

# PEMODELAN SISTEM TURBIN ANGIN BERBASIS *BOND-GRAPH*

Nopi Hariadi <sup>1</sup>, Sugiarto <sup>2</sup>, Suyanta <sup>3</sup>

Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Email : [nopihariadi276@gmail.com](mailto:nopihariadi276@gmail.com)

## Abstrak

Pemerintah Indonesia kini sedang berupaya beralih ke energi terbarukan, seperti PLTS dan PLTB, untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil, mengurangi dampak lingkungan, dan meningkatkan keberlanjutan energi nasional. Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menjadi kunci dengan pembuatan model yang berperan dalam menanggapi dinamika dan kompleksitas permasalahan energi. Pemodelan sistem PLTB adalah proses penyederhanaan elemen kompleks untuk memudahkan pemahaman informasi yang dibutuhkan. Pemilihan model fisik dalam pemodelan PLTB memungkinkan desain sistem yang lebih sederhana tetapi tetap mencerminkan kompleksitasnya, dengan prinsip-prinsip fisika sebagai dasar penyederhanaan. Penelitian ini bertujuan memodelkan sistem turbin angin berbasis Bond-graph untuk memahami hubungan energi pada kecepatan Hub, kecepatan gearbox, dan kecepatan rotor generator. Metode yang digunakan adalah pemodelan berbasis Bond-graph dengan perangkat lunak 20 SIM 5.0. Hasil penelitian menunjukkan grafik simulasi model Bond-graph turbin angin memperlihatkan hubungan antara kecepatan angin dan efisiensi turbin. Kecepatan putaran rotor dan torsi rotor meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan angin, menunjukkan turbin angin menghasilkan lebih banyak energi pada kecepatan angin tinggi. Secara keseluruhan, pemodelan dengan 20 SIM 5.0 menunjukkan kecepatan hub, kecepatan gearbox, dan kecepatan rotor generator saling terkait. Kecepatan hub dan gearbox meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan angin, sementara kecepatan rotor generator meningkat sejalan dengan peningkatan kecepatan hub dan gearbox.

**Kata Kunci:** Pemodelan, turbin angin, Bond-graph, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)

## Abstract

The Indonesian government is currently striving to transition to renewable energy sources, such as solar and wind power plants, to reduce dependence on fossil fuels, mitigate environmental impacts, and enhance national energy sustainability. Designing Wind Power Plants (WPPs) is crucial, with modeling playing a key role in addressing the dynamics and complexities of energy issues. System modeling for Wind Power Plants (WPPs) involves simplifying complex elements to facilitate understanding. Using physical models allows for simpler system designs that still represent complexity, with physics principles guiding simplification. This study aims to model a wind turbine system based on Bond-graph to understand the energy relationships in Hub speed, gearbox speed, and rotor generator speed. The Bond-graph-based modeling method was employed using 20 SIM 5.0 software. Results show the Bond-graph wind turbine model's simulation graph displaying the relationship between wind speed and turbine efficiency. The rotor speed and rotor torque increase with wind speed, indicating higher wind speeds lead to more energy production. In conclusion, 20 SIM 5.0 modeling demonstrates the interrelation of hub speed, gearbox speed, and rotor generator speed. Hub and gearbox speeds increase with wind speed, while rotor generator speed rises with hub and gearbox speed increases.

**Keywords:** Modeling, wind turbine, Bond graph, Wind Power Plant

## 1. PENDAHULUAN

Listrik di Indonesia saat ini sebagian besar masih bergantung pada energi fosil, terutama dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Namun, metode ini memiliki sejumlah kelemahan, salah satunya terkait dampak lingkungan seperti emisi karbon dan ketersediaan bahan bakunya yang semakin terbatas seiring berjalannya waktu. Untuk mengatasi tantangan tersebut, pemerintah Indonesia mulai beralih ke sumber energi terbarukan. Di antara opsi yang dipertimbangkan adalah pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Perkembangan dalam penerapan energi terbarukan ini menjadi langkah strategis dalam mendukung keberlanjutan dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam perspektif masa depan, terdapat kebijakan yang mengarahkan pengurangan penggunaan batu bara dalam PLTU, dengan fokus beralih ke energi terbarukan, terimplementasi mulai tahun 2035. Oleh karena itu, perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menjadi langkah krusial, di mana pembuatan model menjadi aspek yang sangat penting dalam merespon dinamika dan kompleksitas permasalahan yang dihadapi.

Pemodelan sistem merupakan proses suatu bentuk penyederhanaan dari elemen dan komponen yang kompleks, bertujuan mempermudah pemahaman terhadap informasi yang diperlukan. Dalam konteks Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), pemodelan ini berfungsi sebagai proses pembentukan sistem yang sederhana, dengan tetap mempertimbangkan kompleksitasnya. Terdapat dua pendekatan umum dalam melakukan pemodelan, di mana salah satunya adalah dengan penyederhanaan bentuk fisik. Jika berhubungan dengan PLTB, penyederhanaan fisik dilakukan dengan menggunakan prinsip-prinsip fisika (model fisik) untuk merancang suatu model yang dapat merepresentasikan sistem PLTB dengan cara yang lebih mudah dimengerti. Oleh karena itu, desain PLTB melibatkan pembuatan model penyederhanaan fisik yang mencerminkan sifat fisik dari sistem tersebut.

## 2. METODE PENELITIAN

Bond-Graph adalah sebuah metode pemodelan sistem yang ditemukan oleh Prof. Henry Paynter dari MIT pada tahun 1959. Paynter, yang memiliki pengalaman luas di bidang sistem engineering, meyakini bahwa energi dan daya adalah hal yang mendasari semua interaksi dan perpindahan fisik dalam suatu sistem (Gawthrop & Bevan, 2007). Effort dan flow adalah dua variabel dasar dalam bond-graph. Effort sering dianalogikan dengan tekanan atau tegangan, sedangkan flow sering dianalogikan dengan aliran massa atau aliran energi. Variabel-variabel ini dapat mewakili berbagai jenis energi, seperti energi mekanis, energi listrik, dan energi thermal. Effort dan flow dapat digunakan untuk menganalisis berbagai aspek sistem, seperti kinerja, efisiensi, dan stabilitas (Lennart Ljung, 1998).

Variabel daya dalam *Bond-graph* adalah suatu variabel yang mewakili laju aliran energi pada sistem. Variabel ini didefinisikan sebagai hasil perkalian antara variabel *effort* dan variabel *flow* sebagaimana pada persamaan dibawah.

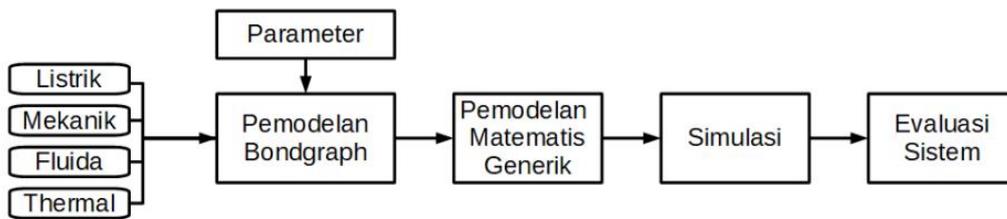
$$P(t) = e(t) \cdot f(t)$$

Berikut merupakan tabel variabel daya yang dihasilkan dari perkalian *effort* dan *flow* :

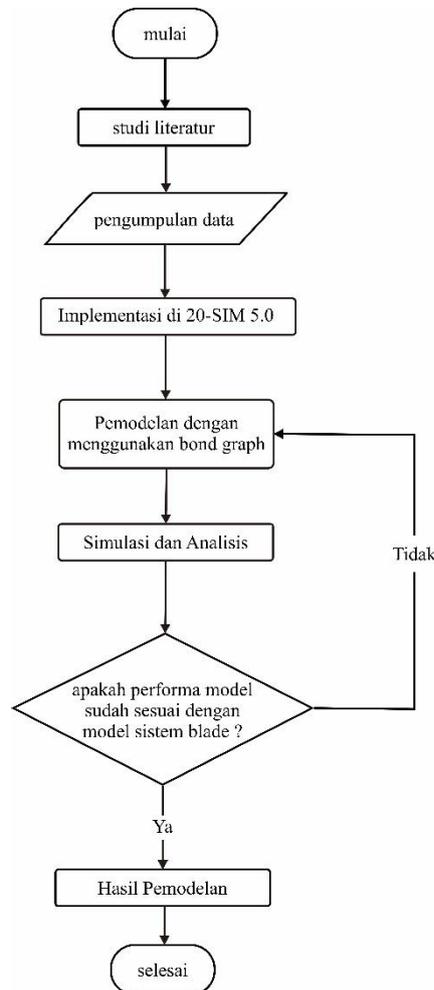
Tabel 1. Variabel Daya (*effort.flow*)

Domain	<b>Effort</b> $e(t)$ satuan	<b>Flow</b> $f(t)$ satuan
Listrik	Tegangan $\mu$ (V)	Arus $i$ (A)
Mekanika Rotasi	Torsi $\tau$ (N.m)	Kecepatan sudut $\omega$ (Rad/s)
Mekanika Translasi	Gaya (N)	Kecepatan $v$ (m/s)
Hidrolika	Tekanan (Pa)	Laju aliran volume ( $m^3/s$ )
Termodinamik	Suhu (K)	Aliran Entropi (J/K.s)
Transformasi Kimia	Potensial Kimia (j/mol)	Laju aliran molar (mol/s)
Kinetika Kimia	Afnitas Kimia (j/mol)	Kecepatan Reaksi (mol/s)

Prosedur pemodelan dengan *bond-graph* dapat dilihat dengan detail pada diagram dibawah



Gambar 1. Prosedur Pemodelan Metode *Bond-graph*

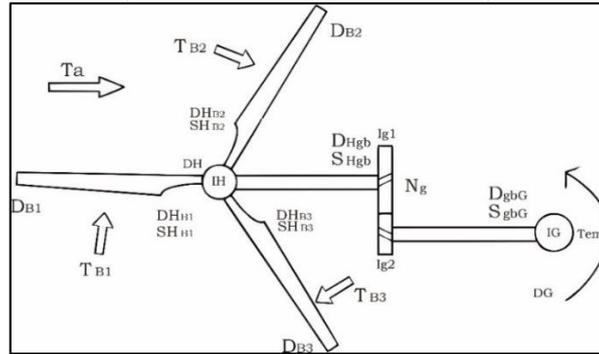


Gambar 2. Prosedur Penelitian

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian skripsi ini bertujuan untuk memodelkan turbin angin yang menggunakan *Bond-graph* sebagai metode pemodelannya. Setelah mengetahui bentuk atau gambaran dari turbin angin, maka selanjutnya penulis melakukan analisa terkait energi apa saja yang terlibat atau yang mempengaruhi turbin angin sehingga mampu menghasilkan listrik. Gambar 4.1 menampilkan gambar turbin angin. Turbin angin ini melibatkan enam inersia yang terdiri dari tiga bilah, rotor/hub, *gearbox*, dan generator induksi. Input atau masukan yang diperlukan pada sistem adalah kecepatan angin dan torsi elektromagnetik. Untuk mendapatkan persamaan dinamis untuk model turbin angin

ini jika menggunakan Hukum Newton yang kedua maka akan menjadi sangat sulit, dan beberapa kesalahan dapat dengan mudah terjadi. Desain Analis Turbin Angin



Gambar 3. Desain Analisa Turbin Angin

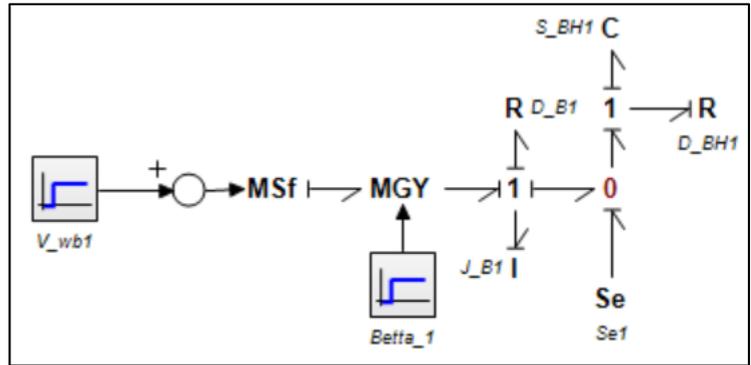
Tabel 2. Singkatan sehubungan dengan Gambar 3

Singkatan	Informasi
$T_a$	Torsi Aerodinamik
$T_{B1}, T_{B2}, T_{B3}$	Torsi Blade dari angin
$D_{B1}, D_{B2}, D_{B3}$	Damping Blade
$D_{HB1}, D_{HB2}, D_{HB3}$	Damping antara Hub dan Blade
$S_{HB1}, S_{HB2}, S_{HB3}$	Stifness anatara Hub dan Blade
$DH$	Damping Hub
$IH$	Inersia Hub
$DH_{gb}$	Damping antara Hub dan Gearbox
$S_{Hgb}$	Stifness antara Hub dan Gearbox
$I_{g1}$	Inersia Roda Gigi 1
$I_{g2}$	Inersia Roda Gigi 2
$N_g$	Rasio Gearbox
$D_{gbG}$	Damping antara gearbox dan Generator
$S_{gbG}$	Stifness antara gearbox dan Generator
$IG$	Inersia Generator
$DG$	Damping Generator
$Tem$	Torsi Elektro Magnet

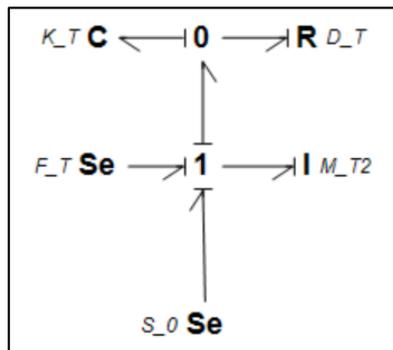
Selanjutnya setelah mengetahui input utama yang memengaruhi perilaku sistem turbin angin ini, maka berikut merupakan parameter yang digunakan untuk memodelkannya menggunakan *Bond-graph* tersaji pada Tabel 3 dibawah

Tabel 3 Parameter Turbin Angin

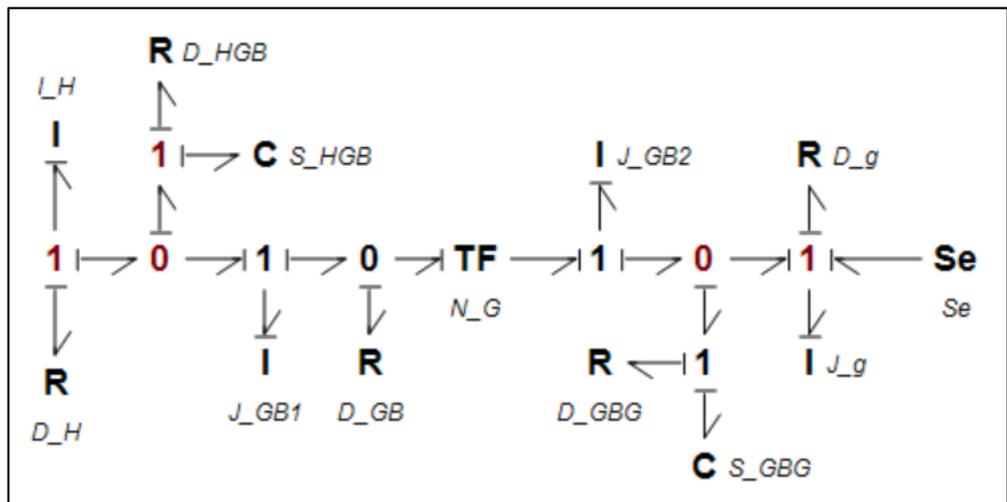
Blade		
Natural Frequency	0.88	Rad/s
Damping Ratio	0.9	-
Gearbox		
Inersia Hub	5.9154	Kg.m <sup>2</sup>
Inersia Generator	500	Kg.m <sup>2</sup>
Stifness Hub & Gearbox	8.7354	Kg.m <sup>2</sup>
Damping Hub & Gearbox	8.3748	Kg.m <sup>2</sup>
Rasio Gearbox	97	-
Tower		
Tower Stifness	1.6547	N/m
Tower Damping	2.0213	N/m.s



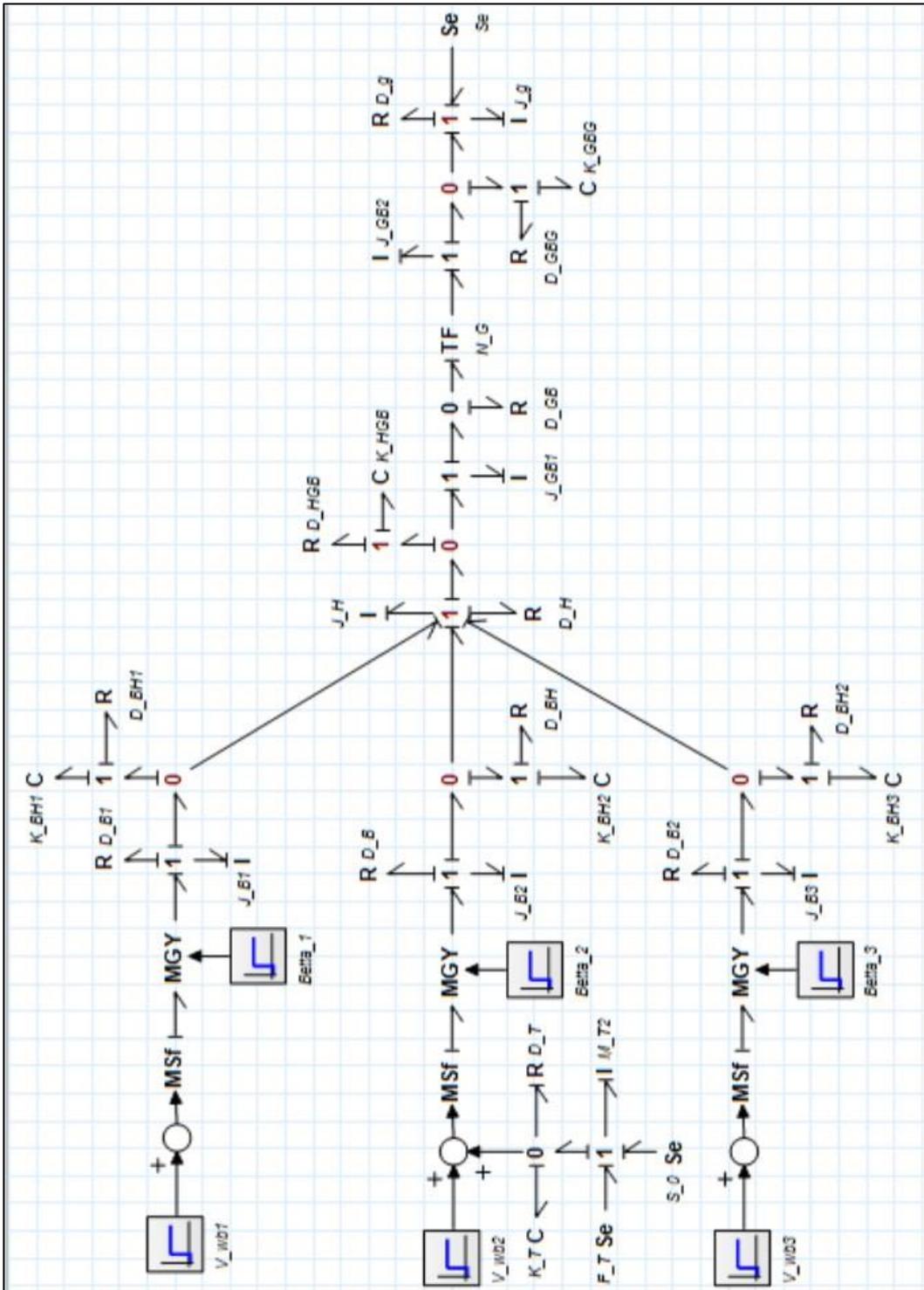
Gambar 4. Representasi blade dalam bentuk *Bond-graph*



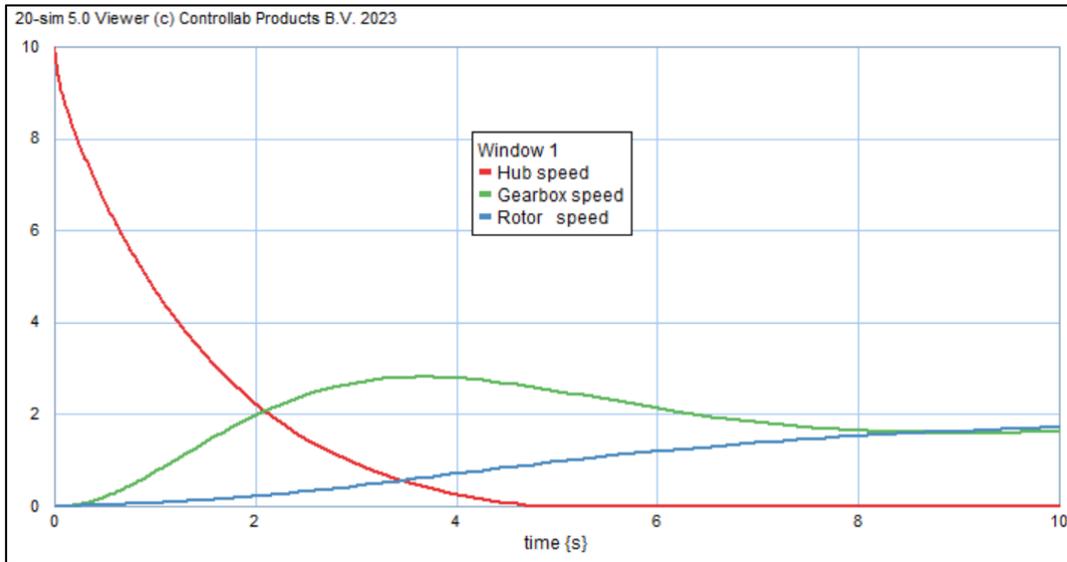
Gambar 5. Representasi Gerakan Menara dalam bentuk *Bond-graph*



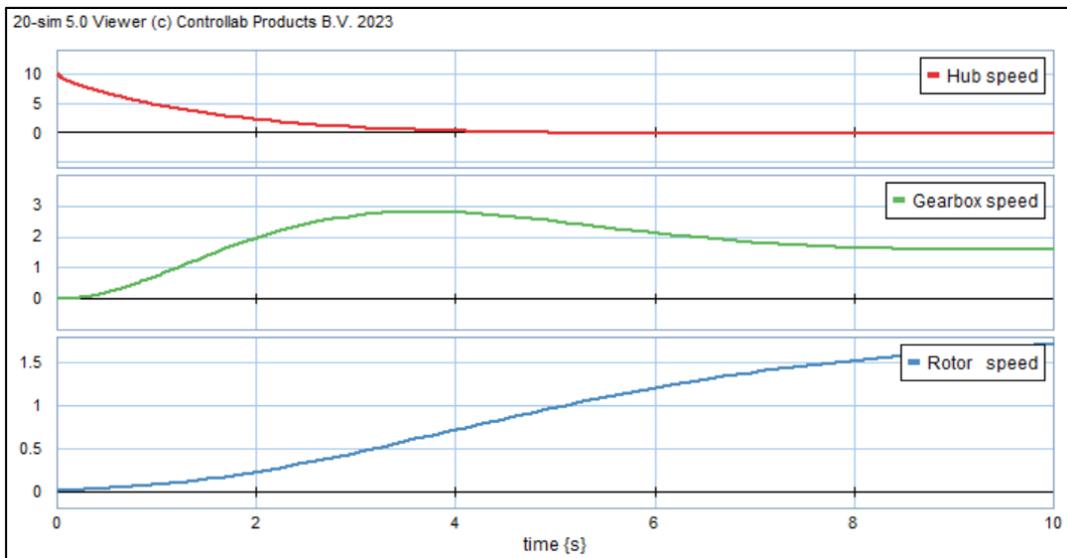
Gambar 6. Representasi model Gearbox dalam bentuk *Bond-graph*



Gambar 7. Representasi Turbin Angin dalam bentuk *bond-graph*



Gambar 8. Grafik Simulasi dengan 20-SIM 5.0 Simulator Parameter 10



Gambar 9. Grafik simulasi dengan 20-SIM 5.0 Simulator

Grafik yang ditampilkan menunjukkan hasil simulasi dari model *bond graph* turbin angin. Grafik ini menunjukkan hubungan antara beberapa variabel penting dalam sistem turbin angin yang dibuat. Grafik pada gambar 8 menunjukkan hubungan antara kecepatan angin dan efisiensi turbin angin. Efisiensi didefinisikan sebagai rasio antara daya yang dihasilkan turbin angin dan daya yang tersedia pada angin. Pada Gambar 8 grafik ini menunjukkan bahwa kecepatan putaran rotor dan torsi rotor meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan angin. Hal ini menunjukkan bahwa turbin angin dapat menghasilkan lebih banyak energi ketika kecepatan angin lebih tinggi.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

**Kesimpulan** yang dapat diambil dari hasil pemodelan dan simulasi turbin angin berbasis *bond-graph* ini adalah sebagai berikut :

1. Pemodelan yang dilakukan dengan menggunakan software 20 SIM 5.0 mendapatkan hasil simulasi menunjukkan bahwa Kecepatan hub, kecepatan gearbox, dan kecepatan rotor generator saling terkait.
2. Kecepatan hub dan gearbox meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan angin, sementara kecepatan rotor generator meningkat sejalan dengan pertambahan kecepatan hub dan gearbox.
3. Hubungan antara kecepatan hub, kecepatan gearbox, dan kecepatan rotor generator dapat dimodelkan dengan menggunakan Bond-graph.

**Saran** yang dapat diambil dari hasil pemodelan dan simulasi turbin angin berbasis bond-graph ini adalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan Menganalisis pengaruh parameter lain pada kinerja turbin angin, seperti diameter rotor, pitch blade, dan jenis generator.
2. Penelitian ini juga dapat dilanjutkan dengan Mengembangkan model kontrol untuk turbin angin.

## 5. DAFTAR ISI

- Adam, M., Harahap, P., & Nasution, M. R. (2019). Analisa Pengaruh Perubahan Kecepatan Angin Pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTA) Terhadap Daya Yang Dihasilkan Generator Dc. RELE (Rekayasa Elektrikal Dan Energi): Jurnal Teknik Elektro, 2(1), 30–36. <https://doi.org/10.30596/rele.v2i1.3648>
- Arfan Almukaddas. (2015). Makalah Interaksi Manusia dan Komputer Umpan Balik ( Feedback ). 10. <https://fdokumen.com/document/feedback-566095012a130.html>
- Bakka, T., & Karimi, H. R. (2013). Bond graph modeling and simulation of wind turbine systems. Journal of Mechanical Science and Technology, 27(6), 1843–1852. <https://doi.org/10.1007/s12206-013-0435-x>
- Comte, E., El Hami, A., & El Moudni, A. (1997). Modelling of Electrical Machines and Progressive Wave Piezoelectric Motor by Bond Graph Part 1: Bond Graph Model. IFAC Proceedings Volumes, 30(6), 297–301. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)43380-5](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)43380-5)
- Garcia, A. P., Gonzalez-Avalos, G., Ayala-Jaimes, G., Gallegos, N. B., Mendez-B., J., & Alvarado-Zamora, D. (2022). Tracking Control of Physical Systems with Application to a System with a DC Motor: A Bond Graph Approach. Symmetry, 14(4), 1–40. <https://doi.org/10.3390/sym14040755>
- Gawthrop, P. J., & Bevan, G. P. (2007). A tutorial introduction for control engineers. IEEE Control Systems, 27(2), 24–45. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.338279>
- He, F., Wang, J., Yu, W., & Zhong, G. (2023). Fault Diagnosis of the Three-phase Asynchronous Motor Bond Graph Model Based on Bond Graph and Temporal Causal Graph. Journal of Physics: Conference Series, 2428(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2428/1/012017>
- Lennart Ljung. (1998). Dynamic simulation of electric machinery: using MATLAB/SIMULINK (Vol. 5).
- Pusat Data Ekonomi dan Bisnis Indonesia. (2023). Skenario JETP: Pensiun Dini PLTU Batu Bara Mulai 2035. <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2023/11/07/skenario-jetp-pensiun-dini-pltu-batu-bara-mulai-2035>
- Rahmat, M. H. (2017). Potensi Pengembangan PLTB di Indonesia. Sekretariat Kabinet Republik Indonesia.
- Saputra, M. (2016). Kajian Literatur Sudu Turbin Angin Untuk Skala Kecepatan Angin Rendah. Jurnal Mekanova, 2(1), 74–83.
- Yulianto, N. H., Siregar, P. I., & Leksono, E. (2015). Studi Pemodelan Bond Graph dan Perancangan Pengontrol Proportional + Integral untuk Level Boiler dan Temperatur Penukar Kalor pada Sistem Miniplant. Jurnal Otomasi Kontrol Dan Instrumentasi, 7(1), 53. <https://doi.org/10.5614/joki.2015.7.1.6>