

Estimating Insect Wingbeat Frequency Based on Morphological Parameters Using a Mathematical Model

Fasya Regita Aurelia*, Nidaa Nasywaa, Mufidah and Sama' Iradat Tito

Departement of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Islam Malang, East Java, Indonesia

*Correspondence e-mail: 22501061016@unisma.ac.id

Article history:

Received : March 6th, 2026

Accepted : May 8th, 2026

Published : May 10th, 2026

DOI:

<https://doi.org/10.64570/agrivolutio.n.v2i1.52>

Copyright: © 2025 by the authors.

License CIB Nusantara, Padang, Indonesia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license



Abstract: Wingbeat frequency is an important parameter in insect flight mechanisms and is influenced by morphological characteristics, particularly body mass and wing surface area. This study aims to provide a preliminary overview of wingbeat frequency in four insect species (rhinoceros beetle, dragonfly, butterfly, and moth) using a mathematical approach based on morphological parameters. The research employed a quantitative experimental method in which body mass was measured with an analytical balance, and wing surface area was calculated from length and width measurements taken with a caliper. These parameters were incorporated into a mathematical model, using Rashevsky's experimental constant ($k = 65$), to estimate the frequency. The results showed differences in wingbeat frequency values: 22,39 Hz for the rhinoceros beetle, 14,17 Hz for the dragonfly, 12,25 Hz for the moth, and 2,16 Hz for the butterfly. In general, insects with larger body mass and wider wings tended to exhibit lower wingbeat frequencies, whereas insects with smaller body mass and relatively narrower wings showed higher frequencies. This study provides basic information on the relationship between morphological characteristics and wingbeat frequency in insects through a mathematical approach.

Keywords: body mass; morphological characteristics; wing surface area; wingbeat frequency; winged insects

1. INTRODUCTION

Serangga merupakan kelompok hewan yang paling dominan dibandingkan kelompok lain dalam filum Arthropoda serta memiliki persebaran yang luas di hampir seluruh wilayah dunia (Hawa et al., 2025). Kelompok ini menunjukkan beragam karakteristik, antara lain variasi berat tubuh dan luas permukaan sayap. Perbedaan karakteristik tersebut berkaitan dengan variasi frekuensi kepancan sayap pada setiap jenis serangga (Yudhono & Erissonia, 2017). Frekuensi kepancan sayap merupakan parameter penting dalam aktivitas serangga yang berperan dalam fungsi biologis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk suhu lingkungan (Pinto et al., 2022; Saha et al., 2024). Perbedaan kepancan sayap tersebut menjadi salah satu aspek penting yang dikaji dalam penelitian penerbangan serangga.

Salah satu faktor utama yang memengaruhi frekuensi kepancan sayap pada serangga adalah ukuran tubuh dan ukuran sayap. Serangga dengan ukuran tubuh dan sayap yang lebih besar umumnya memiliki frekuensi kepancan sayap yang lebih rendah. Sebaliknya,

serangga berukuran kecil cenderung memiliki frekuensi kepakkan sayap yang lebih tinggi (Darveau, 2024). Perbedaan ini dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk tubuh serangga yang menentukan kemampuannya dalam menghasilkan gaya dan daya angkat saat terbang (Deora et al., 2017; Deakin, 2010).

Penelitian mengenai frekuensi kepakkan sayap serangga umumnya menggunakan metode dan peralatan yang kompleks (Yu et al., 2022). Meskipun mampu menghasilkan data yang akurat, namun memerlukan keterampilan, peralatan yang canggih, serta waktu yang lama sehingga kurang efisien untuk digunakan. Sementara itu, pendekatan sederhana dengan memanfaatkan parameter morfologi seperti massa tubuh dan luas permukaan sayap masih jarang diaplikasikan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih mudah, murah, cepat, efektif, efisien, dan aplikatif untuk memberikan gambaran awal frekuensi kepakkan sayap serangga. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran awal mengenai frekuensi kepakkan sayap serangga berdasarkan morfologi menggunakan pendekatan matematis.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari frekuensi kepakkan sayap dengan memperhatikan massa tubuh dan luas efektif sayap. Pengukuran ketiga parameter tersebut dilakukan untuk memahami hubungan antara karakteristik tubuh dengan frekuensi kepakkan sayap. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dasar terkait variasi frekuensi kepakkan sayap pada serangga.

2. METHOD

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Objek penelitian adalah kumbang tanduk, capung, kupu-kupu, dan ngengat. Serangga yang digunakan dalam penelitian ini dipilih berdasarkan variasi massa tubuh dan luas efektif sayap, sehingga dapat mewakili perbedaan karakteristik morfologi.

Serangga yang dipilih memiliki kondisi sayap yang utuh dan mudah diamati, sehingga memungkinkan pengukuran dilakukan dengan lebih akurat. Massa tubuh serangga kemudian diukur menggunakan timbangan analitik. Pengukuran luas permukaan sayap serangga dilakukan dengan mengukur panjang dan lebar sayap menggunakan jangka sorong. Luas permukaan sayap dihitung berdasarkan hasil pengukuran tersebut. Data massa tubuh dan luas permukaan sayap yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung frekuensi kepakkan sayap menggunakan rumus matematis sederhana. Frekuensi kepakkan sayap dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$f = k \frac{\sqrt{m}}{A}$$

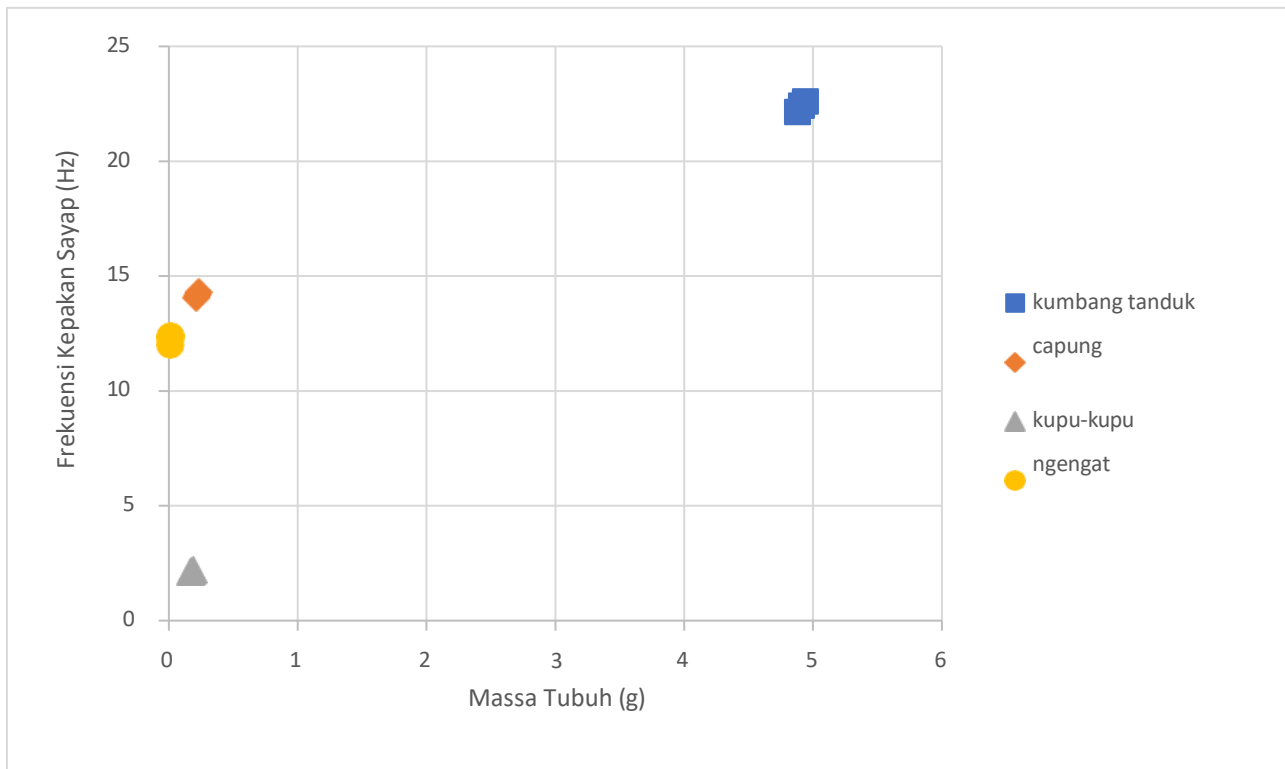
dengan f menyatakan frekuensi kepakkan sayap (Hz), k adalah konstanta, m adalah massa serangga (g), dan A adalah luas permukaan sayap (cm^2) (Abdulah, 2016). Nilai k dalam satuan CGS berkisar pada angka 65, hal tersebut merupakan konstanta eksperimental yang diperkenalkan oleh Nicholas Rashevsky dalam *Mathematical Biophysics* (Rashevsky, 1960).

3. RESULT AND DISCUSSION

Pengamatan dilakukan untuk mengetahui hubungan antara karakteristik morfologi dengan frekuensi kepakkan sayap pada beberapa jenis serangga. Objek penelitian terdiri atas kumbang tanduk, capung, kupu-kupu, dan ngengat yang memiliki karakteristik morfologi berbeda. Parameter yang diukur meliputi massa tubuh, luas efektif sayap, jumlah kepakkan sayap, serta frekuensi kepakkan sayap hasil perhitungan. Data hasil pengukuran dan perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 1 sebagai dasar untuk membandingkan perbedaan frekuensi kepakkan sayap pada masing-masing serangga.

Tabel 1. Data massa tubuh, luas efektif sayap, jumlah kepakkan, dan frekuensi kepakkan sayap serangga

Serangga	Data ke-	Massa Tubuh (g)	Luas Efektif Sayap (cm^2)	Jumlah Kepakan Sayap	Frekuensi Kepakan Sayap (Hz)
Kumbang Tanduk	1	4,88	6,48	65	22,15
	2	4,94	6,39	65	22,60
	3	4,91	6,42	65	22,43
	$\bar{x}$	4,91	6,43	65	22,39
	$\Delta\bar{x}$	0,02	0,03	0	0,13
Capung	1	0,23	2,18	65	14,29
	2	0,21	2,12	65	14,05
	3	0,22	2,15	65	14,18
	$\bar{x}$	0,22	2,15	65	14,17
	$\Delta\bar{x}$	0,01	0,02	0	0,07
Kupu-kupu	1	0,19	12,80	65	2,21
	2	0,17	12,55	65	2,13
	3	0,18	12,72	65	2,16
	$\bar{x}$	0,18	12,69	65	2,16
	$\Delta\bar{x}$	0,01	0,07	0	0,02
Ngengat	1	0,011	0,55	65	12,39
	2	0,009	0,50	65	12,33
	3	0,010	0,54	65	12,03
	$\bar{x}$	0,01	0,53	65	12,25
	$\Delta\bar{x}$	0,001	0,02	0	0,11



Gambar 1. Hubungan antara massa tubuh dan frekuensi kepankan sayap pada empat spesies serangga

Discussion

Berdasarkan data pada tabel 1 dan gambar 1, diperoleh nilai frekuensi kepankan sayap yang berbeda untuk keempat jenis serangga, yaitu kumbang tanduk, capung, kupu-kupu, dan ngengat. Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan frekuensi kepankan sayap dipengaruhi oleh morfologi serangga, yaitu massa tubuh serta luas efektif sayap.

Berdasarkan gambar 1, hubungan antara massa tubuh dan frekuensi kepankan sayap tidak membentuk pola yang jelas. Meskipun terdapat kecenderungan bahwa perubahan massa tubuh diikuti oleh perubahan frekuensi kepankan sayap, namun hal tersebut tidak terjadi pada semua spesies. Oleh karena itu, frekuensi kepankan sayap tidak hanya dipengaruhi oleh morfologi serangga, tetapi juga dipengaruhi oleh jenis spesies.

Kumbang tanduk memiliki frekuensi kepankan sayap sebesar 22,39 Hz. Nilai tersebut mendekati hasil yang dilaporkan pada penelitian sebelumnya yang menemukan frekuensi potensial aksi sekitar 20 Hz meskipun frekuensi kepankan sayap mencapai 80 Hz (Josephson et al., 2000). Hal ini disebabkan karakteristik otot terbang pada serangga merupakan otot asinkron, dimana satu implus saraf dapat menghasilkan beberapa kepankan sayap. Selisih nilai yang diperoleh kemungkinan dipengaruhi oleh perbedaan jenis serangga dan morfologi. Selain mekanisme otot asinkron, karakteristik morfologi juga mempengaruhi frekuensi kepankan sayap kumbang tanduk. Meskipun kumbang tanduk memiliki massa tubuh yang relatif besar, luas efektif sayap yang lebar menghasilkan gaya angkat yang cukup sehingga frekuensi kepankan sayap kumbang tanduk berada pada nilai yang relatif tinggi (Hassall et al., 2021; Jensen et al., 2024).

Pada capung, frekuensi kepakannya yang diperoleh sebesar 14,17 Hz. Nilai tersebut berada dalam rentang frekuensi kepakannya yang dilaporkan dalam literatur, yaitu 4,7–22,5 Hz (Aracheloff *et al.*, 2024). Hal ini diduga berkaitan dengan karakteristik morfologi capung yang memiliki massa tubuh relatif ringan serta luas efektif sayap yang cukup lebar sehingga frekuensi kepakannya yang dihasilkan cenderung lebih tinggi. Kondisi ini sejalan dengan konsep bahwa massa tubuh capung yang relatif ringan menyebabkan frekuensi kepakannya cenderung lebih tinggi untuk menghasilkan gaya angkat saat terbang.

Frekuensi kepakannya kupu-kupu yang diukur sebesar 2,16 Hz. Dalam studi laboratorium menggunakan robot kupu-kupu dengan frekuensi kepakannya 2 Hz, grafik gaya angkat menunjukkan bahwa gerakan sayap pada frekuensi ini mampu menghasilkan gaya angkat yang optimal. Pada frekuensi 2 Hz, udara di sekitar sayap mulai membentuk pusaran, mempercepat aliran udara serta menurunkan tekanan di atas sayap sehingga meningkatkan gaya angkat (Chen *et al.*, 2020; Tercel *et al.*, 2018). Kondisi ini didukung oleh morfologi kupu-kupu yang memiliki luas sayap relatif lebar, sehingga mampu menghasilkan gaya angkat secara lebih efektif. Akibatnya, kupu-kupu tidak memerlukan kepakannya yang terlalu cepat. Selain itu, massa tubuh kupu-kupu yang relatif ringan juga membantu mempertahankan posisi terbang. Karakteristik morfologi tersebut menyebabkan frekuensi kepakannya kupu-kupu cenderung rendah.

Sementara itu, ngengat memiliki frekuensi kepakannya sebesar 12,25 Hz. Nilai ini mendekati frekuensi kepakannya pada *Antheraea polyphemus* yang dilaporkan berada pada kisaran sekitar 10 Hz (Wold *et al.*, 2025). Perbedaan nilai yang diperoleh kemungkinan disebabkan oleh perbedaan jenis dan morfologi ngengat yang diteliti. Massa tubuh yang ringan serta luas efektif sayap yang relatif lebar membuat ngengat lebih mudah menghasilkan gaya angkat saat terbang. Akibatnya, ngengat tidak perlu mengepakkan sayap terlalu cepat untuk tetap terbang stabil. Hal ini sejalan dengan konsep bahwa serangga yang lebih kecil cenderung memiliki frekuensi kepakannya yang tinggi. Selain itu, nilai ketidakpastian ($\Delta\bar{x}$) yang kecil menunjukkan bahwa data yang diperoleh cukup stabil. Hal ini berarti hasil pengukuran yang dilakukan tidak banyak mengalami penyimpangan sehingga dapat digunakan untuk menganalisis hubungan antara massa tubuh dan frekuensi kepakannya sayap.

Secara umum, hasil penelitian ini menunjukkan kecenderungan bahwa massa tubuh dan luas sayap berpengaruh terhadap frekuensi kepakannya sayap pada serangga. Namun, hubungan tersebut tidak selalu sama pada setiap spesies. Hal ini terlihat dari data yang diperoleh, sehingga menunjukkan bahwa frekuensi kepakannya sayap tidak hanya dipengaruhi oleh massa tubuh dan luas sayap, tetapi juga oleh faktor lain, seperti jenis spesies yang diamati.

4. CONCLUSIONS

Berdasarkan hasil penelitian, terdapat perbedaan frekuensi kepakannya sayap pada kumbang tanduk, capung, kupu-kupu, dan ngengat yang dihitung menggunakan pendekatan matematis sederhana berbasis massa tubuh dan luas efektif sayap. Hasil menunjukkan adanya kecenderungan bahwa serangga dengan massa tubuh lebih besar dan luas sayap lebih lebar memiliki frekuensi kepakannya sayap yang lebih rendah, sedangkan serangga dengan massa tubuh lebih kecil dan luas sayap relatif sempit cenderung memiliki frekuensi yang lebih tinggi.

Meskipun perhitungan dilakukan menggunakan model sederhana dan jumlah sampel terbatas, penelitian ini dapat memberikan gambaran awal mengenai hubungan antara karakteristik morfologi dan frekuensi kepakkan sayap pada beberapa jenis serangga sehingga memperkuat adanya hubungan antara morfologi dan frekuensi kepakkan sayap.

REFERENCES

- Abdulah, Mikrajudin. (2016). Fisika Dasar I. ITB Press. Bandung
- Aracheloff, C., Garrouste, R., Nel, A., Godoy-Diana, R., & Thiria, B. (2024). Subtle frequency matching reveals resonant phenomenon in the flight of Odonata. *Journal of the Royal Society Interface*, 21(219), 20240401.
- Chen, S., Wang, L., Guo, S., Zhao, C., & Tong, M. (2020). A bio-inspired flapping wing rotor of variant frequency driven by ultrasonic motor. *Applied Sciences*, 10(1), 412.
- Darveau, C. A. (2024). Insect Flight Energetics and the Evolution of Size, Form, and Function. *Integrative And Comparative Biology*, 64(2), 586-597.
- Deakin, M. A. B. (2010). Formulae for insect wingbeat frequency. *Journal of Insect Science*, 10, 96, 1–9. <https://doi.org/10.1673/031.010.9601>
- Deora, T., Gundiah, N., & Sane, S. P. (2017). Mechanics of the thorax in flies. *Journal of Experimental Biology*, 220(8), 1382-1395.
- Hassall, K. L., Dye, A., Potamitis, I., & Bell, J. R. (2021). Resolving the identification of weak-flying insects during flight: a coupling between rigorous data processing and biology. *Agricultural and Forest Entomology*, 23(4), 489.
- Hawa, S., Syarifah, Z., Azzahra, L. A., Aulia, H. M., & Isfaeni, H. (2025). Identifikasi Serangga Semak di Sekitar Taman Nasional Gunung Gede Pangrango. *Panthera: Jurnal Ilmiah Pendidikan Sains dan Terapan*, 5(1), 1-15.
- Jensen, J. H., Dyre, J. C., & Hecksher, T. (2024). Universal wing- and fin-beat frequency scaling. *PLoS ONE*, 19(6), e0303834. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0303834>
- Josephson, R. K., Malamud, J. G., & Stokes, D. R. (2000). Power output by an asynchronous flight muscle from a beetle. *Journal of Experimental Biology*, 203(17), 2667-2689.
- Pinto, J., Magni, P. A., O'Brien, R. C., & Dadour, I. R. (2022). Chasing flies: the use of wingbeat frequency as a communication cue in calyptrate flies (Diptera: Calyptratae). *Insects*, 13(9), 822.
- Rashevsky, N. (1960). Mathematical biophysics: Physico-mathematical foundations of biology (Vol 1). Dower Publication.
- Saha, T., Genoud, A. P., Park, J. H., & Thomas, B. P. (2024). Temperature dependency of insect's wingbeat frequencies: an empirical approach to temperature correction. *Insects*, 15(5), 342.

- Tercel, M. P. T. G., Veronesi, F., & Pope, T. W. (2018). Phylogenetic clustering of wingbeat frequency and flight-associated morphometrics across insect orders. *Physiological Entomology*, 43(2), 149–157. <https://doi.org/10.1111/phen.12240>
- Wold, E. S., Aiello, B., Harris, M., bin Sikandar, U., Lynch, J., Gravish, N., & Sponberg, S. (2024). Moth resonant mechanics are tuned to wingbeat frequency and energetic demands. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(2025).
- Yu, W., Zhang, H., Xu, R., Sun, Y., & Wu, K. (2022). Characterization of wingbeat frequency of different taxa of migratory insects in Northeast Asia. *Insects*, 13(6), 520.
- Yudhono, R., & Erissonia, A. A. (2017). Rancang Bangun Mekanisme Flapping-Wing Meniru Kupu-Kupu Untuk Pengembangan Micro Aerial Vehicle (MAV). *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 4(1), 15-25.