

Turbin Angin Poros Horizontal Tipe *Flat* Sudu Banyak Taper 4:5 dan Sudut Keluaran 25°

Sahid*, Mulyono, Totok Prasetyo, Dwiana Hendrawati, Yanuar Mahfud Safarudin dan Moh. Fani Alyasa

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof. H. Sudarto, S.H., Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

*Email : sahid.polines@gmail.com

Diterima: 19-11-2021; Direvisi: 07-12-2021; Dipublikasi: 30-04-2022

Abstrak

Penelitian ini bertujuan melakukan kajian terhadap kinerja turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak, dimana sudu yang digunakan merupakan penggabungan model taper 4:5 yang dikembangkan Herlambang et al [1] dan model sudu dengan sudut keluaran 25° yang dikembangkan Sahid et al [2]. Penelitian diawali dengan membuat 3 model sudu kemudian dipasang pada sistem uji kinerja pembangkit, langkah selanjutnya adalah melakukan uji karakteristik efisiensi terhadap putaran. Hasil uji ketiga model dikaji dengan membandingkan efisiensi masing-masing model. Hasil menunjukkan bahwa Turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak taper 4:5 dan sudut keluaran 25° menghasilkan Efisiensi pada kecepatan 5 m/s dan 7 m/s, yaitu sebesar 4,253 % dan 1,947 %. Terjadi peningkatan dari model sudu taper 4:5 pada kecepatan 5 m/s dan 7 m/s yaitu masing-masing sebesar 75,38 % dan 91,13 %. Peningkatan efisiensi dari model sudu sudut keluaran 25° pada kecepatan 5 m/s dan 7 m/s sebesar 151,63 % dan 68,26 %. Pada kecepatan 9 m/s model sudu sudut keluaran 25° memiliki efisiensi tertinggi, yaitu sebesar 1,087 % sehingga model sudu taper 4:5 mengalami penurunan efisiensi sebesar 7,37 %. Oleh karena itu turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak taper 4:5 dan sudut keluaran 25° adalah model sudu yang paling cocok digunakan pada kecepatan angin ≤ 7 m/s. Model model sudu sudut keluaran 25° cocok digunakan pada kecepatan 9 m/s.

Kata kunci: *flat* sudu banyak; sudut keluaran; taper; turbin angin poros horizontal

Abstract

This research aims to study the performance of a multi-blade flat horizontal axis wind turbine, where the blades used are a combination of the 4.5 taper model developed by Herlambang et al [1] and the blade model with an output angle of 25° developed by Sahid et al [2]. The research begins with making 3 models of blades then installed on the generator performance test system, the next step is to test the efficiency characteristics of the rotation. The test results of the three models were reviewed by comparing the efficiency of each model. The results show that the horizontal axis wind turbine with 4:5 taper flat type and 25° output angle produces efficiency at speeds of 5 m/s and 7 m/s, which are 4.253 % and 1.947%. There was an increase from the 4:5 taper blade model at speeds of 5 m/s and 7 m/s, which were 75.38% and 91.13%, respectively. And the increase in efficiency from the 25° output angle blade model at speeds of 5 m/s and 7 m/s is 151.63% and 68.26%, respectively. At a speed of 9 m/s the 25° output angle blade model has the highest efficiency, which is 1.087% so that the 4:5 taper blade model has an efficiency decrease of 7.37%. Therefore, the horizontal axis wind turbine with 4:5 taper flat type and 25° output angle is the most suitable blade model for wind speed 7 m/s. The 25° output angle blade model is suitable for use at a speed of 9 m/s.

Keywords: *multiple flat-blade; output angle; taper; horizontal axis wind turbine*

1. Pendahuluan

Pada masa yang akan datang kebutuhan akan energi di Indonesia meningkat hampir dua kali lipat konsumsi listrik nasional pada tahun 2014, yaitu sebesar 221,296 GWh [3]. Untuk mencapai rasio elektrifikasi mendekati 100% selain perlu adanya peningkatan, akses rumah tangga yang mendapat listrik perlu ditambah. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut dapat dilakukan dengan memanfaatkan cadangan sumberdaya energi tak terbarukan seperti cadangan batubara, minyak bumi, dan gas alam yang dimiliki negara. Cara lain adalah dengan memanfaatkan potensi sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan seperti energi angin [3].

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050. Target kapasitas PLT-Angin (Pembangkit

Listrik Tenaga Angin) pada tahun 2025 yakni 255 MW. Sementara hingga tahun 2020 PLT-Angin baru terpasang sekitar 135 MW dengan perincian 75 MW di daerah Sidrap dan sebesar 60 MW di daerah Janeponto. Dengan demikian pengembangan energi angin di Indonesia masih menjadi tantangan nasional [4].

Pemanfaatan potensi energi angin pada bidang pembangkit listrik di Indonesia baik untuk keperluan masyarakat maupun untuk tujuan penelitian yang bersifat sporadis masih berskala sangat kecil. Kurangnya pengetahuan tentang perkembangan teknologi turbin angin yang terus berkembang dan informasi wilayah yang berpotensi angin tinggi merupakan beberapa penyebabnya [5].

Turbin angin merupakan salah satu alat yang digunakan sebagai penggerak mula pembangkitan tenaga listrik yang memanfaatkan tenaga angin. Salah satu tipe turbin angin adalah turbin angin poros horizontal. Kelebihan dari turbin angin poros horizontal yaitu memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan turbin angin poros vertikal karena sudu selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin dan menerima daya sepanjang putaran. Turbin angin poros horizontal yang cocok untuk kecepatan angin rendah (<5 m/s) adalah tipe *flat* sudu banyak. Sudu turbin ini memiliki penampang *flat*, sehingga tidak ada perbedaan tekanan pada sisi depan dan belakang sudu. Gaya yang didapatkan untuk menggerakkan sudu di peroleh dari geseran angin terhadap permukaan sudu. Karena potensi angin di Indonesia yang masih besar adalah angin dengan kecepatan rendah, maka usaha untuk meningkatkan tipe turbin ini sangat diperlukan [6].

Herlambang et al [1] membuat turbin angin sumbu horizontal 9 sudu *flat* dengan variasi sudut sudu, menguji secara eksperimental kinerja turbin angin sudu 9 *flat* dengan berbagai macam variasi sudut sudu dan kecepatan angin, mengkaji karakteristik kerja turbin sumbu horizontal sudu 9 *flat* dengan sudut sudu dan lebar sudu *top* dan *bottom* menghasilkan pada sudu turbin dengan rasio lebar sudu 4:5 dan sudut sudu 30° dengan kecepatan angin bebas 5 m/s memiliki nilai η_s sebesar 9,67%, sudu turbin dengan rasio lebar sudu 3:5 dan sudut sudu 23° dengan kecepatan angin bebas 7 m/s memiliki nilai η_s sebesar 7,42%, dan sudu turbin dengan rasio lebar sudu 2:5 dan sudut sudu 18° dengan kecepatan angin bebas 9 m/s memiliki nilai η_s yang lebih tinggi yaitu 5,80% [1].

Sahid et al [2] mengkaji kinerja turbin angin poros horizontal tipe *flat* tunggal sudu banyak (*single multiflat blade*) dimana pada sisi keluar sudu diberikan perlakuan perubahan sudut. Peningkatan efisiensi pada kecepatan angin 7m/s dan 5 m/s masing-masing sebesar 45,58% sebesar 90,50%. Sudut keluaran sudu optimal 25° sangat cocok diterapkan untuk potensi angin dengan kecepatan ≤ 7 m/s [2]. Hasil signifikan ini menunjukkan sudu dengan perlakuan sudut sisi keluar sangat cocok untuk potensi angin ≤ 7 m/s. Desain sudu yang digunakan pada penelitian ini memiliki lebar sudu sama pada bagian *top* dan *bottom*. Mengacu hasil penelitian Herlambang [1], perlunya penerapan desain sudu turbin dengan rasio lebar sudu 4:5 pada sudu dengan perlakuan sudut sisi keluar ini.

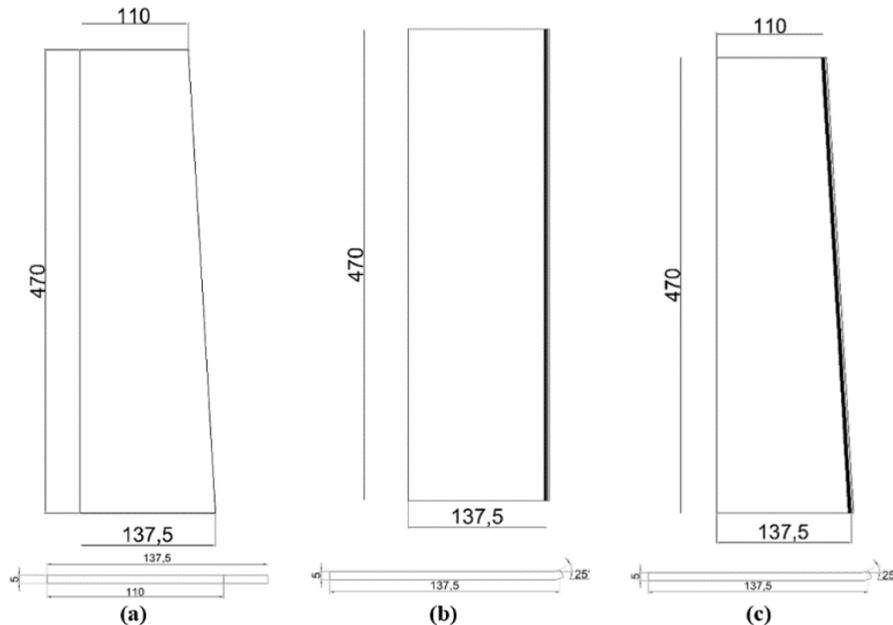
Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan kajian terhadap kinerja turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak, dimana sudu yang digunakan merupakan penggabungan model taper 4:5 yang dikembangkan Herlambang et al [1] dan model sudu dengan sudut keluaran 25° yang dikembangkan Sahid et al [2]. Kinerja Model sudu taper 4:5 dengan sudut keluaran 25° dikaji dengan membandingkan hasil uji kinerja yang telah dilakukan oleh Herlambang dan Sahid.

2. Material dan metodologi

Penelitian diawali dengan perancangan dan pembuatan model sudu turbin angin. Model sudu terbuat material kayu jati dengan ketebalan 5 mm dengan 3 model sudu yang berbeda, yaitu: (a) Model sudu taper 4:5. model ini memiliki lebar sudu bagian atas dan bawah memiliki panjang dengan rasio 4:5 sehingga sudu turbin angin yang dibuat memiliki dimensi lebar dengan rasio 110:137,5 mm. Model sudu ini dirancang dengan mengacu rancangan sudu yang dibuat oleh Herlambang et al [1]. Model sudu taper 4:5 dinotasikan dengan MT; (b) Model model sudu sudut keluaran 25° . Model sudu jenis ini memiliki bentuk persegi panjang dan pada bagian sisi keluar diberi sudut keluaran sebesar 25° . Model sudu ini dirancang

dengan mengacu rancangan sudu yang dibuat oleh Sahid et al [2]. Model sudu sudut keluaran 25° dinotasikan dengan MK; (c) Model model sudu taper 4:5 dan sudut keluaran 25° . Model sudu jenis ini merupakan gabungan dari model model sudu taper 4:5 dan model model sudu sudut keluaran 25° , yaitu memiliki bentuk profil taper 4:5, sehingga model sudu turbin angin yang dibuat memiliki dimensi lebar dengan rasio 110:137,5 mm dan pada bagian sisi keluar diberi sudut keluaran sebesar 25° . Model sudu taper 4:5 dan sudut keluaran 25° dinotasikan dengan MTK

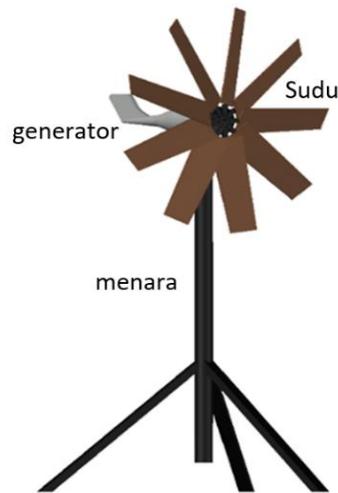
Ketiga model sudu tersebut diuji kinerjanya di dalam sistem pembangkit listrik tenaga angin dan dibandingkan. Untuk mengetahui apakah model ketiga yang merupakan pengembangan dari model pertama dan kedua maka perlu dilakukan uji eksperimental. Ketiga model tersebut ditunjukkan pada Gambar 1 dan instalasi turbin angin ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Rancangan Model Sudu Turbin Angin

(a) *Taper* 4:5; (b) Sudut keluaran 25° ; (c) *Taper* 4:5 dan sudut keluaran 25°

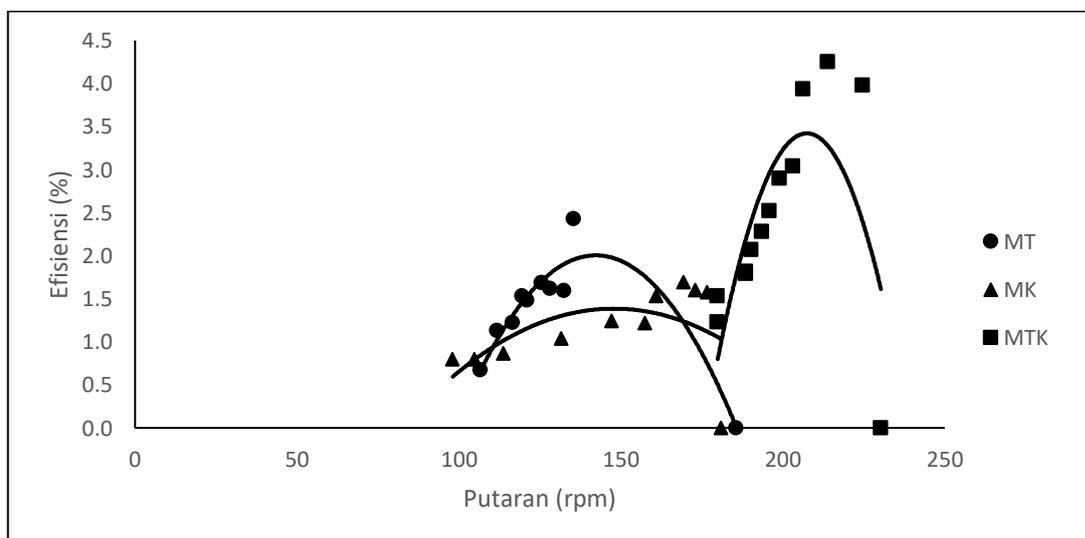
Parameter-parameter yang diukur dalam pengujian ini adalah kecepatan angin (v) yang diukur dengan anemometer, putaran poros turbin (n) yang diukur dengan tachometer, tegangan (V) yang diukur dengan voltmeter, dan arus pada beban (I) yang diukur dengan amperemeter. Parameter tersebut diperoleh untuk mendapatkan daya kinetik (P_{kin}), daya generator ($P_{generator}$), dan efisiensi (η). Parameter-parameter yang diukur mengacu pada penelitian Aryanto, 2013 [7]. Hasil dari pengolahan data digunakan sebagai bahan analisis. Analisis dilakukan dengan menyajikan hasil pengolahan data dalam bentuk grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran turbin angin untuk mengetahui efisiensi terbaik berdasarkan karakteristik turbin angin pada kecepatan 5 m/s, 7 m/s, dan 9 m/s dan kecepatan terbaik berdasarkan karakteristik kecepatan turbin angin pada masing-masing model sudu dengan mengacu pada beberapa teori dan hasil penelitian dari jurnal ilmiah.



Gambar 2. Instalasi turbin angin

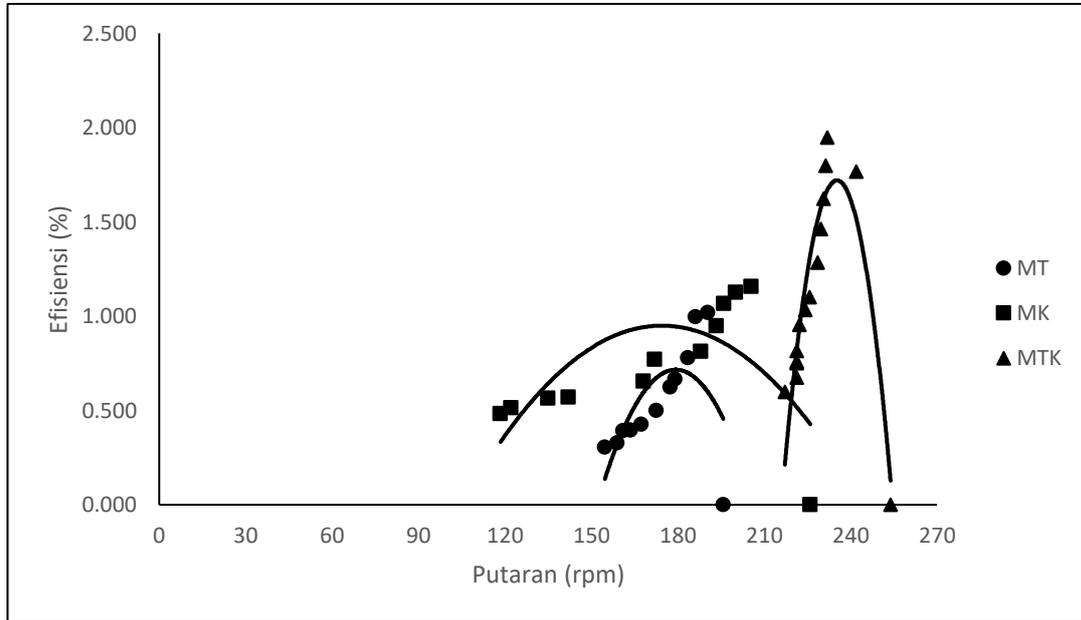
3. Hasil dan pembahasan

Gambar 3 menunjukkan grafik efisiensi terhadap putaran turbin angin yang diuji pada kecepatan 5 m/s. Terdapat tiga model sudu yaitu model MT (model tapping), MK (model sudut luaran), dan MTK (model tapping dan sudut luaran). Sudu model MT dan Mk merupakan desain sudu hasil penelitian terdahulu yaitu Herlambang et al [1] dan Sahid et al [2]. Sudu model MTK merupakan desain pengembangan dari MT dan MK. Ketiga model (MT, MK, dan MTK) telah menunjukkan garis kecenderungan yang sama. Ketiganya menunjukkan penurunan putaran dengan meningkatnya beban dan mencapai puncak efisiensi pada putaran tertentu. Puncak efisiensi model MT, MK, dan MTK masing-masing adalah 2,42 %; 1,69 %; dan 4,25 %. Hasil ini menunjukkan bahwa urutan efisiensi kinerja model sudu terbaik berturut-turut adalah MTK, MT, dan MK. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggabungan model taper 4:5 dan sudut keluaran 25° (MTK) memberikan dampak terhadap peningkatan efisiensi. Jika dibandingkan dengan MT meningkat sebesar 75,38 % dan jika dibandingkan dengan MK meningkat sebesar 91,13 %. Tren kurva hasil penelitian ini juga sesuai dengan hasil penelitian Taher et al [8], dimana efisiensi system meningkat dengan meningkatnya putaran turbin hingga mencapai puncak dan mengalami penurunan. Karakteristik yang sama juga dibuat oleh Rajakumar et al [9]. Bedanya karakteristik dinyatakan dalam coefisien daya (C_p) terhadap *tip speed ratio* (TSR). Besaran C_p berbanding lurus dengan efisiensi system turbin dan TSR berbanding lurus dengan putaran turbin, sehingga karakteristik yang dibangun hakekatnya mirip.

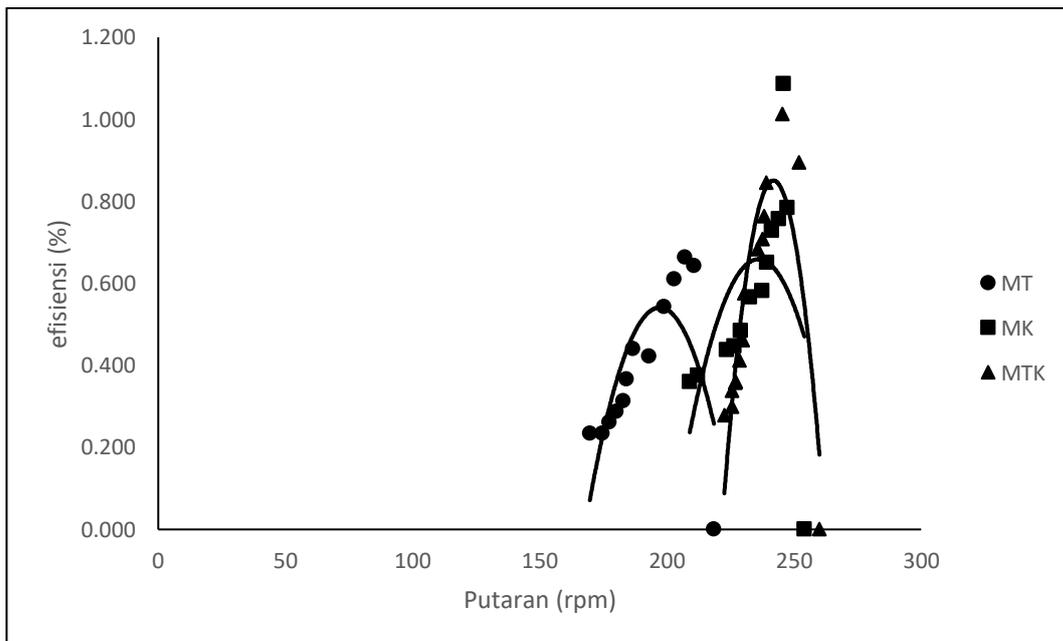


Gambar 2. Grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran pada kecepatan 5 m/s

Gambar 4 menunjukkan grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran turbin angin yang diuji pada kecepatan 7 m/s. Hasil uji ini juga menunjukkan trend yang sama pada Gambar 3. Peningkatan kecepatan angin menghasilkan puncak efisiensi yang berbeda, yaitu untuk MT sebesar 1,019 %, MK sebesar 1,157 %, dan MTK sebesar 1,947 %. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada pengujian kecepatan 7 m/s MTK memiliki efisiensi tertinggi, disusul oleh MK, dan MT memiliki efisiensi terendah. Sama halnya dengan pengujian pada kecepatan 5 m/s, penggabungan model taper 4:5 dan sudut keluaran 25° memberikan dampak terhadap peningkatan efisiensi. Terjadi peningkatan sebesar 151,63 % dari MT dan 68,26 % dari MK.



Gambar 3. Grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran pada kecepatan 7 m/s



Gambar 4. Grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran pada kecepatan 9 m/s

Gambar 5 menunjukkan grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran turbin angin pada pengujian kecepatan 9 m/s. Trend yang dihasilkan pada pengujian ini sama dengan pengujian kecepatan 5 m/s dan 7 m/s, tetapi puncak efisiensi menunjukkan penurunan. Pada MT menghasilkan efisiensi sebesar 0,664 %, pada MK menghasilkan efisiensi sebesar 1,087 %, dan pada MTK menghasilkan efisiensi sebesar 1,012 %. Berbeda dengan pengujian pada kecepatan 5 m/s dan 7 m/s, Hasil ini menunjukkan bahwa efisiensi tertinggi dihasilkan oleh MK dilanjutkan dengan MTK, dan MT menghasilkan efisiensi terendah. Pada pengujian ini MTK mengalami penurunan dari MK sebesar 7,37 %, sedangkan dengan MT terjadi kenaikan sebesar 52,51%.

Peningkatan efisiensi yang terjadi pada MTK ini disebabkan pengaruh torsi yang terjadi pada desain taper 4:5. Torsi adalah ukuran kekuatan atau gaya yang dapat menyebabkan obyek berputar. Torsi dibutuhkan untuk mengimbangi gaya berat dari sudu turbin dan gaya gesek fluida (udara). Torsi pada sudu turbin dipengaruhi oleh aerodinamika sudu turbin dan kecepatan angin. Berdasarkan persamaan torsi ($\tau = d \times F$) besarnya torsi dipengaruhi oleh panjang lengan dan gaya. Gaya yang bekerja pada hal ini adalah gaya lift dan gaya drag. Karena pada sudu ini penampangnya adalah *flat*, maka tidak ada gaya lift yang terjadi. Priyadi et al menyatakan bahwa gaya drag merupakan gaya yang menahan pergerakan sebuah benda padat melalui fluida (zat cair atau gas). Berdasarkan persamaan gaya drag ($F_d = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_d$) besarnya gaya drag dipengaruhi oleh luas sapuan [10]. Dahlan et al menyatakan bahwa taper memiliki luas sapuan yang lebih kecil dibandingkan dengan taperless [4]. Oleh karena area sapuan taper ini mengecil pada bagian ujungnya sehingga gaya drag yang dihasilkan akan semakin mengecil pada ujungnya. Gaya dorong yang semakin mengecil pada ujungnya menyebabkan besarnya torsi pada setiap bagian sudu relatif sama [4]. Taper memberikan torsi awal yang baik dari bagian yang lebar sekaligus mengurangi hambatan pada ujung yang mengakibatkan sudu berputar lebih cepat. Selain itu peningkatan efisiensi terjadi karena pengaruh daya yang dihasilkan sesuai dengan persamaan efisiensi ($\eta = \frac{P_{generator}}{P_{kin}} \times 100$). Dahlan et al menyatakan bahwa model sudu taper menghasilkan daya yang optimal pada kecepatan 5-7 m/s. Oleh karena daya yang dihasilkan besar maka efisiensi yang dihasilkan pun akan semakin besar [4] .

Selain pengaruh taper 4:5, sudu ini memiliki sudut keluaran 25°, Sahid et al [2] menyatakan bahwa sudut keluaran 25° menghasilkan kecepatan absolut angin keluar sudu tangensial dan berlawanan arah terhadap gerak sudu yang akan menyebabkan terjadinya gaya reaksi searah gerakan sudu dan memberikan tambahan tenaga yang dihasilkan oleh turbin angin. Sudu dengan taper 4:5 dan sudut keluaran 25° ini digabungkan akan menghasilkan putaran turbin angin yang lebih besar yang dapat mengakibatkan nilai tip speed ratio meningkat sesuai dengan persamaannya ($\lambda = \frac{n \times \pi \times D}{60v}$) dimana *nilai tip speed ratio* berbanding lurus terhadap putaran turbin angin. Hal ini juga selaras dengan hasil penelitian Madi, 2021 [11]. Hal ini sesuai dengan data yang disajikan pada Tabel 1.

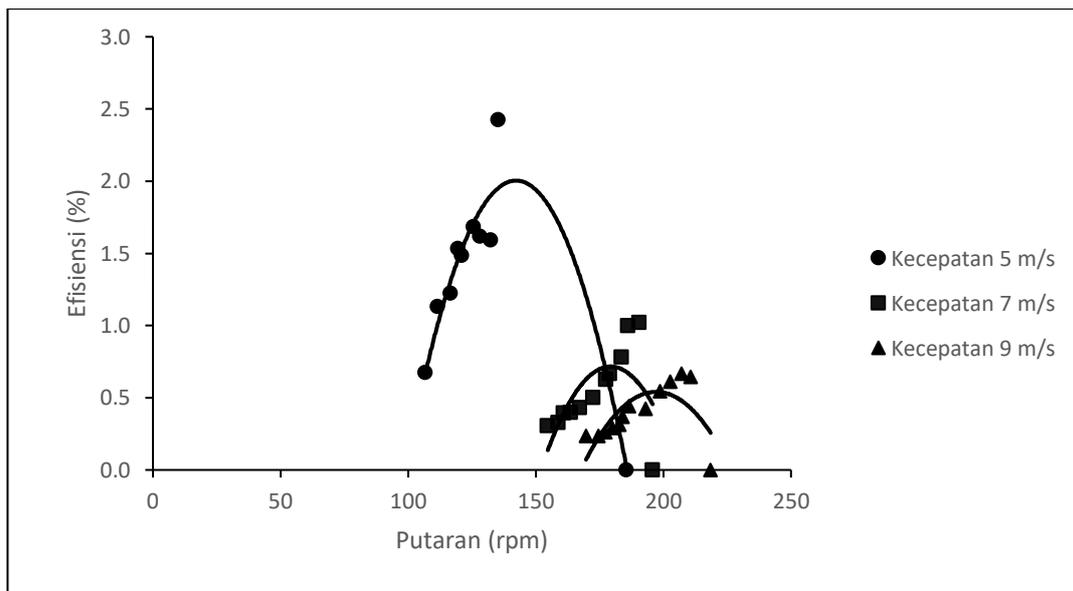
Tabel 1 menunjukkan bahwa semakin besar putaran mengakibatkan nilai tip speed ratio semakin tinggi. Yerikho (2016) menyatakan bahwa semakin tinggi tip speed ratio akan meningkatkan besarnya nilai efisiensi yang tinggi hingga pada titik puncaknya [12]. Hal inilah yang menyebabkan penggabungan taper 4:5 dan sudut keluaran 25° memberikan dampak peningkatan efisiensi yang signifikan pada kecepatan 5 m/s dan 7 m/s

Tabel 1. TSR sudu pada efisiensi tertinggi

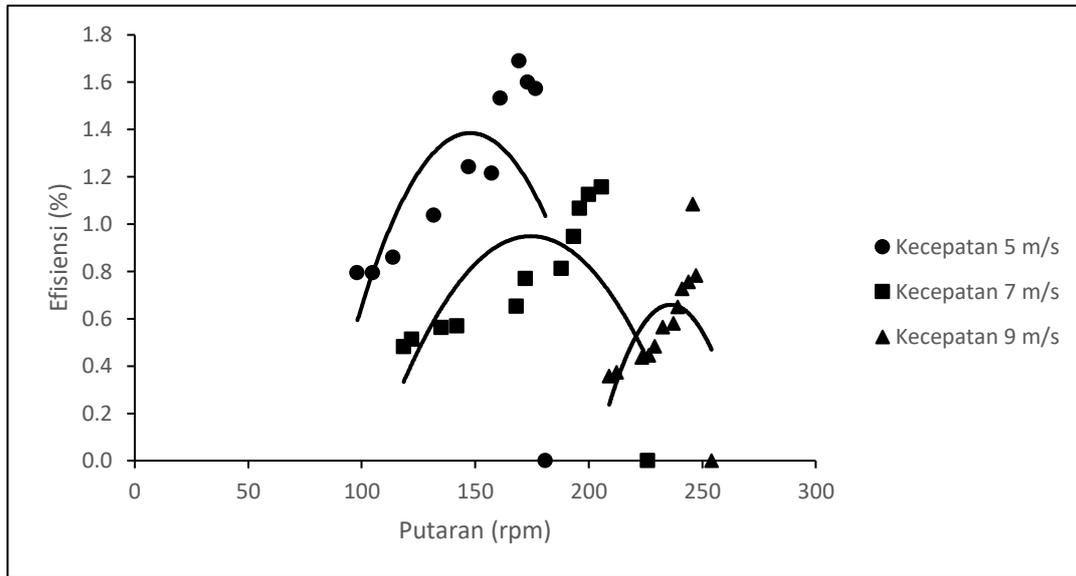
No	Model Sudu	Kecepatan 5 m/s		Kecepatan 7 m/s	
		Putaran (rpm)	Tip Speed Ratio	Putaran (rpm)	Tip Speed Ratio
1	Taper 4:5	135,4	1,559	190,5	1,019
2	Sudut keluaran 25°	169,4	1,95	205,6	1,691
3	Taper 4:5 dan sudut keluaran 25°	213,9	2,463	231,9	1,907

Hasil uji pada kecepatan angin 9 m/s menunjukkan bahwa MTK mengalami penurunan efisiensi dibandingkan dengan MK. Penurunan efisiensi ini dipengaruhi adanya pengaruh taper 4:5 ini tidak cocok diterapkan pada kecepatan angin 9 m/s sesuai dengan hasil penelitian Herlambang et al [1] yang berjudul “Rancang Bangun Turbin Angin Poros Horizontal 9 Sudu Flat Dengan Variasi Rasio Lebar Sudu Top dan Bottom untuk Meningkatkan Kinerja PLTB” menunjukkan bahwa rasio 4:5 tidak cocok diterapkan pada kecepatan angin 9 m/s. Hal ini serupa dengan hasil uji karakteristik efisiensi terhadap putaran MT pada Gambar 6.

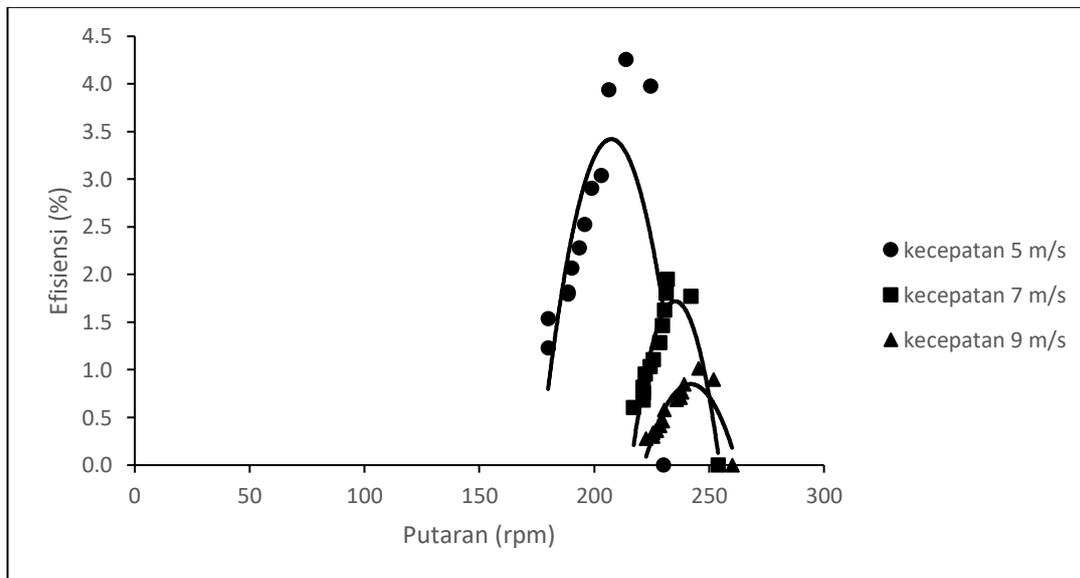
Gambar 6, 7, dan 8 menunjukkan grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran turbin angin MT, MK, dan MTK. *Trend* pada ketiga grafik tersebut menunjukkan hasil yang sama, yaitu Turbin angin MT, MK, dan MTK menghasilkan efisiensi tertinggi pada kecepatan angin 5 m/s. Hasil tersebut sesuai dengan jurnal yang dibuat oleh Sahid et al [2] bahwa turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak cocok untuk kecepatan angin rendah yang disebabkan karena sudu turbin ini memiliki penampang *flat*, sehingga tidak ada perbedaan tekanan pada sisi depan dan belakang sudu.



Gambar 5. Grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran pada MT



Gambar 6. Grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran pada MK



Gambar 7. Grafik karakteristik efisiensi terhadap putaran pada MTK

Gambar 6, 7, dan 8 grafik yang disajikan menunjukkan terjadinya penurunan efisiensi seiring dengan kenaikan kecepatan angin. Penurunan efisiensi ini disebabkan adanya pengaruh rotor solidity terhadap kecepatan angin. Pane menyatakan bahwa Besarnya kecepatan angin berbanding lurus terhadap besarnya putaran rotor yang dihasilkan [13]. Kemudian Aryanto et al menyebutkan besarnya putaran rotor dipengaruhi oleh jumlah sudu, dimana semakin banyak jumlah sudu menyebabkan besarnya putaran karena jika jumlah sudu turbin angin sedikit maka jarak antar sudu terlalu jauh sehingga distribusi energi angin yang diterima oleh sudu tidak diterima secara maksimal disebabkan adanya banyak losses energi yang hilang melalui celah antar sudu sehingga putarannya akan kecil [7]. Banyaknya jumlah sudu ini berhubungan dengan besarnya rotor solidity, sesuai dengan persamaan rotor solidity ($\sigma = \frac{na}{A}$) semakin banyak jumlah sudu maka semakin besar pula nilai rotor solidity-nya [14]. Hasil penelitian Damara (2016) menunjukkan rotor solidity berbanding terbalik terhadap efisiensi yang disebabkan karena semakin tinggi rotor solidity akan menghasilkan gaya dorong yang tinggi akan menyebabkan turunnya nilai efisiensi [15]. Agar besarnya efisiensi meningkat ataupun konstan pada kecepatan angin

tinggi maka besarnya rotor solidity harus diturunkan dengan cara mengurangi jumlah sudu pada turbin angin. Maka perlu dilakukan kajian lebih lanjut terhadap jumlah sudu turbin angin tipe *flat* sudu banyak untuk mendapatkan hasil yang optimal.

4. Kesimpulan

Turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak taper 4:5 dan sudut keluaran 25° memberikan dampak peningkatan Efisiensi pada kecepatan 5 m/s dan 7 m/s terhadap model sudu taper 4:5 yaitu masing-masing sebesar 75,38 % dan 91,13 %. Peningkatan efisiensi terhadap model sudu dengan sudut keluaran 25° masing-masing sebesar 151,63 % dan 68,26 %. Turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak sudut keluaran 25° memiliki efisiensi tertinggi pada kecepatan 9 m/s. Efisiensi menurun sebesar 7,37 % jika dibandingkan model sudu taper 4:5. Berdasarkan hasil ini, Turbin angin poros horizontal tipe *flat* sudu banyak taper 4:5 dan sudut keluaran 25° adalah model sudu yang paling cocok digunakan pada kecepatan angin ≤ 7 m/s.

Daftar Pustaka

- [1] Herlambang, Y. D., Wahyono Wahyono. Rancang Bangun Turbin Angin Poros Horizontal 9 Sudu *Flat* Dengan Variasi Rasio Lebar Sudu Top Dan Bottom Untuk Meningkatkan Kinerja PLTB. Eksergi. 2019; 15(2): p. 70.
- [2] Sahid, Hendrawati D., Safarudin, Y., M., Mulyono, Azka. F., H... Turbin Angin Poros Horizontal Tipe *Flat* Sudu Banyak dengan Perlakuan Sudut Luanan. Prosiding NCIET. 2020; 1(1): p. B326-B335.
- [3] Gultom, Togar. Pemenuhan Sumber Tenaga Listrik Di Indonesia. Jurnal Ilmiah Research Sains. 2017; 3(1): p. 130–39.
- [4] Dahlan, Burhannudin. Rancang Bangun Baling-Baling Kincir Angin Kayu Mahoni (*Swietenia Macrophylla*) dan Pinus Design Of Wind Turbine Based On The Naca 4412 And 4415 Using Mahogany (*Swietenia Macrophylla*) dan Pines Wood (*Pinus Merkusii*). Tesis. Surabaya: Program Magister Bidang Keahlian Fisika Instrumentasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember; 2016.
- [5] Kamal, Samsul. Studi Potensi Energi Angin Daerah Pantai Purworejo Untuk Mendorong Penyediaan Listrik Menggunakan Sumber Energi Terbarukan Yang Ramah Lingkungan. J. Manusia dan Lingkungan. 2007; 14 (1): p. 26-34.
- [6] Saputra, M. Kajian Literatur Sudu Turbin Angin Untuk Skala Kecepatan Angin Rendah. Jurnal Mekanova. 2016; 2(1): p. 74-75.
- [7] Aryanto, Firman, Made Mara, and Made Nuarsa. Pengaruh Kecepatan Angin Dan Variasi Jumlah Sudu Terhadap Unjuk Kerja Turbin Angin Poros Horizontal. Dinamika Teknik Mesin. 2013; 3(1): p. 50–59.
- [8] Taher G. Abu-El-Yazied, Hossam N. Doghiem, hmad M. Ali, and 4 Islam M. Hassan. Investigation of the Aerodynamic Performance of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine. IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2015; 04 (05): p. 18-29.
- [9] Rajakumar, S., Ravindran, D., Sivakumar, M., Venkatachalam, G., dan Muthukumar, S. Optimization of Power Coefficient of Wind Turbine Using Genetic Algorithm. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. 2016; 98 (2): p. 111-118.
- [10] Priyadi, Irnanda, Alex Surapati, and Vikriandi Tri Putra. Rancang Bangun Turbin Angin Horizontal Sebagai Salah Satu Pembangkit Daya Pada Mobil Hybrid. Seminar Nasional Inovasi, Teknologi dan Aplikasi (SenNITiA). 2018: 147–58.

- [11] Madi, M., Tuswan, T., Arirohman, I.D., dan Ismail, A. Comparative Analysis of Taper and Taperless Sudu Dsign for Ocean Wind Turbines in Ciheras Coastline, West Java. *Kapal : Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan*. 2021; 18(1): p. 8-17.
- [12] Yerikho, Stephanus. Unjuk Kerja Kincir Angin Poros Horizontal 2 Sudu Diameter 1 Meter Berbahan Komposit Dengan Lebar Maksimal 10 Sentimeter Dari Pusat Poros. 2016; p. 57–60.
- [13] Pane, O.P. Rancang Bangun Mekanisme Pitch Blade Control Dan Yaw Drive Control Turbin Angin Horisontal. Tugas Akhir. Program Studi DIII Teknik Mesin Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Semarang; 2019.
- [14] Newscientist.com. (2013, 25 September). Catch the Breeze. diakses pada 11 Agustus 2021, dari <https://www.newscientist.com/article/dn24250-catch-the-breeze/>.
- [15] Damara, Dony. Analisa Rotor Horizontal Axis Wind Turbine (Hawt) Dengan Variasi Geometri Dan Jumlah Bilah Kapasitas 10 Kw Turbine (Hawt) With Variation Geometry And Number Of Blade For Capacity 10 Kw”. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember; 2016.