



KARAKTERISTIK EKSOPLANET LAIK HUNI DI SISTEM MULTIPLANET

Siti Ira Yustika^{1*}, Judhistira Aria Utama², Moh. Arifin³, Dadi Rusdiana⁴

^{1,2,3,4}Departemen Pendidikan Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia

*Alamat Korespondensi : sirayustika@upi.edu

ABSTRAK

Seiring berjalannya waktu, riset mengenai eksoplanet semakin meningkat. Alhasil semakin banyak eksoplanet yang terdeteksi dan diidentifikasi berada di zona laik huni. Sistem multiplanet luar tata surya menarik untuk dipelajari lebih lanjut, sebab bisa memberikan identifikasi lebih banyak mengenai eksoplanet-eksoplanet berukuran kecil dan mengetahui apakah ada hal yang mirip dengan sistem tata surya yang juga multiplanet. Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan batas dalam dan batas luar zona laik huni optimistik (OHZ) dan zona laik huni konservatif (CHZ) beserta analisis parameter fisis eksoplanet yang ditemukan di dalamnya. Objek yang diteliti adalah 4 sistem multiplanet yang beranggotakan lebih dari 2 planet dengan temperatur bintang induknya berada di rentang 2600-7200 K. Temperatur kesetimbangan planet laik huni yang diamati berada di rentang 198,6-288 K, massa planet berada di rentang 0,388-6,8 M_{\oplus} , dan jari-jari planet berada di rentang 0,788-2,447 R_{\oplus} . Jenis planet yang ditemukan di zona laik huni adalah planet super bumi dan terestrial. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui apakah masih ada eksoplanet yang hadir di zona laik huni yang diamati.

© 2021 Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI

Kata kunci: Eksoplanet, Sistem Multiplanet, Zona Laik Huni

PENDAHULUAN

Eksoplanet merupakan planet yang berada di luar sistem tata surya. Studi mengenai pencarian planet-planet di luar tata surya ini semakin berkembang, hingga pada 5 Januari 2022 ada sebanyak 4884 eksoplanet yang telah terkonfirmasi keberadaannya (NASA, 2021a). Eksoplanet yang ditemukan terbagi atas beberapa jenis, yaitu gas raksasa, seperti-Neptunus, super bumi dan terestrial (kebumihan).

Menurut NASA, ada 5 metode yang untuk mendeteksi kehadiran eksoplanet. Pertama, metode kecepatan radial. Planet yang mengorbit bintang akan menyebabkan bintang bergoyang sehingga gelombang cahaya yang diamati terlihat berubah-ubah. Kedua, metode transit. Metode ini mirip dengan kejadian gerhana. Ketika sebuah planet melintas di antara pengamat dan bintang yang diorbitnya maka akan menghalangi sebagian cahaya bintang sehingga menjadi lebih redup dan hal ini bisa terlihat dari kurva cahaya bintangnya. Ketiga, pencitraan langsung (*direct imaging*) yaitu pengambilan gambar secara langsung dengan menghalangi cahaya bintang menggunakan filter tertentu

sehingga objek di sekitar bintang yakni eksoplanet akan terlihat lebih jelas. Keempat, pelensaan mikro gravitasi (*gravitational microlensing*), yakni cahaya terdistorsi dan berubah arah ketika dipengaruhi oleh gravitasi suatu objek besar, seperti misalnya bintang atau planet. Kelima, metode astrometri. Diambil serangkaian gambar bintang kemudian di setiap gambar, dibandingkan jarak antara bintang yang diamati terhadap bintang lain sebagai referensi. Jika bintang yang diamati terlihat berpindah posisi, maka gerakan tersebut dapat dianalisis untuk mencari tanda-tanda eksoplanet (NASA, 2019).

Penelitian mengenai eksoplanet semakin menarik dengan terdeteksinya zona laik huni dan tanda-tanda kelaikhunian planet. Perlu ditegaskan bahwa zona laik huni bukan wilayah bisa ditemukannya kehidupan, tetapi merupakan wilayah yang memungkinkan air dalam bentuk cair bisa bertahan di permukaan planet berbatu (Huang, 1960) (Kaltenegger, 2017). Setelah zona laik huni dari suatu sistem keplanetan ditemukan, barulah bisa diteliti apakah planet yang ada di dalamnya

bisa mendukung kehidupan atau tidak. Sebab keberadaan makhluk hidup tanpa dukungan beberapa zat cair sangat tidak mungkin terjadi (Huang, 1960).

Eksoplanet bisa merupakan anggota sistem keplanetan dari bintang tunggal atau bintang ganda. Untuk jenis sistem keplanetannya ada yang terdiri dari 1 planet saja dan ada juga yang terdiri dari beberapa planet (multiplanet). Sistem multiplanet ini sangat menarik untuk dipelajari dan diteliti lebih lanjut, sebab bisa lebih banyak mengidentifikasi eksoplanet-eksoplanet kecil. Apalagi jika di dalamnya terdapat planet yang memiliki kriteria laik huni. Lebih lanjut, penelitian dengan membahas zona laik huni pada sistem multiplanet belum banyak ditemukan. Secara umum lebih banyak dilakukan penelitian mengenai identifikasi tiap eksoplanet atau tiap sistem keplanetan tertentu. Maka dari itu, penelitian ini dilakukan dengan fokus untuk mengetahui bagaimana zona laik huni dari bintang dengan sistem multiplanet dan mengetahui karakteristik dari planet-planet yang ada di zona tersebut.

METODE

Data yang dibutuhkan untuk penelitian ini merupakan data sekunder yang bersumber dari laman exoplanetarchive.ipac.caltech.edu. Untuk bintang induk, data yang dibutuhkan adalah radius, fluks, dan temperatur efektif. Perhitungan zona laik huni menggunakan persamaan jarak zona laik huni yang disajikan oleh Kopparapu dkk. (2014):

$$S_{\text{eff}} = S_{\text{eff}\odot} + aT_{\star} + bT_{\star}^2 + cT_{\star}^3 + dT_{\star}^4 \quad (1)$$

$$d_{\text{HZ}} = \left(\frac{L_{\star}/L_{\odot}}{S_{\text{eff}}} \right)^{0.5} \text{ au} \quad (2)$$

Dengan S_{eff} adalah fluks bintang, $S_{\text{eff}\odot}$ adalah fluks matahari, $T_{\star} = T_{\text{eff}} - 5780 \text{ K}$, L_{\star} adalah luminositas bintang dan L_{\odot} adalah luminositas matahari. Koefisien $S_{\text{eff}\odot}$, a , b , c , dan d diberikan oleh Kopparapu, dkk (2014) (Kopparapu dkk., 2014).

Jarak zona laik huni terdiri dari 2 jenis yaitu zona laik huni konservatif dan zona laik huni optimistik. Zona laik huni

konservatif merupakan efek dari gas CO_2 dan uap H_2O . Batas luarnya (*outer habitable zone* (OHZ)) didefinisikan sebagai tempat di mana kondensasi dan hamburan oleh CO_2 melebihi kapasitas rumah kacanya, sehingga disebut batas maksimum rumah kaca. Sedangkan batas dalamnya (*inner habitable zone* (IHZ)) didefinisikan sebagai keadaan saat suhu permukaan rata-rata melebihi titik kritis air, memicu keadaan rumah kaca yang tak terkendali yang menyebabkan air menguap dengan cepat dalam rentang waktu yang sangat singkat (menguap dalam bentuk H_2O) (Kaltenegger, 2017). Untuk zona laik huni optimistik, batas dalam (IHZ) zona laik huninya didasarkan pada batas Venus awal (*recent Venus*) atas dasar bahwa air dalam bentuk cair tidak ada di Venus setidaknya selama 1 giga tahun dan batas keberadaan air di permukaan planet dilihat sejak awal pembentukan planet. Sedangkan untuk OHZ optimistik didasarkan pada wilayah Mars awal (*early Mars*) yaitu wilayah yang padat CO_2 (kaya akan CO_2) yang merupakan wilayah yang cukup hangat untuk air dalam bentuk cair bisa mengalir di permukaan planet (Kopparapu dkk., 2013).

Pengambilan data sekunder selanjutnya kembali dilakukan untuk mengetahui karakteristik eksoplanet melalui parameter fisis tiap planetnya. Data yang dikumpulkan yaitu massa, radius, periode orbit, temperatur kesetimbangan, dan sumbu semimayor. Kemudian dilakukan kajian literatur untuk mengetahui kondisi eksoplanet lebih lanjut.

Sistem keplanetan yang diteliti adalah 4 sistem multiplanet yang beranggotakan lebih dari 2 planet yaitu TOI-700 dan Trapist-1 yang merupakan bintang dengan tipe spektrum M, serta Kepler-62 dan Kepler-298 yang merupakan bintang dengan tipe spektrum K. Metode analisis dilakukan secara deskriptif, yaitu memberikan deskripsi detail mengenai suatu masalah dengan menggunakan bahasa subjektif maupun objektif (Wisnu dkk., 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan zona laik huni dari konservatif (CHZ) dan zona laik huni persamaan (2) memberikan batas dalam optimistik (OHZ) dan batas luar dari zona laik huni

Tabel 1. Hasil Perhitungan Batas-batas Zona Laik Huni

Nama Bintang	Batas Dalam CHZ (SA)	Batas Luar CHZ (SA)	Batas Dalam OHZ (SA)	Batas Luar OHZ (SA)
TOI-700	0,158	0,307	0,125	0,324
Trappist-1	0,024	0,049	0,019	0,051
Kepler-62	0,463	0,840	0,365	0,886
Kepler-298	0,351	0,650	0,277	0,686

Bintang-bintang di atas memiliki planet-planet yang mengorbitnya. Dengan mengetahui data sumbu semimayor planet (jarak planet terhadap bintang), maka bisa diidentifikasi planet mana saja yang berada di dalam zona laik huni.

Tabel 2. Identifikasi Eksoplanet yang Berada dalam Zona Laik Huni

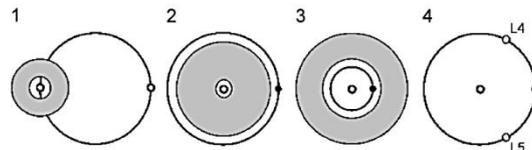
Nama Planet	Sumbu semi mayor (SA)	Zona Laik Huni berdasarkan CHZ	Zona Laik Huni berdasarkan OHZ
TOI-700 b	0,0677	Tidak	Tidak
TOI-700 c	0,0929	Tidak	Tidak
TOI-700 d	0,1633	Ya	Ya
Trappist-1 b	0,01154	Tidak	Tidak
Trappist-1 c	0,0158	Tidak	Tidak
Trappist-1 d	0,02227	Tidak	Ya
Trappist-1 e	0,02925	Ya	Ya
Trappist-1 f	0,03849	Ya	Ya
Trappist-1 g	0,04683	Ya	Ya
Trappist-1 h	0,06189	Tidak	Tidak
Kepler-62 b	0,0553	Tidak	Tidak
Kepler-62 c	0,0929	Tidak	Tidak
Kepler-62 d	0,12	Tidak	Tidak
Kepler-62 e	0,427	Tidak	Ya
Kepler-62 f	0,718	Ya	Ya
Kepler-298 b	0,08	Tidak	Tidak
Kepler-298 c	0,136	Tidak	Tidak
Kepler-298 d	0,305	Tidak	Ya

Zona laik huni sistem multiplanet di atas tidak seperti zona laik huni sistem tata surya yang hanya dihuni satu planet saja (yakni bumi). Tetapi berisi satu atau beberapa planet .

Pada TOI-700, zona laik huninya berada di luar orbit planet yang memiliki massa terbesar dan merupakan zona paling luar dari sistem keplanetan. Dalam zona tersebut hanya terdapat 1 planet yaitu TOI-700 d. Untuk Trappist-1, zona laik huninya diisi oleh beberapa planet yaitu Trappist-1 d, Trappist-1 e, Trappist-1 f dan Trappist1-g. Zona laik huni Kepler-62 tidak berada di daerah terluar, sebab Trappist-1 h memiliki jarak paling jauh dari bintang tetapi tidak masuk dalam zona laik huni.

Untuk sistem Kepler-62, zona laik huninya berada di zona paling luar sistem keplanetan, yang di dalamnya ada Kepler-62 e dan Kepler-62 f. Dan untuk Kepler-298, zona laik huninya juga berada di zona paling luar sistem keplanetan dan hanya dihuni oleh Kepler-298 d.

Skema zona laik huni oleh Funk dkk. (2009) memberikan 4 jenis zona laik huni yaitu zona laik huni pada planet ganda, zona laik huni tipe dalam (zona laik huni berada di antara bintang dan planet gas raksasa), zona laik huni tipe luar (zona laik huni berada di luar orbit planet gas raksasa, dan zona laik huni planet troya (planet gas raksasa berpindah sendiri ke zona laik huni yang ada) (Funk dkk., 2009).



Gambar 1. Tipe zona laik huni (Funk dkk., 2009)

Karena tidak ditemukan adanya eksoplanet gas raksasa pada semua sistem keplanetan yang diamati, maka zona laik huni keempat sistem multiplanet tersebut tidak memenuhi skema di atas.

Steven & Gaudi mengkategorikan eksoplanet berdasarkan massanya, yaitu

terrestrial ($0,1M_{\oplus}$ - $2M_{\oplus}$), super-Bumi ($2M_{\oplus}$ - $10M_{\oplus}$), dan seperti-Neptunus ($10M_{\oplus}$ - $100M_{\oplus}$) (Stevens & Gaudi, 2013) sehingga bisa diketahui jenis eksoplanet berdasarkan massanya yakni pada tabel 3 berikut.

Tabel 3. Parameter Fisis Planet di Zona Laik Huni

Nama Planet	Jenis Planet	Massa Planet (M_{\oplus})	Radius Planet (R_{\oplus})	Periode Orbit (hari bumi)	Tempe-ratur Kesetim-bangan (K)
TOI-700 d	Super Bumi	2,26	1,144	37,426475	268,8
Trappist-1 d	Terrestrial	0,388	0,788	4,049219	288
Trappist-1 e	Terrestrial	0,692	0,92	6,101013	251,3
Trappist-1 f	Super Bumi	1,039	1,045	9,20754	219
Trappist-1 g	Super Bumi	1,321	1,129	12,35245	198,6
Kepler-62 e	Super Bumi	4,5	1,61	122,4	270±15
Kepler-62 f	Super Bumi	2,8	1,41	267,3	208±11
Kepler-298 d	Super Bumi	6,8	2,447	77,5	277

Dilihat dari ukuran radius dan massa planetnya, eksoplanet berjenis terestrial dan super Bumi, yang ukuran jari-jari dan massanya mendekati ukuran jari-jari dan massa bumi. Periode orbit tiap eksoplanet lebih pendek daripada periode orbit bumi karena jaraknya terhadap bintang induknya pun sangat pendek jika dibandingkan dengan jarak bumi-matahari. Temperatur kesetimbangan setiap planet tidak jauh berbeda dibanding temperatur kesetimbangan bumi, yaitu sekitar 255 K (Mihos, 2019).

Planet terestrial adalah planet berbatu, terdiri dari batuan, silikat, air dan/atau karbon. Secara umum, planet terestrial memiliki komposisi yang didominasi oleh batuan atau besi, dan permukaannya padat atau cair. Planet super Bumi memiliki komposisi planet yang bisa terdiri dari air, es, bahkan gas (NASA, 2021b)(NASA, 2021c).

Karbon dioksida (CO_2) sangat lazim berada di planet berbatu. Karbon dioksida juga merupakan alat yang baik untuk menyelidiki atmosfer sampai ke kedalaman berbeda (Rothman dkk., 2009). Untuk mengetahui kondisi atmosfer di TOI-700, Dong dkk (2020) membuat model magnetohidrodinamik untuk mensimulasikan angin bintang dan tingkat atmosfer melepaskan diri (*atmospheric escape*). Laju pelepasan ion pada atmosfer TOI-700 d berpotensi beberapa kali lipat lebih tinggi daripada planet-planet tata surya bagian dalam. Meskipun demikian, TOI-700 d tetap mampu mempertahankan tekanan atmosfer sebesar 1 bar selama 1 giga tahun untuk wilayah tertentu. Bagian TOI 700 d yang tidak termagnetisasi dengan 1 bar atmosfer seperti-Bumi dapat hilang lebih cepat (<1 gigatahun), sedangkan TOI-700 d yang tidak termagnetisasi dengan atmosfer dan didominasi CO_2 1 bar dapat bertahan selama miliaran tahun (Dong dkk., 2020). Dari sini, dapat diketahui bahwa TOI-700 d merupakan planet batuan, dan bisa mengandung air di permukaannya, sebab jika suatu wilayah kaya akan CO_2 maka daerah tersebut termasuk *early Mars* yang

bisa mempertahankan air (Kopparapu dkk., 2013).

Untuk planet-planet dari Trappist-1, Grimm, dkk (2018) memberikan bahwa Trappist-1 e memiliki susunan yang kaya batuan di dalamnya. Trappist-1 d, f, g, dan h memiliki selubung yang mudah menguap dalam bentuk atmosfer tebal, lautan, atau es. Densitas planet-planet Trappist-1 bernilai $0,6-1,0\rho_{\oplus}$ (Grimm dkk., 2018).

Untuk Kepler-298 d, densitas rata-rata planetnya adalah $2,8203\pm 4,0164 \text{ g/cm}^3$. Pada awalnya planet ini diperkirakan sebagai planet yang mirip bumi. Ternyata, planet ini bertipe planet air dengan atmosfer gas yang tebal (Paris Observatory, 2019) (Rowe dkk., 2014).

Kaltenegger, dkk (2013) membuat definisi terhadap 2 tipe planet air untuk Kepler-62 e dan Kepler-62 f dengan kondisi yang pertama, seluruh planet terdiri dari air. Dan yang kedua, jika planetnya merupakan planet batuan, maka pada atmosfernya terjadi siklus CO_2 menggunakan klatrat yang mengindikasikan adanya air di planet tersebut (Kaltenegger dkk., 2013). Kepler-62 e dan Kepler-62 f termasuk ke dalam jenis super Bumi sehingga tipe planet yang sesuai untuk terjadi adalah tipe yang kedua.

Pada eksoplanet-eksoplanet tersebut juga belum ada tanda adanya eksobulan dengan material berbatu yang memiliki kemungkinan laik huni seperti halnya Europa (bulan dari planet Jupiter) (Greenberg dkk., 2000).

PENUTUP

Seluruh sistem multiplanet yang diteliti memiliki zona laik huni yang dihuni oleh satu atau beberapa eksoplanet. Jenis planet yang berada di zona laik huninya yaitu terestrial dan super Bumi dengan rentang massa planet $0,388-6,8 M_{\oplus}$, dan radius planet berada di rentang $0,788-2,447 R_{\oplus}$. Serta temperatur kesetimbangan planet berada di rentang 198,6-288 K. Semua eksoplanet yang berada di zona laik huni memiliki kemungkinan bahwa air bertahan di lingkungannya. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui apakah di

dalam zona laik huni dari sistem keplanetan yang diamati masih terdapat planet lain yang belum terdeteksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam proses pembuatan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Dong, C., Jin, M., & Lingam, M. (2020). Atmospheric Escape From TOI-700 d: Venus versus Earth Analogs. *The Astrophysical Journal*, 896(2), L24. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab982f>
- Funk, B., Schwarz, R., Pilat-Lohinger, E., Süli, Á., & Dvorak, R. (2009). Stability of inclined orbits of terrestrial planets in habitable zones. *Planetary and Space Science*, 57(4), 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.06.017>
- Greenberg, R., Geissler, P., Tuffs, B. R., & Hoppa, G. V. (2000). Habitability of Europa's crust: The role of tidal-tectonic processes coupled time variability of orbits and tides was reviewed by. *J. Geophys. Res.*, 105(E7), 17551–17562.
- Grimm, S. L., Demory, B., Gillon, M., Dorn, C., Agol, E., Burdanov, A., Delrez, L., Sestovic, M., Triaud, A. H. M. J., Turbet, M., Bolmont, É., Caldas, A., Wit, J. De, Jehin, E., Leconte, J., Heng, K., Hernandez, D. M., Ingalls, J. G., Lederer, S., ... Queloz, D. (2018). *Astrophysics The nature of the TRAPPIST-1 exoplanets*. 68.
- Huang, S.-S. (1960). THE SIZES OF HABITABLE PLANETS. *The Astronomical Society of the Pacific*, 72, 489–493. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/127586>
- Kaltenegger, L. (2017). How to Characterize Habitable Worlds and Signs of Life. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 55, 433–485. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122238>
- Kaltenegger, L., Sasselov, D., & Rugheimer, S. (2013). Water-planets in the habitable zone: Atmospheric chemistry, observable features, and the case of kepler-62e and -62f. *Astrophysical Journal Letters*, 775(2). <https://doi.org/10.1088/2041-8205/775/2/L47>
- Kopparapu, R. K., Ramirez, R., Kasting, J. F., Eymet, V., Robinson, T. D., Mahadevan, S., Terrien, R. C., Domagal-goldman, S., Meadows, V., & Deshpande, R. (2013). *HABITABLE ZONES AROUND MAIN-SEQUENCE STARS: NEW ESTIMATES*. 131(1993). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/2/131>
- Kopparapu, R. K., Ramirez, R. M., Schottelkotte, J., Kasting, J. F., Domagal-goldman, S., & Eymet, V. (2014). *HABITABLE ZONES AROUND MAIN-SEQUENCE STARS: DEPENDENCE ON PLANETARY MASS*. 29, 0–5. <https://doi.org/10.1088/2041-8205/787/2/L29>
- Mihos, C. (2019). *Equilibrium Temperatures of Planets*. Case Western Reserve University. <http://burro.case.edu/Academics/Astr221/SolarSys/equiltemp.html>
- NASA. (2019). *Exoplanet Exploration - Planets beyond our solar system* (hal. 1). <https://exoplanets.nasa.gov/>
- NASA. (2021a). *Exoplanet Catalog | Discovery – Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. <https://exoplanets.nasa.gov/discovery/exoplanet-catalog/>
- NASA. (2021b). *Super-Earth | Planet Types – Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/super-earth/>

- NASA. (2021c). *Terrestrial | Planet Types – Exoplanet Exploration: Planets Beyond our Solar System*. <https://exoplanets.nasa.gov/what-is-an-exoplanet/planet-types/terrestrial/>
- Paris Observatory. (2019). *The Extrasolar Planet Encyclopaedia — Catalog Listing*. <http://exoplanet.eu/catalog/>
- Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Benner, D. C., Bernath, P. F., Birk, M., Boudon, V., Brown, L. R., Campargue, A., Champion, J. P., Chance, K., Coudert, L. H., Dana, V., Devi, V. M., Fally, S., Flaud, J. M., Gamache, R. R., Goldman, A., Jacquemart, D., ... Vander Auwera, J. (2009). The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 110(9–10), 533–572. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2009.02.013>
- Rowe, J. F., Bryson, S. T., Marcy, G. W., Lissauer, J. J., Jontof-Hutter, D., Mullally, F., Gilliland, R. L., Issacson, H., Ford, E., Howell, S. B., Borucki, W. J., Haas, M., Huber, D., Steffen, J. H., Thompson, S. E., Quintana, E., Barclay, T., Still, M., Fortney, J., ... Geary, J. (2014). Validation of kepler's multiple planet candidates. III. light curve analysis and announcement of hundreds of new multi-planet systems. *Astrophysical Journal*, 784(1). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/784/1/45>
- Stevens, D. J., & Gaudi, B. S. (2013). A Posteriori Transit Probabilities. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(930), 933–950. <https://doi.org/10.1086/672572>
- Wisnu, J., Santoso, H. budi, Purbarani, S. C., & dkk. (2015). *Panduan Penulisan Artikel Ilmiah [buku online]*. August 2016, 22–23, 34–36. <https://www.researchgate.net/publication/305769068>