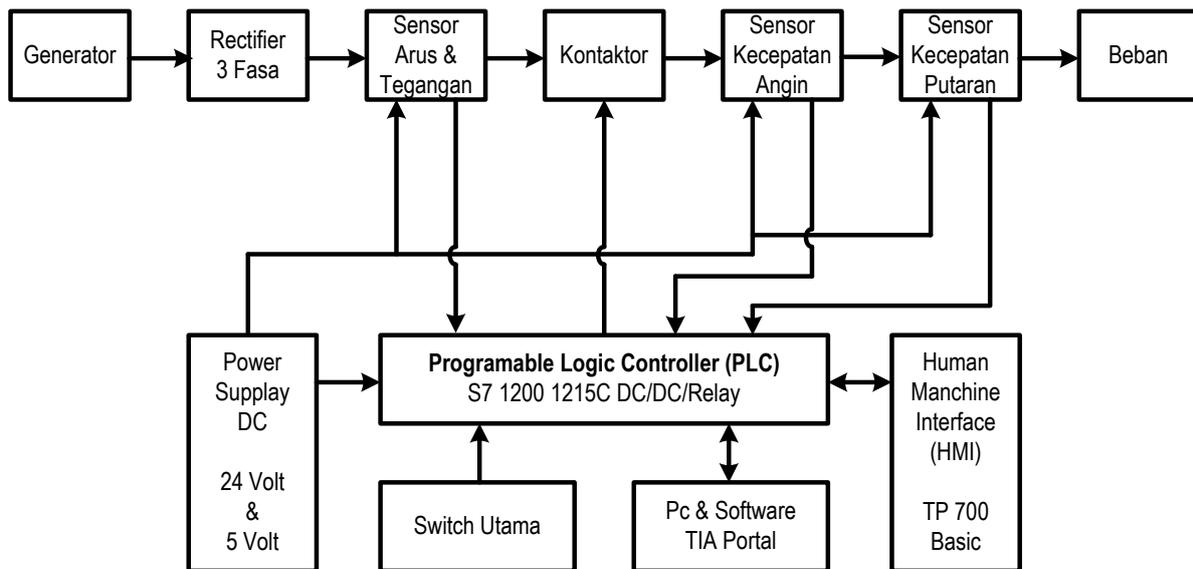
Sistem pembangkit turbin angin merupakan salah satu cara untuk mengatasi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. Pembangkit turbin angin ini dikembangkan dengan daya keluaran maksimum dan memperluas jangkauan operasi pada semua kecepatan angin. Variabel pembangkit turbin angin banyak menggunakan magnet permanent dimana keuntungannya seperti mudah dikendalikan dan memiliki efisiensi tinggi sehingga kurangnya rugi-rugi rotor. Beberapa turbin angin diterapkan pada pembangkit listrik menggunakan sumbu horizontal, memiliki banyak keunggulan salah satunya kecepatan rotor yang mudah dikontrol. Umumnya, kontrol kecepatan variabel pembangkit turbin angin menggunakan konverter daya. Berbagai jenis konverter banyak digunakan ialah konverter back to back, diode rectifier, dan sebagainya [16]-[19].

Untuk menjaga keselamatan operasional pembangkit listrik tenaga angin ini, maka perlunya dilakukan monitoring dan proteksi terhadap turbin angin dan generator, sehingga pembangkit listrik tidak bekerja diluar batasnya. Berdasarkan kemampuan generator, pengoperasian turbin angin dapat dibagi menjadi empat zona operasi yaitu zona 1,2,3, dan 4. Zona 1 atau zona *cut in* merupakan zona dimana kecepatan angin yang mengenai turbin masih dibawah rata-rata untuk menggerakkan turbin angin. Pada zona 2 yang mana daya mekanik yang dihasilkan masih dibawah reting generator. Pada zona 3 daya mekanik yang dihasilkan turbin angin masih dapat dikendalikan, sedangkan pada zona ke 4 merupakan zona yang memiliki kecepatan angin yang sudah melampaui kemampuan turbin angin, oleh sebab itu operasi pembangkit listrik tenaga angin harus dihentikan yang disebut sebagai zona *cut off*. Berdasarkan zona operasi ini, maka pembangkit hanya beroperasi pada zona 2 dan 3 [20]-[22]. Beberapa sistem monitoring yang telah diterapkan pada pembangkit listrik tenaga angin antara lain sistem monitoring berbasis *Wireless* [18], GUI Matlab [21], *Smartphone* Android [22], *Human Machine Interface* (HMI) [23]-[25]. HMI adalah salah satu peralatan yang banyak digunakan untuk berbagai aplikasi kendali dan monitoring, karena memiliki beberapa kelebihan, seperti dapat menampilkan data dalam berbagai bentuk angka, grafik atau gambar [24] [26].

Monitoring pembangkit listrik tenaga angin yang diusulkan dalam penelitian ini terdiri dari turbin angin, generator, sensor arus, sensor tegangan, sensor kecepatan angin dan sensor kecepatan putaran dirancang menggunakan HMI. Sebagai pusat pengontrolan dan pengolahan data dirancang dengan menggunakan PLC. Sistem monitoring dirancang mencakup sistem proteksi pada turbin angin.

METODE PENELITIAN

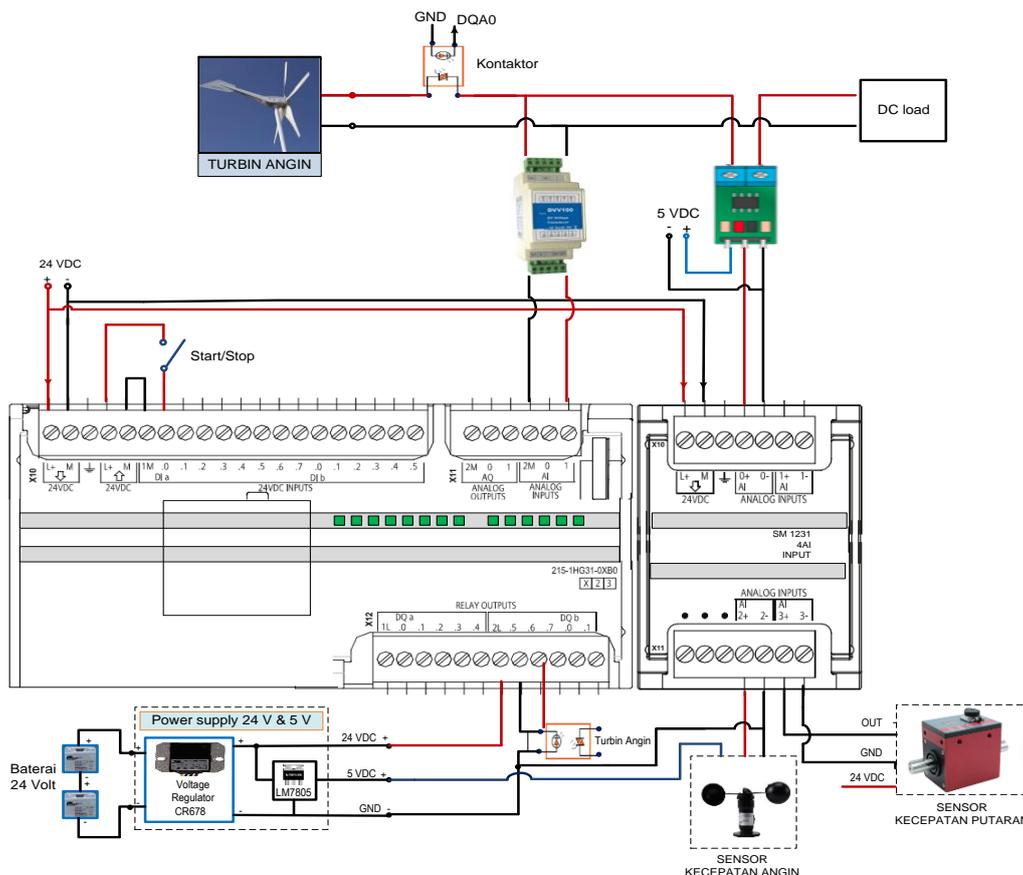
Penelitian tentang monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan HMI yang diusulkan dalam paper ini dilakukan dalam bentuk eksperimen di laboratorium, yang dimulai dari perancangan, perakitan alat, pengujian alat, pengujian data dan analisa dalam bentuk monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan HMI. Metode perancangan alat dilakukan menjadi beberapa tahap yang terdiri dari perancangan perangkat keras dan perangkat lunak. Monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan HMI yang akan dibuat dapat dilihat pada blok diagram yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram

Gambar 1 menunjukkan bahwa monitoring terdiri dari HMI TP 700 Basic PN, PLC S7 1200 DC/DC/Relay, sensor kecepatan angin, sensor kecepatan putaran, sensor tegangan, sensor arus dan kontaktor. Monitoring pembangkit listrik tenaga angin ini dirancang dengan menggunakan PLC S7 1200 1215C DC/DC/Relay yang dilengkapi dengan modul input analog empat channel 13 bit sebagai alat kontrol dan alat pengolah data. Untuk menampilkan data yang dimonitor digunakan HMI TP 700 Basic. Data yang ditampilkan pada layar HMI mencakup tegangan, arus, kecepatan angin dan kecepatan putaran. Data monitoring ditampilkan dalam bentuk grafik dan angka. Monitoring pembangkit listrik tenaga angin mencakup fungsi start/stop dan proteksi terhadap arus berlebih. Fungsi start/stop turbin angin, sensor dilakukan dengan menggunakan kontaktor yang dapat dioperasikan pada layar HMI. Proteksi arus berlebih dilakukan menggunakan kontaktor, dimana kontaktor akan memutus arus dari turbin angin jika besaran arus yang dihasilkan oleh sensor melebihi batas nilai arus yang telah disetting. Untuk mengaktifkan sistem monitoring terdapat *switch* utama yang dipasang di depan *box* panel yang merupakan input bagi PLC untuk mengaktifkan sistem untuk ditampilkan di layar HMI. Monitoring pembangkit listrik tenaga angin ini menggunakan power suplai DC 24 Volt untuk PLC, HMI dan sensor tegangan serta suplai 5 Volt untuk sensor arus.

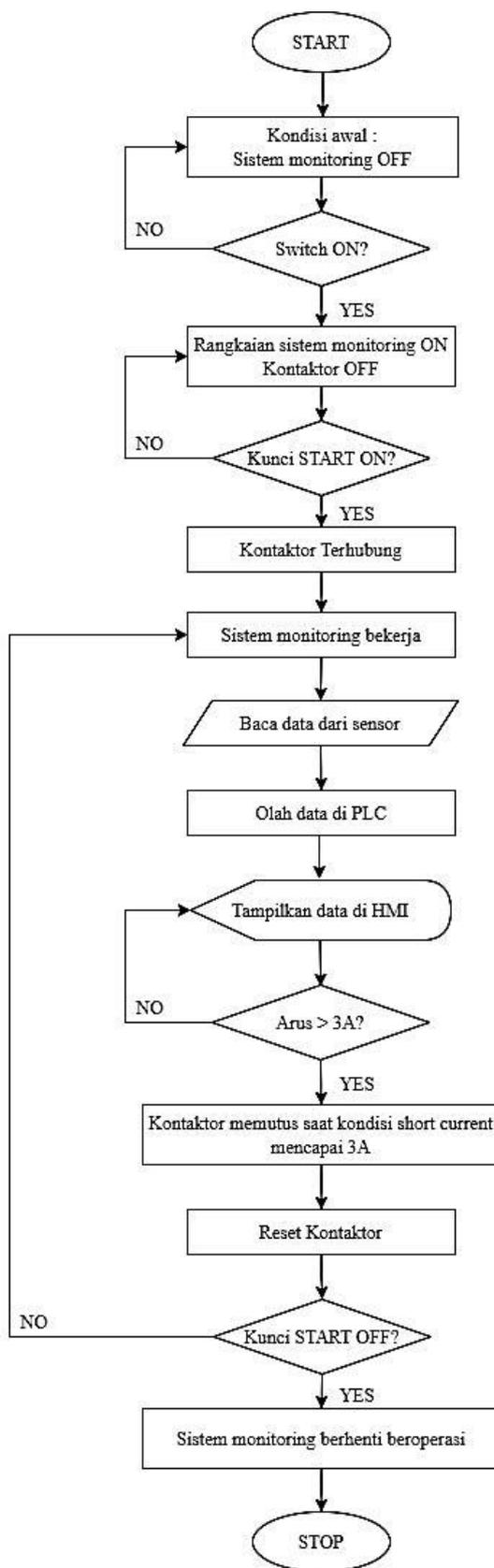
Prinsip kerja dari alat ini adalah monitoring pembangkit listrik tenaga angin diaktifkan melalui *switch* utama. Setelah system aktif maka rangkaian turbin angin dapat diaktifkan melalui tombol start turbin angin pada di layar HMI. Ketika panel turbin angin sudah aktif, maka kontaktor akan menghubungkan rangkaian turbin angin sehingga sensor akan terbaca dan terlihat pada layar HMI. Kontaktor juga berfungsi untuk melindungi panel turbin angin dari arus berlebih, dimana kontakroe memutus aliran arus yang terbaca pada layar HMI jika arus yang mengalir melebihi batas arus yang telah disetting. Gambar 2 menunjukkan rangkaian hardware dari system monitoring pembangkit listrik tenaga angin yang dibuat dalam penelitian ini.



Gambar 2. Skema rangkaian hardware monitoring pembangkit listrik tenaga angin

Gambar 2 menunjukkan bahwa input digital PLC berupa *switch* utama untuk mengaktifkan system monitoring. Monitoring ini menggunakan empat pin input analog yang terdapat pada modul analog input, dua pin output digital, satu pin output digital untuk kontaktor dan satu pin input digital untuk *switch*, sedangkan input analog untuk modul analog berupa sinyal tegangan dan arus dari sensor. Untuk sensor tegangan DC DVV 100 akan menghasilkan sinyal analog berupa arus dengan rentang 4-20 mA, sedangkan sensor arus ACS712 akan menghasilkan sinyal analog berupa tegangan 0-5 Volt. Sensor kecepatan angin akan menghasilkan sinyal analog berupa 0-20 mA dan sensor kecepatan putaran akan menghasilkan sinyal analog berupa 0-5 Volt. Semua sinyal analog ini dapat diinputkan pada modul analog input PLC. Dalam penelitian ini menggunakan satu terminal output untuk kontaktor yang berfungsi untuk mengaktifkan rangkaian turbin angin. Gambar 2 menunjukkan bahwa rangkaian ini juga dilengkapi dengan power supply untuk PLC dan HMI sebesar 24 VDC dan untuk sensor tegangan, arus, kecepatan angin, kecepatan putaran 5 VDC.

Monitoring pembangkit listrik tenaga angin ini adalah system yang dapat diaktifkan melalui depan box panel PLC dan HMI. Setelah system aktif, maka rangkaian turbin angin dapat diaktifkan melalui tombol START turbin angin yang ada di layar HMI. Ketika tombol turbin angin sudah aktif, maka kontaktor akan terhubung pada rangkaian. Kontaktor juga berfungsi untuk melindungi turbin angin dari arus berlebih, dimana kontaktor ini akan memutuskan aliran arus dari turbin angin jika arus yang mengalir melebihi batas arus yang telah disetting sebelumnya. Prinsip kerja monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan HMI yang diusulkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada rangkaian iagram alir yang ditunjukkan oleh Gambar 3 berikut.

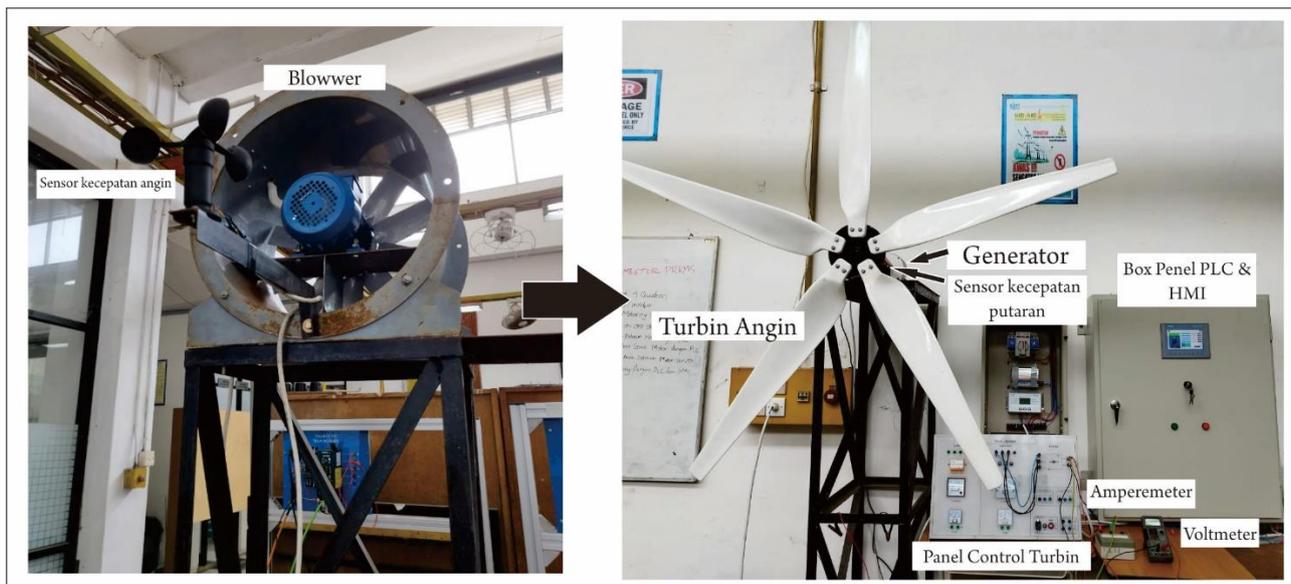


Gambar 3. Diagram alir monitoring pembangkit listrik tenaga angin

Gambar 3 menunjukkan bahwa rangkaian monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan HMI yang dimonitoring adalah sensor arus, sensor tegangan, sensor kecepatan angin,

sensor kecepatan putaran dan daya. Pada monitoring ini menggunakan switch utama yang berfungsi sebagai mengaktifkan system dan kontaktor sebagai pemutus arus berlebih yang telah disetting sebelumnya, dimana kontaktor ini terhubung dengan terminal digital output PLC.

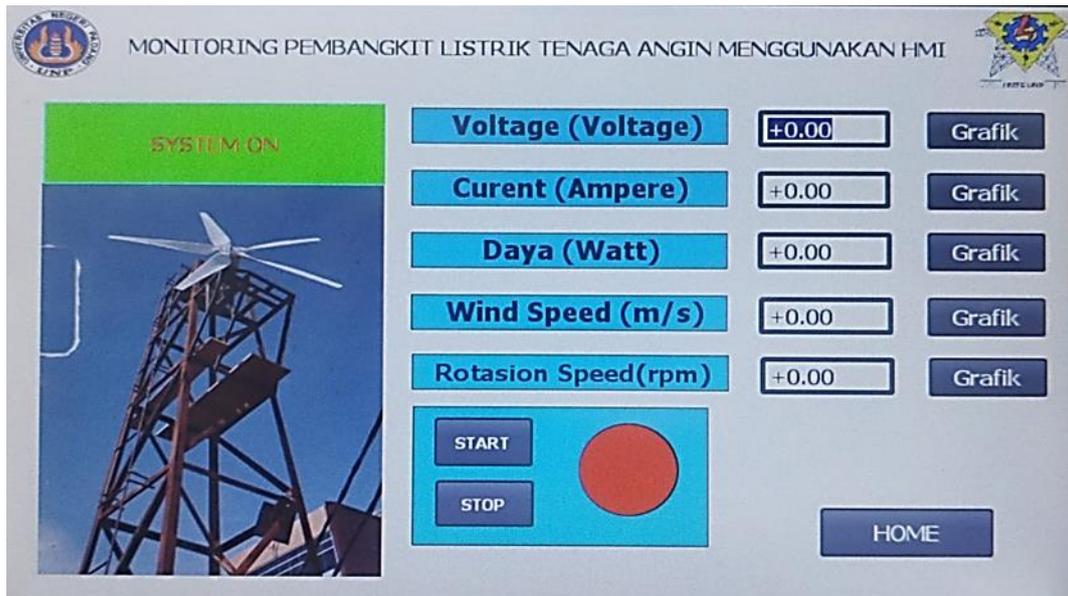
Komponen beserta PLC dan HMI ini ditempatkan dalam satu *box* panel 80 x 60 x 30 cm, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Pada bagian dalam *box* panel terdapat sensor tegangan, sensor arus, kontaktor, PLC dan power suplai. Pada bagian depan panel utama dipasang HMI dan switch utama. Sedangkan sensor kecepatan angin dan sensor kecepatan putaran terletak di luar panel utama yang mana sensor kecepatan angin terletak di depan blower dan sensor kecepatan putaran terletak di poros turbin angin. PLC dan HMI yang digunakan pada penelitian ini dihubungkan dengan kabel Profinet atau kabel LAN. PLC dan HMI yang diprogram menggunakan software TIA Portal V.17. gambar 4 menunjukkan tata letak komponen monitoring pembangkit listrik tenaga angin yang dibuat pada penelitian ini.



Gambar 4. Tata letak hardware

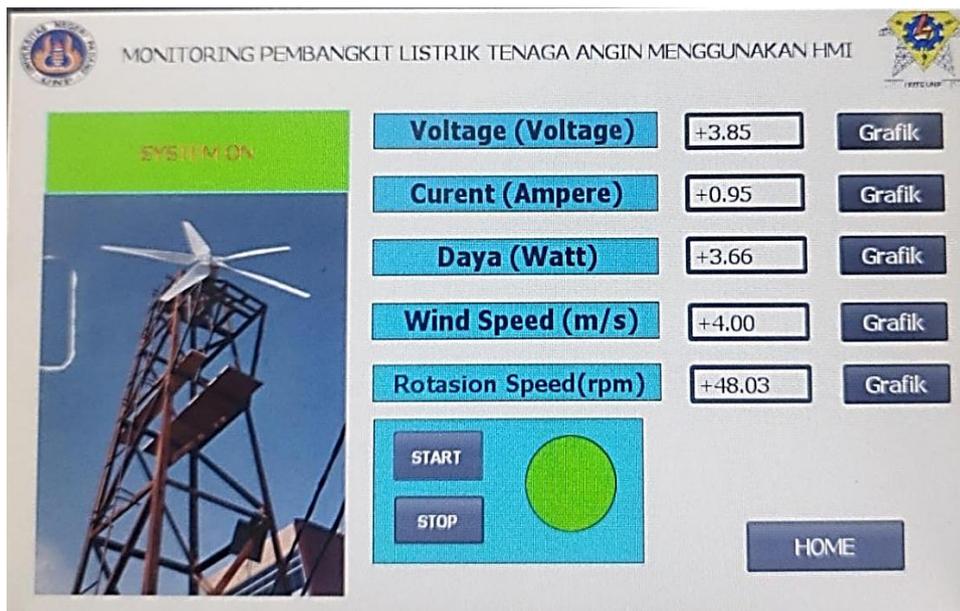
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian monitoring pembangkit listrik tenaga angin dilakukan dengan menggunakan turbin angin. Pengujian ini dilakukan di laboratorium Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang. Untuk melihat validitas data monitoring tersebut yang akan di tampilkan pada layar HMI, maka data monitoring yang ada pada layar HMI dibandingkan dengan data yang terbaca pada alat ukur. Terlihat pada Gambar 5 menunjukkan tampilan layar monitoring HMI, terdiri dari judul, indikator system utama, bagian monitoring arus, tegangan, daya, kecepatan angin dan kecepatan putaran. Indikator system utama menunjukkan apakah system utama telah aktif atau belum, dimana pengaktifan system utama dapat dilakukan melalui *switch* utama yang ditempatkan di depan panel utama. Monitoring pembangkit listrik tenaga angin dikatakan aktif ketika lampu indikator system utama berwarna hijau. Turbin angin yang sudah dirangkai dan terhubung pada PLC selanjutnya dilakukan validasi pada sensor arus, sensor tegangan, sensor kecepatan angin, dan sensor kecepatan putaran. Supaya pada saat data atau nilai yang ditampilkan pada layar HMI sudah sama dengan data yang terbaca pada alat ukur, sehingga tidak terjadinya error yang begitu besar pada program PLC dan HMI. Pada pengujian ini dilakukan dengan 2 kali dengan pengujian bervariasi dengan memvariasikan kecepatan anginnya menggunakan blower. Agar nantinya mendapatkan hasil yang lebih akurat.



Gambar 5. Halaman monitoring HMI

Pengujian dimulai dengan mengaktifkan sistem melalui *switch* utama yang terdapat di depan *box* panel HMI, sehingga pada layar monitoring HMI akan muncul indikator system ON. Pada layar monitoring di HMI terdapat tombol START dan STOP dimana tombol ini digunakan untuk mengaktifkan kontaktor agar tidak terjadinya arus berlebih, seperti yang telah disetting pada program HMI tersebut. Ketika system telah diaktifkan dan lampu indikatornya berwarna hijau seperti yang di tunjukkan pada Gambar 6. Rangkaian turbin angin akan aktif ketika system utama telah diaktifkan. Gambar 6 menunjukkan bahwa turbin angin beroperasi dengan tegangan 3,85 Volt, arus 0,95 Ampere, daya 3,66 Watt, kecepatan angin 4,0 m/s dan kecepatan putaran 48,03 rpm. Nilai yang terbaca pada layar monitoring sudah sesuai dengan nilai yang telah terbaca pada alat ukur. Data yang terbaca ini menunjukkan bahwa terjadinya sedikit error pada program PLC, sehingga data yang terbaca sudah benar.



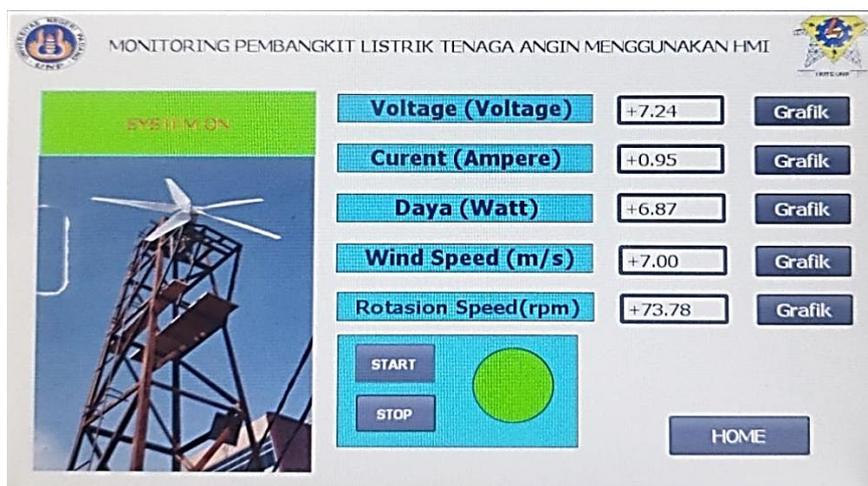
Gambar 6. Tampilan monitoring pengujian data 1 pada layar HMI

Untuk alat ukur nilai yang terbaca pada tegangan 3,9 Volt, arus 1,0 Ampere, kecepatan angin 4,1 m/s, kecepatan putaran 48 rpm. Pengujian data 1 nilai yang terbaca pada layar monitoring sudah mendekati sesuai dengan nilai yang terbaca pada alat ukur. Error yang dihasilkan mungkin disebabkan oleh dinamika mekanik yang terjadi pada saat pengukuran. Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai arus yang terbaca masih di bawah batas nilai arus yang telah disetting sebelumnya, sehingga proteksi arus tidak bekerja. Hal ini dapat dilihat dari indikator *over current* yang tidak muncul pada layar HMI. Hasil ini dapat disimpulkan bahwa data tegangan, arus, daya, kecepatan angin, dan kecepatan putaran yang ditampilkan di layar HMI sudah akurat untuk pembacaan monitoring secara *real time*.



Gambar 7. Pembacaan data 1 pada alat ukur. (a) voltmeter, (b) ampermeter, (c) anemometer, (d) digital rotary torque sensor

Gambar 8 menunjukkan layar HMI untuk monitoring pengujian data 2. Pada saat pengujian data 2 kecepatan angin dinaikan, sehingga terbaca pada layar monitoring HMI, tegangan 7,24 Volt, arus 0,95 Ampere, daya 6,87 Watt, kecepatan angin 7,0 m/s, dan kecepatan putaran 73,78 rpm. Error yang terjadi sangat kecil sehingga data yang terbaca pada layar monitoring sudah mendekati sama dengan data yang terbaca pada alat ukur. Pada pengujian data 2 ini tegangan, daya, kecepatan angin, dan kecepatan putaran nilainya naik, namun untuk arus nilainya konstan sama seperti nilai arus pada pengujian data 1. Disaat pengujian data 2 nilai arus tidak naik atau masih konstan maka indikator *over current* belum aktif dikarenakan nilai arus yang tidak melebihi batas arus yang telah disetting sebelumnya. Jika terjadinya *over current* dengan nilai yang melebihi batas arus yang telah disetting sebelumnya, maka tampilan pada layar HMI akan muncul indikator warna merah diatas tombol HOME pada halaman monitoring.

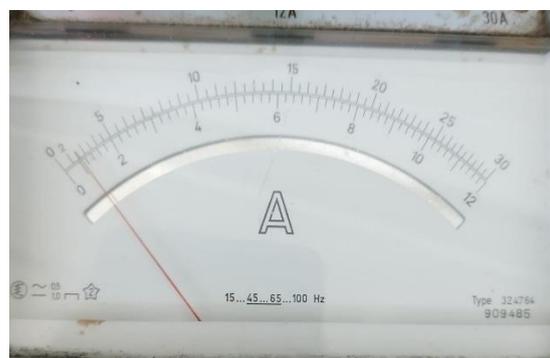


Gambar 8. Tampilan monitoring pengujian data 2 pada layar HMI

Pada pengujian data 2, nilai yang terbaca pada alat ukur, tegangan 7,2 Volt, arus 1,0 Ampere, kecepatan angin 7,1 m/s, dan kecepatan putaran 72 rpm. Nilai yang terbaca pada alat ukur dan juga nilai yang terbaca pada layar monitoring HMI menunjukkan bahwa tidak terjadinya error yang sangat signifikan, sehingga nilai yang terbaca pada layar monitoring dan alat ukur dapat mengukur secara akurat. Hasil ini menunjukkan bahwa program yang dibuat untuk menampilkan data tegangan, arus, daya, kecepatan angin, dan kecepatan putaran sudah sukses menampilkan data secara *real time*.



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 9. Pembacaan data 2 pada alat ukur. (a) voltmeter, (b) ampermeter, (c) anemometer, (d) digital rotary torque sensor

Semua hasil pengujian baik pada pengujian data 1, maupun pengujian data 2 yang telah dilakukan menunjukkan bahwa monitoring pembangkit listrik tenaga angin baik dari sensor tegangan, sensor arus, daya, sensor kecepatan angin, dan sensor kecepatan putaran sudah bekerja dengan baik, sesuai dengan apa yang telah direncanakan sebelumnya [21]-[22]. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa HMI telah berhasil menampilkan data-data dari parameter pembangkit listrik tenaga angin yang di monitoring secara *real time* dengan nilai yang telah sesuai dengan nilai yang terbaca pada alat ukur. Perbedaan data yang diperoleh dari pengukuran dengan data yang ditampilkan pada layar HMI masih dalam toleransi kesalahan, mungkin disebabkan oleh pengaruh eksternal pada saat pengujian.

KESIMPULAN

Monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan HMI diusulkan untuk menampilkan data yang terbaca pada sensor dan ditampilkan pada layar HMI. System yang diusulkan dirancang menggunakan PLC S7 1200 1215C DC/DC/Relay dengan HMI TP700 Basic. Pembangkit listrik tenaga angin ini dilengkapi dengan sensor arus, tegangan, kecepatan angin dan kecepatan putaran. Hasil pengujian menunjukkan bahwa monitoring pembangkit listrik tenaga angin menggunakan HMI yang dibuat dalam penelitian ini telah bekerja dengan baik dan HMI juga telah sukses menampilkan data-data parameter secara *real time* sesuai dengan nilai yang diperoleh pada alat ukur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Trisna Nur Robby, Mohamad Ramdhani, and Cahyantari Ekaputri, "Alat Ukur Kecepatan Angin, Arah Angin dan Ketinggian," *e-Proceeding Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 1457–1466, 2017.
- [2] B. Taghezouit, F. Harrou, Y. Sun, A. H. Arab, and C. Larbes, "Multivariate statistical monitoring of photovoltaic plant operation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 205, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112317.
- [3] N. M. Martins Da Rocha, L. Lapolli Brighenti, J. Cesar Passos, and D. Cruz Martins, "Photovoltaic Cell Cooling as a Facilitator for MPPT," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 10, pp. 1569–1577, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8986434.
- [4] H. D. Tafti, C. D. Townsend, G. Konstantinou, and J. Pou, "A Multi-Mode Flexible Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Plants," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 6, pp. 5038–5042, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2883320.
- [5] D. Kalyanraj, S. L. Prakash, and S. Sabareswar, "Wind turbine monitoring and control systems using Internet of Things," *Int. Conf. 21st Century Energy Needs - Mater. Syst. Appl. ICTFCEN 2016*, 2017, doi: 10.1109/ICTFCEN.2016.8052714.
- [6] L. Yang and Z. Zhang, "Wind Turbine Gearbox Failure Detection Based on SCADA Data: A Deep Learning-Based Approach," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 70, 2021, doi: 10.1109/TIM.2020.3045800.
- [7] H. Chen, C. Xie, J. Dai, E. Cen, and J. Li, "Scada data-based working condition classification for condition assessment of wind turbine main transmission system," *Energies*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/en14217043.
- [8] J. Park, C. Kim, M. C. Dinh, and M. Park, "Design of a Condition Monitoring System for Wind Turbines," *Energies*, vol. 15, no. 2, pp. 1–16, 2022, doi: 10.3390/en15020464.
- [9] A. Stetco *et al.*, "Machine learning methods for wind turbine condition monitoring: A review," *Renew. Energy*, vol. 133, pp. 620–635, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.10.047.
- [10] P. Qian, D. Zhang, X. Tian, Y. Si, and L. Li, "A novel wind turbine condition monitoring method based on cloud computing," *Renew. Energy*, vol. 135, pp. 390–398, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.12.045.
- [11] Z. Li, "Optimization of Computer Communication Monitoring System for Wind Turbine Speed," *J. Robot.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/3776440.
- [12] E. Gonzalez, B. Stephen, D. Infield, and J. J. Melero, "Using high-frequency SCADA data for wind turbine performance monitoring: A sensitivity study," *Renew. Energy*, vol. 131, pp. 841–853, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.07.068.
- [13] N. Damanik, M. R. Robiansyah, A. Apriliana, and S. Purba, "Design of Energy Monitoring System for Small Scale Wind Turbine Applications," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 345, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/345/1/012003.
- [14] M. H. Do and D. Söffker, "Wind turbine lifetime control using structural health monitoring and prognosis," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 12669–12674, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1847.

-
- [15] X. Jin, Z. Xu, and W. Qiao, "Condition monitoring of wind turbine generators using SCADA data analysis," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 12, no. 1, pp. 202–210, 2021, doi: 10.1109/TSTE.2020.2989220.
- [16] M. Yuhendri, M. Ashari, and M. H. Purnomo, "Adaptive Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control for grid-connected wind turbine generator using Very Sparse Matrix Converter," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 5, no. 3, pp. 668–676, 2015, doi: 10.20508/ijrer.v5i3.2288.g6624.
- [17] M. Yuhendri, M. Muskhir, Taali, and Ahyanuardi, "Implementation of Three Phase Axial Flux Disc Permanent Magnet Generator for Low-Speed Horizontal Axis Wind Turbine," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 11, no. 4, pp. 1388–1394, 2021, doi: 10.18517/ijaseit.11.4.10776.
- [18] O. Derek, E. K. Allo, and N. M. Tulung, "Rancang Bangun Alat Monitoring Kecepatan Angin Dengan Koneksi Wireless Menggunakan Arduino Uno," *E-Journal Tek. Elektro Dan Komput.*, vol. 5, no. 4, pp. 1–7, 2016.
- [19] M. Yuhendri, M. Muskhir, and Taali, "A novel optimum tip speed ratio control of low speed wind turbine generator based on type-2 fuzzy system," *Bull. Electr. Eng. Informatics*, vol. 8, no. 4, pp. 1189–1197, 2019, doi: 10.11591/eei.v8i4.1450.
- [20] Z. Kong, B. Tang, L. Deng, W. Liu, and Y. Han, "Condition monitoring of wind turbines based on spatio-temporal fusion of SCADA data by convolutional neural networks and gated recurrent units," *Renew. Energy*, vol. 146, pp. 760–768, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.033.
- [21] N. Gusriani and M. Yuhendri, "Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Arduino Berbasis GUI Matlab," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 1, no. 2, pp. 229–233, 2020, doi: 10.24036/jtein.v1i2.76.
- [22] R. Y. Pratama and M. Yuhendri, "Monitoring Turbin Angin Menggunakan Smartphone Android," *JTEV (Jurnal Tek. Elektro dan Vokasional)*, vol. 6, no. 2, p. 64, 2020, doi: 10.24036/jtev.v6i2.108517.
- [23] E. Mustafa, M. Yuhendri, J. Sardi, and D. T. Yanto, "Kendali dan Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Surya Stand Alone Berbasis Human Machine Interface," vol. 4, no. 1, pp. 179–189, 2023.
- [24] I. Rifaldo and M. Yuhendri, "Sistem Monitoring Kecepatan Motor Induksi dengan HMI Berbasis PLC," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 3, no. 2, pp. 319–325, 2022.
- [25] F. Azizah and M. Yuhendri, "Solar Panel Monitoring and Control System Using Human Machine Interface," *Andalasian Int. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 03, pp. 149–158, 2022, doi: 10.25077/aijaset.v2i03.64.
- [26] T. A. Ardiansyah and R. Risfendra, "Rancangan Sistem Mounting Device Berbasis PLC Menggunakan HMI," *JTEIN J. Tek. Elektro Indones.*, vol. 1, no. 2, pp. 49–54, 2020, doi: 10.24036/jtein.v1i2.16.