



Peran Struktur Geometris dan Fenomena Difraksi Kisi pada Efisiensi Terbang Sayap Kupu-Kupu (*Appias lyncida andrea*)

Salma Zhafira Ramadhan^{1*}, Fahma Mutia Sari¹, Arin Belastiningrum¹, dan Agus Yulianto¹

¹Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang
Kampus UNNES Sekaran, Gunungpati, Semarang, 50229, Jawa Tengah, Indonesia

* Corresponding author. E-mail : slmzhafira@students.unnes.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara geometri, distribusi warna, dan pola difraksi pada sayap kupu-kupu *Appias lyncida andrea* serta implikasinya terhadap fungsi aerodinamis dan adaptasi ekologis. Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika, FMIPA Universitas Negeri Semarang, dengan metode pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop digital CCD dan analisis pola difraksi menggunakan laser merah. Pengamatan difokuskan pada struktur sisik sayap, termasuk panjang dan lebar celah antar sisik, serta pola difraksi yang dihasilkan oleh mikrostruktur alami pada permukaan sayap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang celah antar sisik yang lebih besar dan lebar celah yang kecil berkontribusi dalam mengurangi hambatan udara, mendistribusikan tekanan secara merata, dan meningkatkan efisiensi penerbangan. Selain itu, struktur mikro pada sisik sayap berperan sebagai kisi difraksi alami dengan jumlah sekitar 10.870 elemen per meter, yang mampu menghasilkan pola interferensi cahaya yang jelas. Struktur ini tidak hanya mendukung efisiensi aerodinamis tetapi juga mempengaruhi tampilan visual sayap. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa struktur pada

INFO ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diserahkan Januari 2025

Diterima Juni 2025

Tersedia secara online Juni 2025

Tanggal Publikasi 30 Juni 2025

Kata Kunci:

Aerodinamika; Difraksi Cahaya;
Geometri Sayap; Mikrostruktur
Sisik; Stabilitas Penerbangan

sayap kupu-kupu tidak hanya memiliki prinsip matematis yang rumit tetapi juga fungsi yang signifikan, yang berpotensi menjadi inspirasi dalam pengembangan teknologi aerodinamis di masa depan.

ABSTRACT

This study aims to analyze the relationship between geometry, color distribution, and diffraction patterns on the wings of Appias lyncida andrea butterflies and their implications for aerodynamic function and ecological adaptation. The research was conducted at the Physics Laboratory, FMIPA, Semarang State University, using microstructure observation using a CCD digital microscope and diffraction pattern analysis using a red laser. Observations focused on the structure of the wing scales, including the length and width of the gap between scales, as well as the diffraction patterns produced by the natural microstructure on the wing surface. The results show that a larger gap length between scales and a small gap width contribute to reducing air resistance, distributing pressure evenly, and improving flight efficiency. In addition, the microstructure on the wing scales acts as a natural diffraction grating with about 10,870 elements per meter, which is capable of producing clear light interference patterns. This structure not only supports aerodynamic efficiency but also affects the visual appearance of the wing. The results of this study show that the structures on butterfly wings not only have complicated mathematical principles but also significant functions, which have the potential to be an inspiration in the development of aerodynamic technologies in the future

ARTICLE INFO

Article History:

Submitted January 2025

Accepted June 2025

First Available online June 2025

Publication Date June 30, 2025

Keyword:

Aerodynamics; Light Diffraction;

Wing Geometry; Scale

Microstructure; Flight Stability

1. Pendahuluan

Kupu-kupu merupakan salah satu kelompok serangga yang memiliki keanekaragaman bentuk, warna, dan pola sayap yang unik [1]. *Appias lyncida andrea* adalah salah satu spesies kupu-kupu yang menarik perhatian para ilmuwan karena warna dan pola sayapnya yang unik. Sayap kupu-kupu tidak hanya memiliki bentuk yang indah, tetapi juga memiliki kompleksitas struktural yang memengaruhi kemampuan mereka untuk terbang, mengontrol suhu, dan berinteraksi dengan lingkungannya [2]. Oleh karena itu, untuk memahami hubungan antara geometri, pola warna, dan fungsi biologis, sangat penting untuk melakukan analisis matematis terhadap struktur sayap kupu-kupu.

Bentuk sayap, distribusi warna, dan keteraturan pola adalah beberapa elemen morfologi kupu-kupu yang telah dipelajari dalam beberapa dekade terakhir melalui penggunaan teknik matematis dan komputasi [3,4]. Analisis seperti ini dapat membantu menjelaskan bagaimana seleksi alam membentuk desain alam yang efisien dan bagaimana fungsi aerodinamis dan mekanisme pertahanan dapat dioptimalkan. Sayap spesies *Appias Lyndica Andrea* menarik untuk analisis lebih lanjut karena pola geometri yang simetris dan variasi warnanya, yang berfungsi sebagai kamuflase

dan atraksi seksual [5,6]. Tak hanya itu, fenomena difraksi pada sayap kupu-kupu memberikan fenomena dimana cahaya berinteraksi dengan permukaan sayap, yang mengubah sifat optik dan mengoptimalkan aliran udara saat terbang [7].

Penelitian ini, berkonsentrasi pada geometri sayap, distribusi warna, dan keteraturan pola difraksi kupu-kupu *Appias Lyndica Andrea*. Untuk memahami bagaimana bentuk sayap berkorelasi dengan fungsi aerodinamisnya, metode seperti geometri fraktal, analisis simetri, perhitungan rasio luas sayap, serta kisi difraksi terhadap panjang tubuh digunakan. Dari penelitian ini diharapkan dapat menemukan prinsip-prinsip matematis yang mendasari desain sayap kupu-kupu dan implikasinya terhadap kinerja terbang dan adaptasi ekologis spesies ini dengan menggunakan metode ini.

2. Metode Penelitian

Metode yang dilakukan adalah pengolahan data gaya. Penelitian dilakukan pada bulan Oktober sampai Desember 2024 di Universitas Negeri Semarang, Laboratorium Fisika, FMIPA. Sampel kupu kupu yang digunakan pada penelitian ini adalah *Appias Lyndica Andrea*. Pencarian kupu kupu dilakukan pada saat siang hari kemudian dimasukkan ke dalam jar hingga kupu-kupu mati.

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini, yaitu jaring, jar, kertas, insect pin, double tip, kaca preparat, mikroskop digital CCD, kisi transmisi, meteran, layar tampilan, *handphone* untuk mengambil gambar, laser merah, dan menggunakan lebar celah 100 garis/mm.

2.1. Pengamatan Mikrostruktur Sisik Sayap

Pengamatan dilakukan pada bagian kecil sisik sayap kupu-kupu *Appias Lyndica Andrea* di sekitar vena atas dan vena bawah [8]. Pengamatan sisik sayap kupu kupu dilakukan Laboratorium Pengembangan Fisika di FMIPA UNNES.

Bagian sisik sayap yang ingin diamati digunting dengan menggunakan gunting serangga dan insect pin serangga [9]. Bagian sayap tersebut kemudian ditaruh di atas kaca preparat. Bagian sisi sayap yang diambil yaitu bagian vena atas dan bawah yang berwarna gelap. Kemudian di dokumentasikan sebagai kelengkapan informasi sisik sayap kupu kupu serta diukur panjang serta lebar menggunakan mikroskop digital CCD dan diolah dengan menggunakan microsoft excel.

2.2. Pengamatan Kisi Difraksi Sayap Kupu-kupu

Kisi difraksi memiliki celah dengan jarak yang sama menjadi dasar dalam menggambarkan struktur geologi bawah

permukaan. Sebuah pola interferensi terang dan gelap akan terbentuk oleh cahaya yang melewati celah. Ketika perbedaan jalur antara dua berkas cahaya lebih besar dari panjang gelombang laser maka titik terang akan nampak [10]. Cahaya monokromatik akan menciptakan interferensi ketika melewati celah yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi panjang gelombang cahaya tersebut [11].

Percobaan difraksi cahaya dengan sayap kupu kupu dilakukan dengan mempersiapkan kisi yang akan diamati, Menyusun peralatan yang digunakan, dan menghubungkannya dengan sumber tegangan hingga mengamati pola gelap terang yang terbentuk serta mengambil dokumentasi menggunakan kamera *handphone*

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Struktur Geometri Sayap Kupu-Kupu *Appias Lyndica Andrea*

Geometri sayap kupu-kupu *Appias lyncida andrea* merupakan kombinasi struktur simetris dan pola mikroskopis yang berfungsi untuk mendukung kemampuan terbang dan menciptakan efek visual tertentu. Sayap kupu-kupu umumnya berbentuk memanjang dan simetris secara bilateral, dengan dua sayap di setiap sisi tubuh. Struktur dasar dari sayap ini terdiri dari membran tipis yang diperkuat oleh vena-vena yang menyebar secara radial dari pangkal sayap ke ujung. Vena-vena ini tidak hanya

memberikan kekuatan pada sayap tetapi juga membantu dalam kontrol pergerakan selama terbang. Pada skala makroskopis, bentuk

sayap ini dirancang untuk meminimalkan hambatan udara sekaligus memungkinkan kupu-kupu untuk bermanuver dengan presisi.



(a)

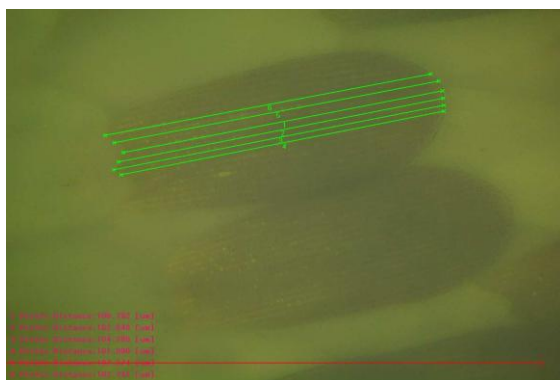


(b)

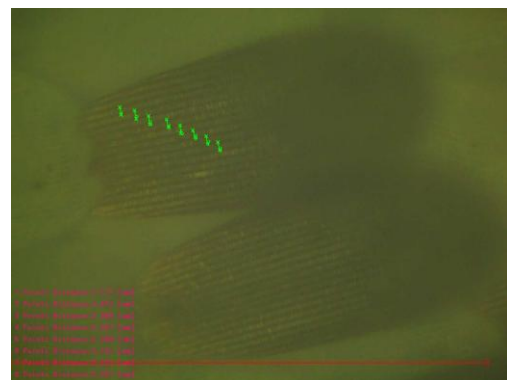
Gambar 1. (a) Kupu-kupu *Appias lyncida andrea* (b) Hasil mikroskop sayap kupu-kupu *Appias lyncida andrea* dengan perbesaran 400x

Sayap kupu-kupu terdiri dari ribuan sisik mikroskopis yang tersusun secara teratur dan bertumpuk. Sayap kupu-kupu ini menciptakan pola-pola geometris [12]. Pada **Gambar 1. (b)** terlihat bahwa struktur

sisiknya memiliki bentuk oval atau elips yang beraturan dengan orientasi yang saling bertumpukan. Sisik-sisik pada sayap kupu-kupu tersusun dalam pola saling tumpang tindih (*overlapping*) [13].



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Hasil pengamatan panjang celah sisik sayap kupu-kupu pada perbesaran 2000x (b) Hasil pengamatan lebar celah sisik sayap kupu-kupu pada perbesaran 2400x

Struktur sisik sayap kupu-kupu memengaruhi mekanisme penghasilan warnanya [9]. Bentuk sisik dan jumlah gerigi pada tiap sisik sayap kupu-kupu berbeda-

Dari **Gambar 2.** dapat diketahui data panjang celah dan lebar celah sisik pada sayap kupu-kupu sebagai berikut.

Tabel 1. Data Pengukuran Panjang Celah dan Lebar Celah Sisik pada Sayap Kupu-Kupu *Appias lyncida andrea* (μm)

No	Panjang celah pada sisik (μm)	Rata-rata panjang celah pada sisik (μm)	Lebar celah pada sisik (μm)	Rata-rata lebar celah pada sisik (μm)
1	100,792	102,41	2,171	2,27
2	102,648		2,413	
3	104,285		2,394	
4	101,990		2,327	
5	102,374		2,269	
6	102,374		2,141	

Hubungan antara lebar dan panjang celah antar sisik pada sayap kupu-kupu *Appias lyncida andrea* dapat dianalogikan dengan persamaan umum elips sebagai berikut.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

dimana a = sumbu mayor atau panjang elips (m), b = sumbu minor atau lebar elips (m), serta x dan y = koordinat titik pada elips (m).

Lebar celah yang kecil (2,27 μm) antara sisik-sisik membantu mengurangi gesekan udara yang terjadi di atas permukaan sayap. Celah-celah kecil memungkinkan udara mengalir dengan lebih lancar di antara sisik-sisik, meminimalkan turbulensi yang

beda dengan lebar yang konstan. Struktur sisik berkorelasi dengan pigmentasi yang dapat memberikan warna cerah atau kelam.

berpotensi mengganggu stabilitas terbang. Dengan demikian, sisik-sisik ini berperan sebagai pengatur aliran udara mikro yang berfungsi seperti aliran laminar pada permukaan sayap pesawat.

Panjang celah yang lebih besar (102,41 μm) antara sisik-sisik memungkinkan distribusi tekanan udara yang lebih merata di sepanjang sayap. Kombinasi lebar celah yang sempit dan panjang yang lebih besar memungkinkan sisik-sisik berfungsi sebagai "riblets" atau alur-alur kecil yang ada di permukaan, serupa dengan teknologi aerodinamis yang digunakan pada pesawat untuk mengurangi hambatan udara. Ini meningkatkan efisiensi terbang kupu-kupu dengan mengurangi drag dan memungkinkan

kupu-kupu untuk bermanuver dengan energi yang lebih sedikit.

Dengan celah panjang antar sisik yang konsisten, sayap kupu-kupu dapat menciptakan efek permukaan yang lebih halus yang mendukung pengendalian yang lebih baik selama penerbangan. Kupu-kupu dapat dengan mudah melakukan manuver kompleks, seperti berbelok cepat atau terbang di tempat, dengan bantuan pengaturan celah sisik yang teratur ini. Celah yang lebih panjang memastikan bahwa sayap tetap cukup kaku untuk menahan gaya angin sambil tetap fleksibel untuk beradaptasi dengan perubahan aliran udara di sekitarnya.

Secara keseluruhan, lebar dan panjang celah antar sisik pada sayap kupu-kupu *Appias lyncida andrea* berfungsi dalam memaksimalkan efisiensi terbang, mengurangi gesekan udara, dan memungkinkan manuver yang lebih lincah di udara. Struktur ini menunjukkan bagaimana evolusi bentuk sayap pada kupu-kupu tidak hanya berfungsi untuk keindahan visual, tetapi juga untuk mendukung fungsi aerodinamis.

3.2. Kisi Difraksi pada Sayap Kupu-Kupu *Appias lyncida andrea*

Difraksi cahaya adalah fenomena yang terjadi ketika gelombang cahaya melewati celah-celah kecil, seperti kisi difraksi yang menyebabkan gelombang tersebut menyebar dan membentuk pola interferensi [14].

Cahaya yang dapat melewati kisi mengalami proses difraksi yang menghasilkan interferensi konstruktif dan destruktif [15]. Hal ini menciptakan panjang gelombang tertentu. Dalam percobaan ini, sayap kupu-kupu digunakan sebagai media kisi difraksi. Sayap kupu-kupu memiliki mikrostruktur alami yang memungkinkan terjadinya difraksi cahaya, mirip dengan kisi difraksi buatan. Struktur mikro pada sayap kupu-kupu *Appias lyncida andrea* terdiri dari susunan sisik atau serat yang berperan sebagai kisi dengan jarak antar garis yang sangat kecil, memungkinkan terjadinya difraksi terhadap cahaya tampak. Persamaan umum difraksi kisi pada pola terang adalah sebagai berikut:

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (2)$$

$$\frac{p \cdot d}{L} = n\lambda \quad (3)$$

$$d = \frac{1}{N} \quad (4)$$

di mana d = jarak antar garis kisi (m), θ = sudut difraksi (rad), n = orde pola difraksi ($n=1, 2, 3, \dots$, dst), λ = panjang gelombang cahaya (m), p = jarak antara dua garis terang atau gelap (m), L = jarak antara kisi difraksi dan layar (m), dan N = jumlah garis kisi per satuan panjang (garis/m) .

Sebelum menghitung banyaknya kisi pada sayap kupu-kupu maka dihitung nilai panjang gelombang dari laser merah yang digunakan. Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan dengan menembakkan laser merah pada layar kisi 100 cm^{-1} dengan jarak

layar ke kisi sepanjang 70 cm diperoleh nilai $p = 4,7$ cm, sehingga pada $n = 1$:

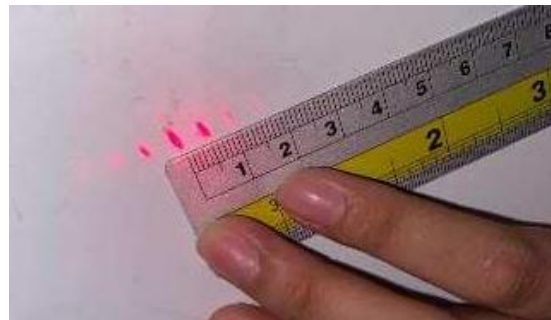
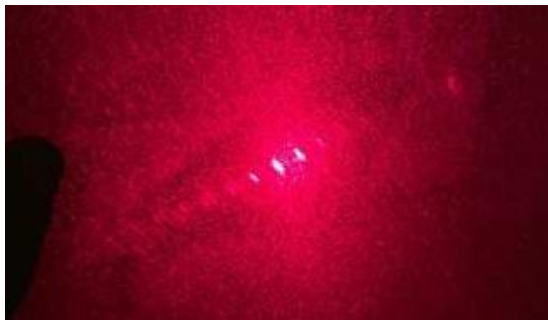
$$n\lambda = \frac{p \cdot d}{L}$$

$$1 \times \lambda = \frac{0,046 \cdot 1 \times 10^{-5}}{0,7}$$

$$\lambda = 6,571 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda = 657,1 \text{ nm}$$

Setelah menghitung panjang gelombang, langkah selanjutnya adalah menentukan nilai N , yaitu jumlah garis per satuan panjang pada kisi difraksi alami dari sayap kupu-kupu.



Gambar 3. Pengukuran kisi difraksi pada sayap kupu-kupu *Appias lyncida andrea*

Berdasarkan **Gambar 3.** diketahui bahwa jarak antara dua garis terang adalah 0,5 cm atau 0,005 m, sehingga berdasarkan persamaan 3 :

$$\frac{p \cdot d}{L} = n\lambda$$

$$\frac{0,005 \cdot d}{0,7} = 1 \times 6,571 \times 10^{-7}$$

$$d = 9,1994 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Kemudian substitusikan nilai d pada persamaan 4,

$$d = \frac{1}{N}$$

$$9,1994 \times 10^{-5} = \frac{1}{N}$$

$$N \approx 10870,27 \text{ kisi}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, nilai N yang merupakan jumlah garis per meter diperoleh sekitar 10.870 garis per meter. Ini berarti bahwa sayap kupu-kupu memiliki sekitar 10.870 elemen difraksi (sisik) per meter yang tersebar di permukaannya. Nilai ini menunjukkan bahwa struktur mikro pada sayap kupu-kupu sangat halus dan cukup presisi untuk menghasilkan pola difraksi yang jelas.

4. Simpulan

Pola sisik-sisik sayap yang bertumpang dan saling tumpang tindih membantu mengurangi hambatan udara dan memungkinkan mereka untuk manuver

dengan lebih tepat. Sekitar 2,27 μm lebar celah antar sisik mengurangi turbulensi, dan panjang celah (102,41 μm) mendistribusikan tekanan secara merata. Struktur ini meningkatkan kelincahan dan stabilitas penerbangan. Fungsi sisik, yang mirip dengan alur mikro, yang ditemukan pada permukaan sayap pesawat, memungkinkan kupu-kupu bergerak dengan menggunakan energi yang sangat sedikit. Dengan sekitar 10.870 elemen difraksi per meter, struktur mikro sisik sayap memiliki efek difraksi cahaya, menunjukkan presisi mikrostruktur yang tinggi yang membantu aerodinamika dan memberikan efek visual.

5. Referensi

1. Chazot, N., Panara, S., Zilbermann, N., Blandin, P., Le Poul, Y., Cornette, R., Elias, M., & Debat, V. (2016). Morpho morphometrics: Shared ancestry and selection drive the evolution of wing size and shape in Morpho butterflies. *Evolution*, 70(1), 181–194.
2. Dudley, R. (2002). *The biomechanics of insect flight : form, function, evolution*. Princeton University Press.
3. Nijhout, H. F., & Sekimura, T. (2017). *Diversity and Evolution of Butterfly Wing Patterns: An Integrative Approach*. Springer Singapore.
4. Nuraini, U., Widhiono, I., & Riwidharso, E. (2020). *Keanekaragaman dan Kelimpahan Kupu-Kupu (Lepidoptera : Rhopalocera) di Cagar Alam Bantarbolang, Jawa Tengah*. 2, 157–164.
5. Brakefield, P. M., & French, V. (1995). Eyespot Development on Butterfly Wings: The Epidermal Response to Damage. *Developmental Biology*, 168(1), 98–111.
6. Rohman, F., Efendi, M. A., & Andrini, L. R. (2019). *Bioteknologi Kupu-Kupu*. Universitas Negeri Malang.
7. Chahyadi, E., Roslim, D. I., & Wahyuningsih, S. (2021). Inventarisasi Kupu-Kupu Rhopalocera Pada Dua Kawasan Berbeda Di Provinsi Riau. *Bio-Lectura : Jurnal Pendidikan Biologi*, 8(2), 1–11. <https://doi.org/10.31849/bl.v8i2.7684>
8. Jiang, L., Gu, Z., Song, Z., & Liu, D. (2020). Structural color and aerodynamics of butterfly wings: Multifunctional design principles. *Advanced Optical Materials*, 8(7), 1902117.
9. Sumah, A. S. W. (2019). Struktur

- Sisik Sayap Kupu-Kupu Superfamili Papilionoidea (Lepidoptera). *Jurnal Ilmu Alam Dan Lingkungan*, 10(1), 8–14.
10. Mutiarani, A., Nafisah, D., Hakim, L., Marwoto, P., Fianti, F., & Subali, B. (2014). Kisi Difraksi Sederhana Berbasis Alam : Bawang Daun (*Allium fistulosum*) dan Jantung Pisang (*Musa paradisiaca*). *Unnes Physics Education Journal*, 10(1), 40–46.
11. Fatihah, N., Wardhana, F. A. K., Putra, G. K. O., & Mahmudah, R. S. N. (2024). Analisis Panjang Gelombang Laser Monokromatik Melalui Pola Interferensi Cahaya Dari Kisi Difraksi Transmisi. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 12(02), 15–20. <https://doi.org/10.23960/jtaf.v12i02.370>
12. Dewantari, A. A., & Pusung, G. Z. L. (2023). Kupu-Kupu Endemik Indonesia sebagai Inspirasi Pengembangan Buku Pop Up dengan Teknik V-Folding dan Internal Stand. *Journal of Contemporary Indonesian Art*, 9(2), 150–165. <https://doi.org/10.24821/jocia.v9i2.9936>
13. Rani, M. R. I., Atmowidi, T., & Widarto, T. H. (2023). Variasi Bentuk dan Warna Sisik Sayap Kupu-Kupu dan Ngengat. *Jurnal Sumberdaya Hayati*, 9(4), 164–170. <https://doi.org/10.29244/jsdh.9.4.164-170>
14. Yuliantono, F. (2023). *Fenomena Difraksi Dan Interferensi Cahaya Dalam Pengukuran Diameter Objek Tipis (Application of the Phenomena of Diffraction and Light Interference in Measuring the Diame* (Issue July). <https://www.researchgate.net/publication/372075619>
15. Aziz, R. M. (2022). Ekonomi Pertanian Era Pandemi Dengan Metafora Kupu-Kupu Berkode R12 Dan R47 Dalam Ibadah Agricultural Economics In Pandemic Era On Butterfly Metamorphosis Code Of R12-R47 With Worship. *Jurnal Agrotek UMMAT*, 9(2), 105–116.