

Studi eksperimental turbin angin kombinasi sumbu vertikal darrieus-savonius dengan poros kembar

Experimental study of combined savonius-darrieus wind turbine with dual shaft

Muhammad I. Riady^{1*}, Dyos Santoso¹, Bazlina D. Afrah², Juliet P. Arsadha², R. Rupinder¹, Miftahurrizka Afrah³

¹Teknik Mesin, Universitas Sriwijaya, Palembang – Indonesia

²Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya, Palembang – Indonesia

³Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Bandung - Indonesia

*Email: mihsanriady@ft.unsri.ac.id

Abstrak

Energi angin merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang melimpah di Indonesia. Potensi angin yang besar ini dapat dimanfaatkan dengan menggunakan turbin angin sebagai teknologi yang ramah lingkungan. Turbin angin Savonius dan turbin angin Darrieus merupakan turbin angin sumbu vertikal yang sesuai dengan karakteristik angin yang tersedia. Pada penelitian ini, turbin Darrieus dikombinasikan dengan turbin Savonius dalam rangka memperbaiki kemampuan *self-starting* turbin tersebut. Untuk mendapatkan performansi turbin yang lebih baik, daya yang dihasilkan oleh turbin Savonius juga dimanfaatkan sehingga tidak semata-mata berfungsi sebagai perangkat *starting* saja. Untuk tujuan itu, rotor Savonius dipasang pada poros dengan menggunakan *one way bearing* sehingga masing-masing rotor dapat beroperasi secara terpisah dan memiliki kecepatan putaran yang berbeda. Profil sudu yang digunakan dalam penelitian ini adalah airfoil NACA 0018 untuk rotor Darrieus dan modifikasi airfoil e377-il untuk rotor Savonius. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi peningkatan performansi yang diperoleh pada kombinasi turbin Darrieus-Savonius poros kembar bila dibandingkan dengan kombinasi poros tunggal. Pada kombinasi poros tunggal, rotor Savonius terpasang tetap pada poros turbin Darrieus dan hanya digunakan sebagai *starting*, sedangkan pada kombinasi poros kembar, daya yang dihasilkan oleh kedua rotor dimanfaatkan. Hasil dari pengujian ini memperlihatkan bahwa daya yang dibangkitkan oleh kombinasi poros kembar mengalami peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan kombinasi poros tunggal yaitu sebesar 28.54% (0.528 W) pada kecepatan angin 4.38 m/s.

Kata Kunci: kombinasi poros kembar, kombinasi poros tunggal, turbin darrieus, turbin savonius.

Abstract

Wind energy is one of the abundant renewable energy sources in Indonesia. This large wind potential can be utilized by using wind turbines as an environmentally friendly technology. The Savonius and Darrieus wind turbine are vertical axis wind turbines that are suitable for the available wind characteristics. In this study, the Darrieus turbine was combined with the Savonius turbine to improve the *self-starting* ability of the turbine. To get better turbine performance, the power generated by the Savonius turbine is also utilized so that it does not only function as a starting device. For this purpose, the Savonius rotor is mounted on the shaft using one-way bearings so that each rotor can operate separately and have a different rotation speed. The blade profile used in this study is the NACA 0018 airfoil for the Darrieus rotor and the modified e377-il airfoil for the Savonius rotor. The main objective of this study was to evaluate the performance improvement obtained in the twin shaft Darrieus-Savonius turbine combination when compared to the single shaft combination. In a single shaft combination, the Savonius rotor is fixed to the Darrieus turbine shaft and is only used for starting, while in a twin-shaft combination, the power generated by both rotors is utilized. The results of this test show that the power generated by the twin shaft combination has a significant increase compared to the single shaft combination, which is 28.54% (0.528 W) at a wind speed of 4.38 m/s.

Key Words: darrieus turbine, savonius turbine, single shaft combination, twin shaft combination.

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki jumlah penduduk sekitar 270,20 juta jiwa pada tahun 2020 ([BPS] Badan Pusat Statistik 2019). Konsekuensinya, energi yang diperlukan juga meningkat seiring dengan jumlah penduduk. Berdasarkan data yang dikeluarkan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM, Pada tahun 2018, total produksi energi primer yang terdiri dari minyak bumi, gas bumi, batubara, dan energi terbarukan mencapai 411.6 MTOE. Sebesar 64% atau 261.4 MTOE dari total produksi tersebut diekspor terutama batubara dan LNG (Jonan 2018). Selain itu, Indonesia juga melakukan impor energi terutama minyak mentah dan produk BBM sebesar 43,2 MTOE serta sejumlah kecil batubara kalori tinggi yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan sektor industry (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional 2019). Energi fosil sendiri memiliki dampak yang buruk, yaitu dari hasil pembakaran energi fosil menghasilkan gas-gas yang berbahaya seperti karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO_x), sulfur dioksida (SO₂), hidrokarbon (HC), karbon dioksida (CO₂), dan timah hitam (Pb) (Sugiarti 2015). Menurut data yang dikeluarkan oleh *World Health Organization* (WHO) Indonesia di kategorikan pada Interim Target 3 dengan annual mean PM_{2.5} concentration sebesar 15 µg/m³, sedangkan menurut standar *annual mean PM_{2.5} concentration* yang diizinkan adalah sebesar 10 µg/m³ (McDuffie et al. 2021). Sehingga dibutuhkan suatu alternatif energi yang dapat mensuplai kebutuhan energi yaitu energi baru terbarukan (EBT). Energi baru terbarukan (EBT) adalah energi yang berasal dari sumber daya terbarukan dan merupakan energy yang ramah lingkungan. Jenis-jenis EBT sendiri antara lain; panas bumi, angin, air, surya (matahari), dan biomassa. Energi angin merupakan energi terbarukan yang cukup berkembang pemanfaatannya saat ini. Sebab angin adalah salah satu bentuk energi yang tersedia secara melimpah di alam ini. Angin adalah udara yang bergerak akibat adanya perbedaan tekanan udara dengan arah aliran angin dari tempat yang memiliki tekanan tinggi ke tempat yang bertekanan rendah, atau dari daerah yang memiliki suhu/temperatur rendah ke wilayah bersuhu tinggi. (Wagner 2017). Wilayah Indonesia memiliki potensi energi angin yang diperkirakan mencapai 60 GW dengan rata-rata kecepatan angin sekitar 2 m/s sampai 6 m/s (Didik Notosudjono 2018)(Mustika 2020). Sedangkan, alat yang memanfaatkan energi angin dan mengkonversikan menjadi energi kinetik adalah turbin angin. Turbin angin sumbu vertikal yang digunakan adalah turbin Savonius dan Darrieus. Salah satu keunggulan dari turbin Savonius adalah turbin tersebut dapat dioperasikan pada daerah dengan kecepatan angin yang relatif rendah (Sahim, Santoso, and Puspitasari 2018)(Zemamou, Aggour, and Toumi 2017)(Wenehenubun, Saputra, and

Sutanto 2015) yaitu pada saat nilai TSR turbin diantara 0.5 sampai 1.5, akan tetapi nilai koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin savonius relative rendah dengan nilai maksimum rata-rata hanya mencapai 20%.

Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa modifikasi parameter sudu seperti *overlap ratio*, *aspect ratio*, bentuk sudu dan sebagainya dapat memengaruhi performa turbin (Wenehenubun, Saputra, and Sutanto 2015). Salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Soelaiman, dkk yang membandingkan bentuk sudu Savonius tipe U dan tipe L menunjukkan bahwa sudu Savonius tipe L menghasilkan torsi yang paling baik dibandingkan dengan sudu Savonius tipe U. Modifikasi parameter sudu juga dilakukan oleh Nadhief dkk pada proses perancangan dan pengujian terhadap sebuah prototipe rotor turbin tipe L dengan 3 variasi sudut *blade arc* dimana hasil yang didapat menunjukkan pengaruh besar dari variasi sudut *blade arc* pada turbin Savonius (Nadhief, Hadi, and Prija Tjahjana 2019). Sebagian besar peneliti mencoba untuk mengoptimalkan koefisien daya turbin angin Savonius dengan memodifikasi bentuk dan jumlah sudu serta menambahkan dinding deflektor di depan turbin untuk meningkatkan kecepatan angin seperti yang dilakukan oleh Hassan Saeed dkk yang mencoba membandingkan antara data dari simulasi CFD dua dimensi dengan data eksperimen menggunakan empat model turbulensi untuk menentukan model yang sesuai. hasil efisiensi daya menunjukkan bahwa model turbulensi k-ε dapat direalisasikan lebih akurat jika dibandingkan dengan model lainnya. Desain sudu baru menunjukkan kinerja yang lebih baik bentuk daripada modifikasi bekas lainnya (Hassan Saeed, Nagib Elmekawy, and Kassab 2019)(Hadi Ali 2013).

Menurut Mahmoud dkk, (Mahmoud et al. 2012) peningkatan rasio aspek meningkatkan kinerja Savonius. Aspek rasio sebesar 0.7 memiliki koefisien daya maksimum. *Zero overlap* pada turbin dengan tiga sudu memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan turbin tiga sudu yang memiliki *overlap* (Morshed et al. 2019). Koefisien daya sudu (*ARC-Blade*) mengalami peningkatan hingga mencapai nilai maksimum sedangkan koefisien daya maksimum dari rotor tipe Savonius konvensional dan rotor tipe *Bach* masing-masing sebesar 18,90% dan 26,35% (Kacprzak and Sobczak 2014).

Pada tahun 2020, Santoso dkk (Santoso et al. 2020) melakukan penelitian dengan mengkombinasikan turbin Savonius dan turbin Darrieus sehingga terbentuk suatu instalasi turbin baru dimana rotor Savonius berfungsi sebagai penggerak utama dan rotor Darrieus sebagai penggerak tambahan. Kombinasi kedua turbin tersebut menggunakan masing-masing 2 sudu Turbin Savonius menggunakan profil *airfoil E-378* il yang telah dimodifikasi, dengan diameter 20cm dan tinggi sudu 24cm. Sementara pada turbin

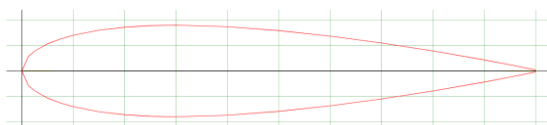
Darrieus profil yang digunakan adalah NACA 0018 dengan diameter 50 cm dan tinggi 40 cm. Kombinasi turbin Savonius-Darrieus ini terbukti dapat meningkatkan *self-starting* sebesar 60%. Hanya saja daya yang dihasilkan oleh turbin kombinasi tersebut mengalami penurunan bila dibandingkan dengan daya yang dihasilkan oleh turbin Darrieus *stand-alone*, dimana daya yang dihasilkan oleh turbin kombinasi Savonius-Darrieus adalah sebesar 2,375W sementara daya yang dihasilkan oleh turbin Darrieus *stand alone* mencapai 3,136 W. Penurunan daya tersebut terjadi dikarenakan daya yang dihasilkan oleh turbin Darrieus pada saat turbin mencapai putaran tinggi ditransmisikan ke turbin Savonius. Pada tahun 2021 Gatlewar dkk melakukan simulasi untuk melihat pengaruh dari material sudu dengan menggunakan program *Pro-e ANSYS*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model yang menggunakan baja struktural ditemukan lebih baik untuk desain akhir bila dibandingkan dengan model yang menggunakan alimunium dan *polythene* (Gatlewar et al. 2021).

Berdasarkan latar belakang diatas kombinasi turbin Savonius-Darrieus mempunyai keuntungan pada *self-starting*, namun memberikan dampak negatif terhadap daya keseluruhan turbin pada putaran tinggi. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji akibat dari pemanfaatan daya yang dibangkitkan oleh turbin Savonius pada saat turbin Savonius dan Darrieus berputar dengan kecepatan berbeda-beda dengan menggunakan poros kembar.

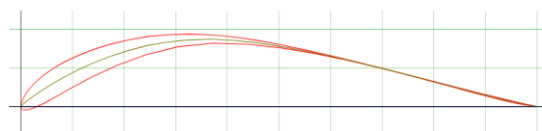
2. METODOLOGI PENELITIAN

Pengujian dilakukan pada 3 variasi kecepatan angin yaitu 2.95 m/s, 3.71 m/s, dan 4.38 m/s dengan temperatur dan tekanan lingkungan. Variasi kecepatan angin tersebut ditentukan berdasarkan rata-rata kecepatan angin yang terdapat di wilayah Indonesia (2 m/s sampai 6 m/s (Didik Notosudjono 2018)(Mustika 2020)). Torsi turbin didapat dengan melakukan pembebanan mekanis pada saat sistem beroperasi. Untuk perancangan awal turbin menggunakan aplikasi *Autodesk Fusion 360* dan *CURA* untuk selanjutnya dicetak menggunakan *3D printer*.

Profil sudu Darrieus menggunakan profil NACA 0018, sedangkan sudu turbin Savonius menggunakan profil e377-il seperti yang terlihat pada gambar dibawah:



Gambar 1. Profil NACA 0018



Gambar 2. Profil Airfoil Eppler377-il

Tinggi sudu turbin Darrieus adalah 45 cm dengan diameter (dH) 50 cm sementara sudu turbin Savonius memiliki tinggi 20 cm dan diameter (dS) 33.6 cm. *Overlap* (e) turbin Savonius yang digunakan sebesar 3 cm (rasio dS/e adalah 11.2). *One-way bearing* (OWB) terletak diantara rotor turbin Darrieus dan turbin Savonius, dimana OWB dihubungkan ke *hub* rotor turbin Savonius dan poros. Hal itu dilakukan agar pada saat *self-starting* turbin Savonius menarik turbin Darrieus (Santoso et al. 2020). Beberapa saat setelah turbin Darrieus mencapai kecepatan putaran yang lebih tinggi, maka gaya yang dihasilkan oleh turbin Darrieus akan lebih besar dari gaya yang dihasilkan pada OWB, sehingga putaran maksimum yang dihasilkan oleh turbin Darrieus lebih tinggi dari putaran maksimum yang dihasilkan oleh turbin Savonius. *Bearing* yang digunakan sebagai penahan poros bagian atas adalah *thrust ball bearing* dengan tipe *double row angular contact*. Material sudu turbin Savonius dan turbin Darrieus menggunakan *polylactic acid* (PLA) dan dicetak menggunakan mesin 3D printer sehingga dapat menghasilkan geometri sudu yang lebih akurat. Secara keseluruhan, turbin kombinasi Savonius-Darrieus dapat dilihat pada gambar 3 di bawah ini.

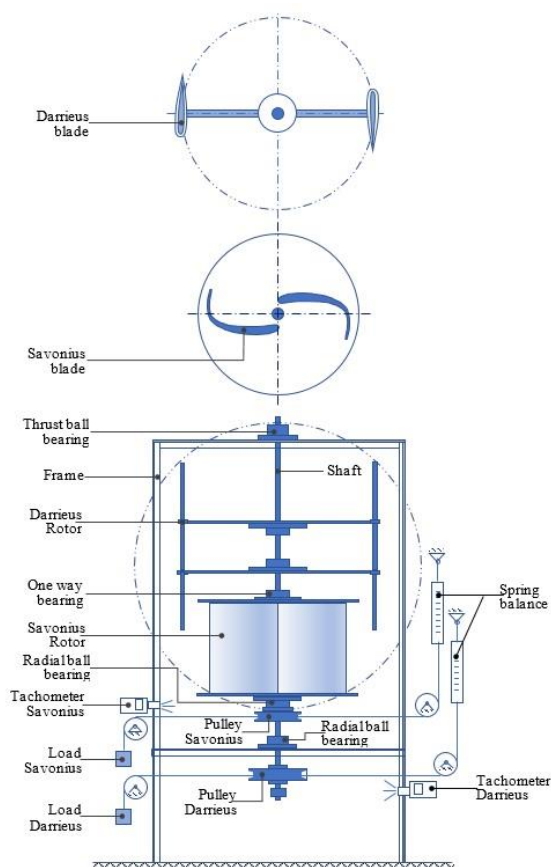
Pada penelitian ini dilakukan sebanyak 4 kali pengujian dimana pengujian pertama dilakukan pada turbin Savonius *stand alone*, selanjutnya pada pengujian kedua untuk turbin Darrieus *stand alone*, Pengujian ketiga adalah pengujian kombinasi turbin Savonius-Darrieus dengan poros tunggal dan yang terakhir adalah pengujian kombinasi turbin Savonius-Darrieus poros kembar dimana turbin Savonius dan Darrieus dihubungkan ke poros dengan menggunakan *One Way Bearing* sehingga kedua turbin akan menghasilkan kecepatan putaran yang berbeda.

Adapun prosedur untuk masing-masing pengujian dijelaskan sebagai berikut:

- Set up* turbin seperti Gambar 3 (konfigurasi disesuaikan untuk masing-masing pengujian).
- Fan/blower* dinyalakan pada kecepatan 1 (2.95 m/s) untuk memutar turbin hingga mencapai kecepatan putaran maksimum.
- Pembebanan dilakukan hingga rotor turbin berhenti berputar.
- Untuk variasi kecepatan 2 dan 3 (3.71 m/s, dan 4.38 m/s), kembali lang-kah 1-2.

Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini adalah *tachometer*, *anemometer*, dan neraca pegas. *Tachometer* digunakan untuk mengukur kecepatan

putaran rotor turbin (N). Tachometer yang digunakan adalah tipe DT-2234 C dengan akurasi ±0.05% dimana batas pengujian antara 2,5 rpm hingga 99.999 rpm. Kemudian anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin yang tersedia (VA). Anemometer yang digunakan adalah tipe ZC24000 dengan akurasi sebesar ± 5% , dimana batas pengujian diantara 0 m/s sampai 30 m/s. Untuk pembacaan yang lebih akurat maka digunakan neraca pegas dengan skala yang lebih kecil dimana neraca pegas 3 Newton digunakan untuk turbin Savonius, dan neraca pegas 5 Newton digunakan untuk turbin Darrieus (Santoso et al. 2020).



Gambar 3. Turbin Angin Kombinasi Savonius-Darrieus

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini adalah data hasil pengujian yang diperoleh untuk setiap konfigurasi dan kecepatan angin.

Tabel 1. Hasil Pengujian Turbin Angin Savonius Stand Alone pada Va= 2.95 m/s

No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P _T (W)	C _p
1	138	0.000	0.000	0.823	0.000	0.000
2	124	0.071	0.003	0.740	0.037	0.037

3	90	0.183	0.007	0.537	0.069	0.069
4	50	0.274	0.011	0.298	0.057	0.058
5	0	0.325	0.013	0.000	0.000	0.000

Dimana: N : Putaran (rpm)
 FR : Gaya resultan (N)
 T : Torsi (Nm)
 TSR : Tip speed ratio
 P_T : Daya turbin (W)
 C_p : Koefisien daya

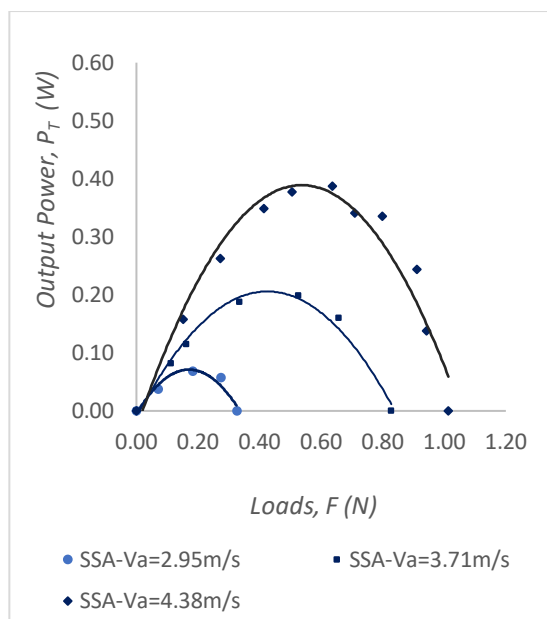
Tabel 2. Hasil Pengujian Turbin Angin Savonius Stand Alone pada Va= 4.38 m/s

No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P _T (W)	C _p
1	192	0.000	0.000	0.911	0.000	0.000
2	176	0.111	0.004	0.835	0.082	0.042
3	168	0.163	0.007	0.797	0.115	0.058
4	134	0.334	0.013	0.636	0.188	0.095
5	90	0.525	0.021	0.427	0.198	0.100
6	58	0.657	0.026	0.275	0.160	0.081
7	0	0.828	0.033	0.000	0.000	0.000

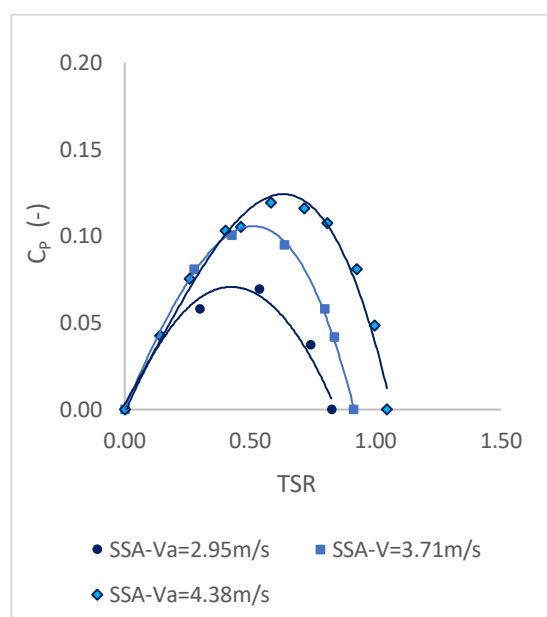
Tabel 3. Hasil Pengujian Turbin Angin Savonius Stand Alone pada Va= 4.38 m/s

No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P _T (W)	C _p
1	260	0.000	0.000	1.045	0.000	0.000
2	248	0.151	0.006	0.997	0.157	0.048
3	230	0.273	0.011	0.924	0.263	0.081
4	201	0.414	0.017	0.808	0.349	0.107
5	178	0.505	0.020	0.715	0.377	0.116
6	145	0.637	0.025	0.583	0.387	0.119
7	115	0.708	0.028	0.462	0.341	0.105
8	100	0.799	0.032	0.402	0.335	0.103
9	64	0.911	0.036	0.257	0.244	0.075
10	35	0.942	0.038	0.141	0.138	0.043
11	0	1.013	0.041	0.000	0.000	0.000

Pada turbin Savonius stand alone, pengujian dilakukan dengan menggunakan turbin Savonius dengan variasi kecepatan angin yang telah ditentukan. Dari hasil pengujian turbin savonius stand alone pada tabel di atas, efisiensi tertinggi yang diperoleh adalah sebesar 11.9% dengan daya sebesar 0.587 Watt pada putaran (N) 145 rpm dan kecepatan angin 4.38 m/s. Daya yang dihasilkan oleh turbin akan meningkat seiring dengan pembebanan yang dilakukan sampai batas dimana nilai kerugian akibat faktor gesekan dan lain-lain akan menyebabkan turbin berhenti berputar. Hasil tersebut tidak berbeda jauh dengan hasil yang didapatkan pada pengujian yang dilakukan oleh S. Meri dkk pada tahun 2019 (Salih Meri AR, Hamidon Bin Salleh B, Mohammed Najeh Nemah, Balasem A. Al-Quraishi 2019).



Gambar 4. Hubungan P_T dengan Pembebanan (F) pada Savonius Stand Alone



Gambar 5. Hubungan C_p dengan TSR pada Savonius Stand Alone

Selanjutnya, untuk pengujian turbin Darrieus stand alone efisiensi tertinggi yang diperoleh adalah sebesar 14.4% dengan daya sebesar 1.568 Watt pada putaran 342 rpm dan kecepatan angin 4.38 m/s (Sahim, Santoso, and Puspitasari 2018)(Santoso et al. 2020). Pada gambar 6 terlihat kecenderungan yang positif dimana semakin besar kecepatan angin, maka daya yang dihasilkan oleh kedua jenis sudu akan lebih besar pula. Gambar 7 menunjukkan pengaruh TSR pada daya yang dihasilkan oleh turbin dimana jika rotor turbin berputar perlahan maka sebagian besar angin akan lewat melalui celah di antara sudu dan tidak menghasilkan daya. Sedangkan jika rotor berputar terlalu cepat, maka

sudu akan bertindak seperti dinding yang kokoh sehingga angin tidak dapat lewat melalui celah sudu. Selain itu, hal ini juga dapat menimbulkan turbulensi sehingga daya yang dihasilkan menurun. Oleh karena itu, Turbin angin harus dirancang dengan TSR yang optimal untuk mendapatkan daya maksimum dari angin.

Tabel 4. Hasil Pengujian Turbin Angin Darrieus Stand Alone pada $V_a=2.95$ m/s

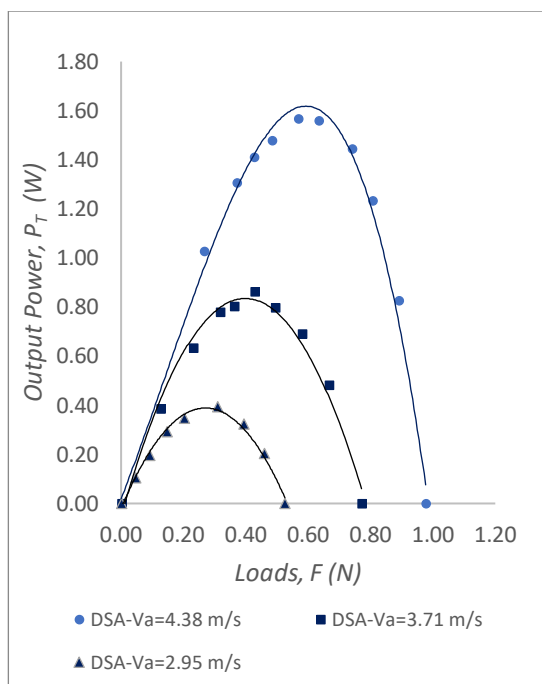
No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P_T (W)	C_p
1	295	0.000	0.000	2.619	0.000	0.000
2	282	0.046	0.005	2.504	0.104	0.031
3	265	0.091	0.008	2.353	0.195	0.059
4	246	0.147	0.011	2.184	0.292	0.088
5	212	0.203	0.016	1.882	0.347	0.104
6	158	0.308	0.024	1.403	0.393	0.118
7	102	0.394	0.030	0.906	0.324	0.097
8	55	0.460	0.035	0.488	0.204	0.061
9	0	0.525	0.040	0.000	0.000	0.000

Tabel 5. Hasil Pengujian Turbin Angin Darrieus Stand Alone pada $V_a=3.71$ m/s

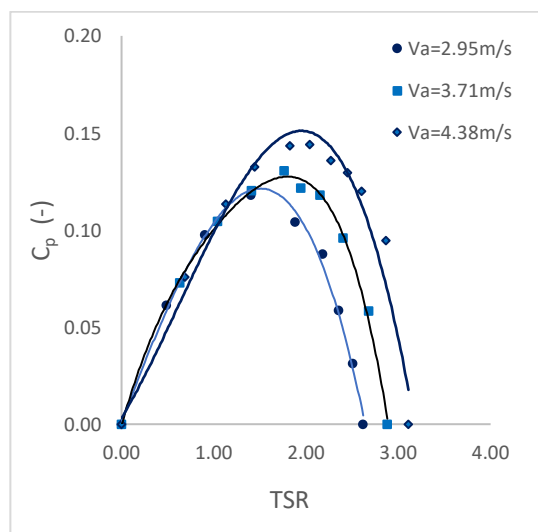
No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P_T (W)	C_p
1	408	0.000	0.000	2.880	0.000	0.000
2	380	0.126	0.010	2.683	0.385	0.058
3	340	0.231	0.018	2.400	0.634	0.096
4	305	0.317	0.024	2.153	0.780	0.118
5	275	0.363	0.028	1.941	0.805	0.122
6	250	0.428	0.033	1.765	0.864	0.131
7	200	0.494	0.038	1.412	0.797	0.121
8	148	0.580	0.045	1.045	0.692	0.105
9	90	0.665	0.051	0.635	0.483	0.073
10	0	0.771	0.059	0.000	0.000	0.000

Tabel 6. Hasil Pengujian Turbin Angin Darrieus Stand Alone pada $V_a=4.38$ m/s

No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P_T (W)	C_p
1	520	0.000	0.000	3.109	0.000	0.000
2	480	0.266	0.020	2.870	1.029	0.095
3	436	0.371	0.029	2.607	1.306	0.120
4	410	0.427	0.033	2.452	1.412	0.130
5	380	0.483	0.037	2.272	1.480	0.136
6	342	0.568	0.044	2.045	1.568	0.144
7	305	0.634	0.049	1.824	1.560	0.143
8	242	0.740	0.057	1.447	1.444	0.133
9	190	0.805	0.062	1.136	1.234	0.113
10	115	0.891	0.069	0.688	0.827	0.076
11	0	0.977	0.075	0.000	0.000	0.000



Gambar 6. Hubungan P_T dengan Pembebanan (F) pada Darrieus Stand Alone



Gambar 7. Hubungan C_p dengan Pembebanan (F) pada Darrieus Stand Alone

Selanjutnya, untuk pengujian kombinasi turbin Savonius-Darrieus poros tunggal. Masing-masing rotor beroperasi menggunakan poros tunggal sehingga kombinasi turbin ini hanya memiliki satu kecepatan putaran. Putaran yang dihasilkan oleh turbin kombinasi ini lebih besar dibandingkan putaran yang dihasilkan oleh turbin Savonius *stand alone* hanya saja masih dibawah dari putaran yang dihasilkan turbin Darrieus *stand alone*. Hal tersebut terjadi dikarenakan daya yang dihasilkan oleh putaran Turbin Darrieus ditransmisikan ke Turbin Savonius pada saat turbin tersebut telah mencapai putaran maksimumnya. Turbin tipe kombinasi ini membangkitkan daya sebesar 1.469 Watt dengan

nilai TSR 2.169 dan efisiensi sebesar 0.108 (10.8%) pada kecepatan angin 4.38 m/s.

Tabel 7. Hasil Pengujian Turbin Savonius-Darrieus dengan Poros Tunggal dengan $V_a=3.71$ m/s

No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P_T (W)	C_p
1	178	0.000	0.000	2.642	0.000	0.000
2	162	0.066	0.005	2.405	0.086	0.021
3	146	0.171	0.013	2.167	0.202	0.049
4	125	0.357	0.027	1.856	0.360	0.087
5	102	0.393	0.030	1.514	0.323	0.078
6	76	0.518	0.040	1.128	0.318	0.077
7	50	0.554	0.043	0.742	0.223	0.054
8	0	0.700	0.054	0.000	0.000	0.000

Tabel 8. Hasil Pengujian Turbin Savonius-Darrieus dengan Poros Tunggal dengan $V_a=4,38$ m/s

No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P_T (W)	C_p
1	258	0.000	0.000	3.045	0.000	0.000
2	238	0.126	0.010	2.809	0.241	0.029
3	221	0.231	0.018	2.609	0.412	0.050
4	206	0.337	0.026	2.431	0.560	0.068
5	192	0.463	0.036	2.266	0.717	0.087
6	170	0.568	0.044	2.007	0.779	0.095
7	138	0.614	0.047	1.629	0.683	0.083
8	112	0.720	0.055	1.322	0.650	0.079
9	94	0.765	0.059	1.110	0.580	0.070
10	54	0.871	0.067	0.637	0.379	0.046
11	0	0.957	0.074	0.000	0.000	0.000

Tabel 9. Hasil Pengujian Turbin Savonius-Darrieus dengan Poros Tunggal dengan $V_a=4,38$ m/s

No.	N (rpm)	FR (N)	T (N.m)	TSR	P_T (W)	C_p
1	346	0.000	0.000	3.458	0.000	0.000
2	328	0.206	0.016	3.278	0.544	0.040
3	321	0.291	0.022	3.208	0.754	0.056
4	314	0.437	0.034	3.138	1.106	0.082
5	285	0.563	0.043	2.848	1.293	0.095
6	262	0.628	0.048	2.618	1.327	0.098
7	234	0.754	0.058	2.339	1.423	0.105
8	217	0.840	0.065	2.169	1.469	0.108
9	182	0.875	0.067	1.819	1.285	0.095
10	128	1.111	0.086	1.279	1.147	0.085
11	98	1.197	0.092	0.979	0.946	0.070
12	0	1.342	0.103	0.000	0.000	0.000

Terakhir adalah pengujian kombinasi turbin angin dengan poros kembar. Pada pengujian ini, dengan menggunakan *One Way Bearing (OWB)* membuat masing-masing rotor turbin berputar dengan kecepatan putaran yang berbeda dengan kecepatan putaran maksimum yang dihasilkan turbin darrieus lebih tinggi dibandingkan kecepatan putaran maksimum yang dihasilkan oleh turbin savonius.

Tabel 10. Hasil Pengujian Turbin Savonius-Darrieus Poros Kembar pada $V_a= 2.95$ m/s

No	Ns (rpm)	FRs (N)	Nd (rpm)	FRd (N)	Pt total	Cp total
1	178	0.000	234	0.000	0.000	0.000
2	168	0.026	210	0.106	0.197	0.048
3	155	0.071	186	0.191	0.333	0.081
4	125	0.137	152	0.337	0.436	0.105
5	92	0.203	104	0.463	0.424	0.103
6	50	0.268	54	0.528	0.286	0.069
7	0	0.444	0	0.594	0.000	0.000

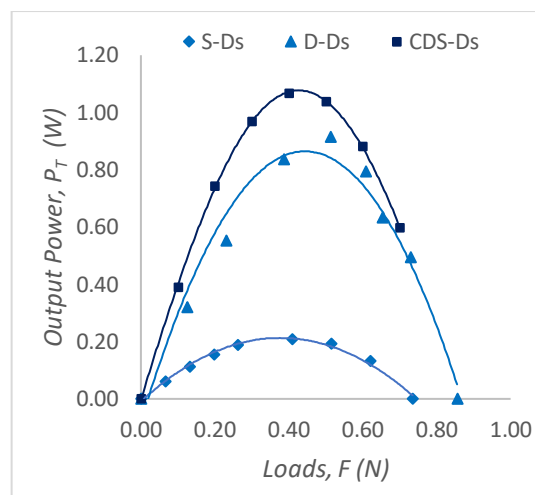
Dimana: Ns : Putaran sudu Savonius (rpm)
 Nd : Putaran sudu Darrieus (rpm)
 FRs : Gaya resultan sudu Savonius (N)
 FRd : Gaya resultan sudu Darrieus (N)
 P_T : Daya turbin (W)
 C_P : Koefisien daya

Tabel 11. Hasil Pengujian Turbin Savonius-Darrieus dengan Poros Kembar pada $V_a= 3.71$ m/s

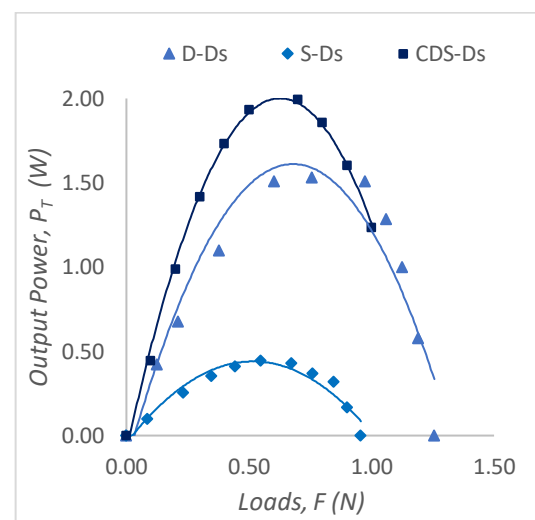
No	Ns (rpm)	FRs (N)	Nd (rpm)	FRd (N)	Pt total	Cp total
1	234	0.000	350	0.000	0.000	0.000
2	224	0.066	348	0.126	0.382	0.046
3	187	0.197	252	0.317	0.840	0.102
4	172	0.263	203	0.423	0.943	0.115
5	122	0.408	127	0.448	0.795	0.097
6	90	0.514	98	0.654	0.827	0.100
7	51	0.620	56	0.730	0.627	0.076
8	0	0.735	0	0.855	0.000	0.000

Tabel 12. Hasil Pengujian Turbin Savonius-Darrieus dengan Poros Kembar pada $V_a= 4,38$ m/s

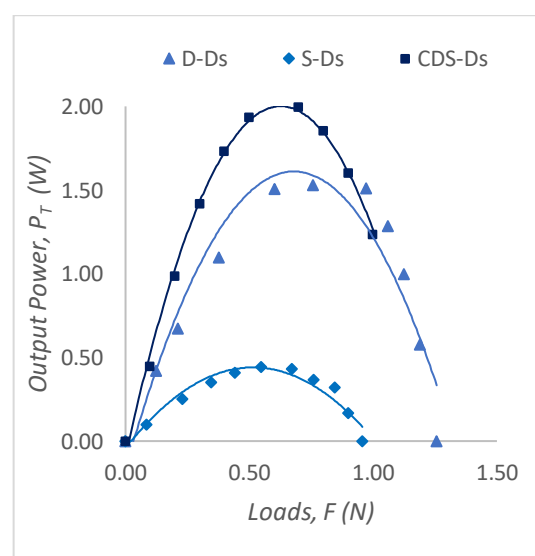
No	Ns (rpm)	FRs (N)	Nd (rpm)	FRd (N)	Pt total	Cp total
1	290	0.000	435	0.000	0.000	0.000
2	274	0.086	415	0.126	0.519	0.038
3	260	0.231	395	0.211	0.925	0.068
4	242	0.347	360	0.377	1.447	0.107
5	220	0.443	310	0.503	1.665	0.123
6	193	0.548	250	0.658	1.771	0.131
7	152	0.674	192	0.894	1.814	0.134
8	115	0.760	150	1.010	1.588	0.117
9	90	0.845	110	1.125	1.317	0.097
10	44	0.901	60	1.191	0.743	0.055
11	0	0.957	0	1.257	0.000	0.000



Gambar 8. Hubungan P_T dengan Pembebanan (F) pada Poros Kembar pada V_a 2.95 m/s

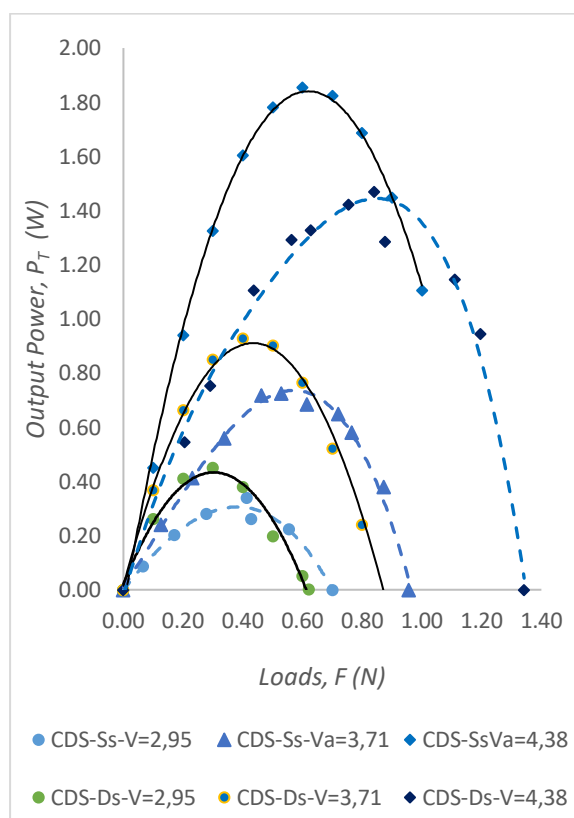


Gambar 9. Hubungan P_T dengan Pembebanan (F) pada Poros Kembar pada V_a 3.71 m/s



Gambar 10. Hubungan P_T dengan Pembebanan pada Poros Kembar pada V_a 4.38 m/s

Daya yang dibangkitkan pada pengujian kali ini merupakan penjumlahan dari daya yang dihasilkan turbin kombinasi Darrieus-Savonius dengan poros kembar. Pada saat pertama kali turbin berputar, kedua turbin memiliki kecepatan putar yang sama. Setelah mencapai suatu titik dimana kecepatan turbin Darrieus telah melebihi kecepatan turbin Savonius sehingga gaya yang dihasilkan lebih besar daripada gaya gesekan di *one way bearing* membuat putaran yang turbin Darrieus lebih tinggi dari turbin Savonius. Pembebanan dilakukan setelah masing-masing rotor mencapai kecepatan maksimum. Pada saat pengoperasian, kinerja dari masing-masing rotor tersebut juga mengalami penurunan dikarenakan adanya indikasi turbulensi akibat dari adanya beberapa bagian dari sudu turbin Darrieus yang bersinggungan langsung dengan turbin Savonius. Secara jelas, perbandingan daya yang dihasilkan pada poros kembar dan poros tunggal dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Hubungan P_T Poros Kembar dan Poros Tunggal

Pada gambar 11, dapat dilihat bahwa pemanfaatan daya dari turbin angin savonius dengan menggunakan *one-way bearing* berhasil meningkatkan daya turbin angin keseluruhan dimana daya yang dihasilkan mengalami peningkatan sebesar 0,110 W (24.444%) , 0,250 W (26.88%), dan 0.528 W (28.54%) dengan kecepatan angin 2.95 m/s, 3,71 m/s, 4,38 m/s.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini tahap pengujian dilakukan sebanyak 4 kali pada 3 variasi kecepatan angin yaitu 2.95 m/s, 3.71 m/s, dan 4.38 m/s dengan temperature dan tekanan lingkungan. Dari data hasil pengujian yang telah dilakukan, penggabungan Turbin angin Darrieus dan Turbin angin Savonius dengan menggunakan poros kembar memberikan dampak yang baik dalam penambahan daya yang dibangkitkan oleh kedua turbin tersebut. Hal tersebut didukung oleh penggunaan *one way bearing* yang mengakibatkan turbin Savonius dan turbin Darrieus beroperasi dengan kecepatan putaran yang berbeda. Akan tetapi, konfigurasi ini ternyata masih memiliki beberapa kekurangan dimana salah satunya adalah terdapat beberapa bagian dari turbin angin Darrieus yang bersinggungan langsung dengan turbin angin Savonius yang dapat membuat kinerja dari kedua turbin tersebut terganggu dikarenakan adanya indikasi turbulensi yang dapat menghambat putaran turbin. Sebaiknya penelitian mengenai turbin angin ini dilakukan dalam saluran angin tertutup dan menggunakan sudu pengarah agar hasil yang dihasilkan jauh lebih akurat. Secara keseluruhan, kenaikan daya yang terbesar dihasilkan oleh turbin angin dengan poros kembar pada kecepatan angin 4.38 m/s yaitu sebesar 28.54% (0.528 W).

DAFTAR PUSTAKA

- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2019. "Berita Resmi Statistik." *Bps.Go.Id* (27): 1–52. <https://papua.bps.go.id/pressrelease/2018/05/07/336/indeks-pembangunan-manusia-provinsi-papua-tahun-2017.html>.
- Didik Notosudjono. 2018. *Teknologi Energi Terbarukan / Didik Notosudjono, Fikri Adzikri*. 1st Editio. Bogor: Bogor: Unpak Press, 2018 ©2018.
- Gatlewar, Abhishekh R., Nitin K. Mandavgade, Mahesh T. Kanojiya, and Vijay N. Kalbande. 2021. "Material Selection for Rotor Blade of Vertical Axis Wind Turbine." *Materials Today: Proceedings* 46(xxxx): 8489–93. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.505>.
- Hadi Ali, Mohammed. 2013. "Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed." *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)* *www.ijmer.com* 3(5): 2978–86.
- Hassan Saeed, Hassan A., Ahmed M. Nagib Elmekawy, and Sadek Z. Kassab. 2019. "Numerical Study of Improving Savonius Turbine Power Coefficient by Various Blade Shapes." *Alexandria Engineering Journal* 58(2): 429–41. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.03.005>.
- Jonan, Ignasius. 2018. "Laporan Kinerja

- Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Tahun 2018.” : 40. <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-kementerian-esdm-tahun-2018.pdf&ved=2ahUKEwii2Kbj3sLnAhUFOsSKHcBPBZ0QFjAAegQIBBAB&usq=AOvVaw2teXH9HvKLqJP21950b5rv>.
- Kacprzak, K., and K. Sobczak. 2014. “Numerical Analysis of the Flow around the Bach-Type Savonius Wind Turbine.” *Journal of Physics: Conference Series* 530(1).
- Mahmoud, N. H., A. A. El-Haroun, E. Wahba, and M. H. Nasef. 2012. “An Experimental Study on Improvement of Savonius Rotor Performance.” *Alexandria Engineering Journal* 51(1): 19–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2012.07.003>.
- McDuffie, Erin E. et al. 2021. “Source Sector and Fuel Contributions to Ambient PM_{2.5} and Attributable Mortality across Multiple Spatial Scales.” *Nature Communications* 12(1): 1–12.
- Morshed, Khandakar Niaz, Mosfequr Rahman, Gustavo Molina, and Mahbub Ahmed. 2019. “Aerodynamic Analysis of a Three-Bladed Pivoted Savonius Wind Turbine: Wind Tunnel Testing and Numerical Simulation.” *Journal of Applied Fluid Mechanics* 12(3): 819–29.
- Mustika, Lisa. 2020. “Pengembangan Media Konversi Energi Angin Menjadi Energi Listrik.” *Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains* 3(2): 20. <https://ejurnalunsam.id/index.php/JPFS>.
- Nadhief, Muhammad Ilham, Syamsul Hadi, and Dominicus Danardono Prija Tjahjana. 2019. “Studi Eksperimental Pengaruh Variasi Sudut Blade Arc Terhadap Performa Savonius Horizontal Axis Water Turbine Tipe L Pada Aliran Dalam Pipa.” *Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika* 18(2): 35–38.
- Sahim, Kaprawi, Dyos Santoso, and Dewi Puspitasari. 2018. “Investigations on the Effect of Radius Rotor in Combined Darrieus-Savonius Wind Turbine.” *International Journal of Rotating Machinery* 2018.
- Salih Meri AR, Hamidon Bin Salleh B, Mohammed Najeh Nemah, Balasem A. Al-Quraishi, Nor Zelawati. 2019. “Performance Evaluation of Savonius Wind.” *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* 10(01): 837–46.
- Santoso, D. et al. 2020. “Effect of the Utilizing Savonius Machine as Auxiliary Starting Device on the Performance of Darrieus Machine.” *Journal of Physics: Conference Series* 1500(1).
- Sugiarti. 2015. “Gas Pencemar Udara Dan Pengaruhnya Bagi Kesehatan Manusia.” *Jurnal Chemical*: 50–58.
- Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional. 2019. “Indonesia Energy Outlook 2019.” *Journal of Chemical Information and Modeling* 53(9): 1689–99.
- Wagner, H. J. 2017. “Introduction to Wind Energy Systems.” *EPJ Web of Conferences* 148: 1–16.
- Wenehenubun, Frederikus, Andy Saputra, and Hadi Sutanto. 2015. “An Experimental Study on the Performance of Savonius Wind Turbines Related with the Number of Blades.” *Energy Procedia* 68: 297–304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259>.
- Zemamou, M., M. Aggour, and A. Toumi. 2017. “Review of Savonius Wind Turbine Design and Performance.” *Energy Procedia* 141(August 2018): 383–88.