

II. TINJAUAN PUSTAKA

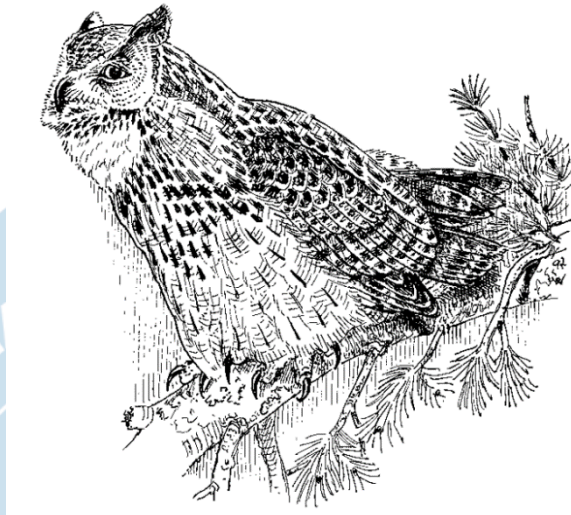
A. Taksonomi dan Ciri Morfologi Celepuk Jawa

Celepuk Jawa (*Otus angelinae*) merupakan salah satu jenis burung hantu berukuran kecil yang bersifat nokturnal (aktif di malam hari) dan endemik di Pulau Jawa, Indonesia. Spesies ini tergolong dalam ordo Strigiformes dan famili Strigidae, yang mencakup sebagian besar jenis burung hantu di dunia. Genus *Otus* sendiri terdiri dari berbagai spesies celepuk yang tersebar luas di Asia, Afrika, dan sebagian Eropa. Namun, *Otus angelinae* termasuk salah satu spesies yang sangat terbatas penyebarannya, karena hanya ditemukan di wilayah tertentu di Jawa (König & Weick, 2010).

Spesies ini pertama kali dideskripsikan oleh Hartert pada tahun 1903, berdasarkan koleksi spesimen dari daerah pegunungan di Jawa Barat. Hingga saat ini, celepuk jawa masih dianggap sebagai spesies monomorfik, yang berarti tidak ada subspecies yang diakui (BirdLife International, 2016). Perbedaan taksonomi dari spesies ini dibanding *Otus* lainnya dapat dilihat dari kombinasi antara ciri morfologi, habitat yang khas, serta pola vokalisasi yang berbeda.

Secara morfologi, *Otus angelinae* memiliki panjang tubuh sekitar 20–23 cm. Warna bulunya dominan coklat dengan corak garis-garis halus di bagian dada dan perut. Burung ini memiliki jambul telinga (*ear tufts*) yang mencolok dan disk wajah yang terlihat jelas. Pola warnanya membuat burung ini mudah menyatu dengan latar hutan pegunungan yang lebat, yang menjadi habitat alaminya. Warna mata

umumnya kuning hingga oranye, mendukung kemampuannya untuk beraktivitas pada malam hari (König dan Weick, 2010).



Gambar 1. Burung hantu (König dan Weick, 2010)

Di lapangan, identifikasi spesies ini cukup sulit karena sangat mirip dengan spesies celepuk lain seperti *Otus lempiji* (Celepuk Sunda). Selain itu, sifat pemaku dan sifat nokturnal membuat pengamatan langsung jarang berhasil. Oleh sebab itu, para peneliti sering menggunakan karakter vokal sebagai pendekatan utama dalam identifikasi.

B. Ekologi dan Perilaku Celepuk Jawa

Celepuk Jawa (*Otus angelinae*) merupakan spesies burung hantu nokturnal yang memiliki preferensi habitat spesifik pada hutan pegunungan tropis. Spesies ini umumnya ditemukan pada ketinggian antara 900 hingga 2500 meter di atas permukaan laut, terutama di kawasan hutan pegunungan yang masih memiliki tutupan vegetasi lebat dan kelembapan yang tinggi (Becking, 1994b; BirdLife International, 2016). Di habitat alaminya, Celepuk Jawa cenderung memilih area

dengan kanopi yang rapat dan struktur vegetasi yang kompleks, yang memberikan perlindungan serta mendukung pola hidup tersembunyinya.

Perilaku *Otus angelinae* relatif jarang terdokumentasi secara mendetail, terutama karena spesies ini memiliki sifat yang sangat tertutup dan aktivitas utamanya berlangsung di malam hari. Burung ini dikenal sangat pemalu dan jarang menampakkan diri, sehingga observasi langsung di alam bebas sangat terbatas. Aktivitas harian (daily activity) burung ini umumnya dimulai saat menjelang senja, dan puncak vokalisasi terjadi pada malam hari, terutama saat musim kawin, meskipun data terkait musim reproduksi masih sangat minim.

Selain habitat alami, elevasi juga memiliki peran penting dalam menentukan keberadaan Celepuk Jawa. Beberapa laporan menyebutkan bahwa spesies ini lebih sering ditemukan pada ketinggian di atas 1500 mdpl, di mana gangguan manusia cenderung lebih rendah dibanding dataran yang lebih rendah. Namun demikian, belum ada kajian komprehensif yang memetakan preferensi habitat spesies ini berdasarkan faktor-faktor lingkungan seperti kerapatan vegetasi, suhu, kelembapan, dan struktur hutan secara kuantitatif.

Dalam aspek ekologi, Celepuk Jawa diperkirakan memiliki wilayah jelajah (*home range*) yang relatif sempit, karena kebutuhan ruang dan energinya yang tidak sebesar burung pemangsa diurnal. Makanan utamanya kemungkinan besar terdiri atas serangga malam dan vertebrata kecil, sebagaimana pola makan *Otus* lain di Asia Tenggara.

Karena minimnya informasi terkait perilaku dan ekologi spesies ini, studi berbasis bioakustik menjadi penting untuk memahami keberadaan dan pola

aktivitasnya tanpa harus mengandalkan pengamatan visual. Analisis suara, bila dikombinasikan dengan informasi habitat dan elevasi, dapat memberikan gambaran awal mengenai pola distribusi spasial dan preferensi ekologis *Otus angelinae* di alam.

C. Status Konservasi dan Ancaman terhadap Celepuk Jawa

Celepuk Jawa (*Otus angelinae*) saat ini dikategorikan sebagai spesies Terancam Punah (*Endangered*) oleh *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) berdasarkan penilaian populasi global yang menunjukkan jumlah individu dewasa sangat kecil dan persebarannya sangat terbatas (BirdLife International, 2016). Spesies ini hanya ditemukan di beberapa lokasi dataran tinggi di Pulau Jawa, seperti Gunung Gede, Gunung Salak, dan dataran tinggi Ijen. Namun, belum ada data resmi yang terdokumentasi di wilayah Jawa Tengah, termasuk di kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu.

Kondisi ini menunjukkan bahwa keberadaan *Otus angelinae* sangat tergantung pada keberlangsungan habitat hutan pegunungan yang relatif sempit dan terfragmentasi. Hilangnya habitat akibat alih fungsi lahan menjadi salah satu faktor utama yang mengancam populasi spesies ini. Aktivitas pertanian berpindah, pembukaan lahan untuk perkebunan, serta pembangunan infrastruktur di wilayah pegunungan menyebabkan degradasi hutan yang signifikan, bahkan di dalam kawasan konservasi sekalipun (BirdLife International, 2016; Myers et al., 2000).

Selain tekanan terhadap habitat, tantangan konservasi *Otus angelinae* juga diperparah oleh keterbatasan data ilmiah. Informasi mengenai populasi, ekologi, dan distribusi spasial spesies ini masih sangat minim. Sebagian besar informasi yang tersedia berasal dari laporan singkat atau observasi tidak sistematis. Kurangnya kajian yang berkelanjutan menghambat pengambilan keputusan dalam manajemen konservasi yang berbasis data (König dan Weick, 2010).

Di sisi lain, kawasan konservasi seperti taman nasional seharusnya menjadi benteng terakhir perlindungan keanekaragaman hayati, termasuk spesies endemik dan terancam punah. Namun, efektivitas pengelolaan konservasi masih menghadapi banyak kendala, termasuk keterbatasan sumber daya manusia, pemantauan yang belum intensif, dan rendahnya integrasi antara data ilmiah dan kebijakan lapangan (Ministry of Forestry, 2004).

D. Taman Nasional Gunung Merbabu sebagai Kawasan Konservasi

Taman Nasional Gunung Merbabu merupakan salah satu kawasan konservasi yang terletak di provinsi Jawa Tengah, Indonesia. Kawasan ini secara administratif mencakup wilayah Kabupaten Magelang, Boyolali, dan Semarang, dengan luas sekitar 5.725 hektar. Merbabu disahkan sebagai taman nasional melalui Surat Keputusan Menteri Kehutanan No. SK.135/Menhut-II/2004. Kawasan ini memiliki nilai penting dalam konservasi keanekaragaman hayati, terutama karena posisinya sebagai penghubung ekologis antara

ekosistem Pegunungan Merapi-Merbabu dan pegunungan lainnya di Jawa Tengah (Ministry of Forestry, 2004).

Secara topografi, Taman Nasional Gunung Merbabu memiliki kisaran elevasi dari sekitar 600 hingga lebih dari 3.100 meter di atas permukaan laut. Kondisi ini menciptakan variasi ekosistem yang cukup luas, mulai dari hutan hujan tropis dataran rendah hingga hutan pegunungan atas dan padang rumput sub-alpin. Keanekaragaman vegetasi ini menyediakan habitat bagi berbagai jenis flora dan fauna, termasuk spesies-spesies endemik dan terancam punah (Arifin et al., 2008).

Avifauna (burung) merupakan salah satu kelompok fauna yang cukup dominan di kawasan ini. Beberapa studi sebelumnya telah mencatat keberadaan berbagai jenis burung hutan seperti Jalak Suren (*Gracupica jalla*), Elang Jawa (*Nisaetus bartelsi*), dan Serak Jawa (*Tyto alba*), meskipun sebagian besar survei belum dilakukan secara intensif dan sistematis. Sejauh ini, belum ada dokumentasi resmi mengenai keberadaan Celepuk Jawa (*Otus angelinae*) di kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu, meskipun kondisi habitat dan elevasinya secara ekologis sesuai dengan preferensi spesies tersebut (Becking, 1994b).

Kawasan ini juga menghadapi berbagai tantangan dalam pengelolaan konservasi, antara lain tekanan dari aktivitas pendakian, ekspansi lahan untuk pertanian, serta kebakaran hutan musiman. Meskipun secara formal statusnya dilindungi, upaya pemantauan populasi satwa liar di Merbabu masih terbatas

karena kurangnya data dasar, keterbatasan teknologi monitoring, serta minimnya kolaborasi antara pihak pengelola dan institusi riset.

Dalam konteks tersebut, pemanfaatan metode ilmiah seperti bioakustik dapat menjadi salah satu pendekatan inovatif untuk mendeteksi keberadaan satwa liar secara non-invasif, khususnya untuk spesies-spesies yang sulit diamati secara langsung seperti Celepuk Jawa. Pendekatan ini dapat memberikan data awal yang penting bagi pengelola taman nasional dalam menyusun strategi pelestarian yang lebih berbasis bukti. Celepuk Jawa (*Otus angelinae*) saat ini dikategorikan sebagai spesies Terancam Punah (Endangered) oleh *International Union for Conservation of Nature* (IUCN) berdasarkan penilaian populasi global yang menunjukkan jumlah individu dewasa sangat kecil dan persebarannya sangat terbatas (BirdLife International, 2016).

E. Metode Bioakustik dalam Studi Distribusi Satwa Liar

Bioakustik merupakan cabang dari ekologi perilaku yang mempelajari produksi, transmisi, dan penerimaan suara pada hewan, serta penggunaannya dalam konteks komunikasi dan interaksi dengan lingkungan (Bradbury & Vehrencamp, 2011). Burung memiliki sinyal akustik yang memainkan peran penting dalam berbagai aktivitas biologis seperti menarik pasangan, mempertahankan wilayah, memberikan peringatan, dan menjaga sosial dalam kelompok.

Dalam penelitian ekologi, metode bioakustik menawarkan pendekatan non-invasif untuk mendeteksi dan memantau keberadaan satwa liar, terutama

di habitat yang sulit dijangkau secara visual seperti hutan tropis lebat atau kawasan pegunungan (Blumstein et al., 2011). Kemajuan teknologi seperti alat perekam otomatis dan perangkat lunak analisis suara telah menjadikan bioakustik sebagai metode yang kuat dalam studi keanekaragaman hayati jangka panjang dan konservasi spesies.

Dalam penelitian burung, bioakustik digunakan untuk merekam dan menganalisis vokalisasi spesies sebagai indikator kehadiran, aktivitas, hingga perilaku. Setiap spesies umumnya memiliki karakter vokal yang khas, seperti frekuensi dominan, durasi, dan bentuk spektrum suara yang dapat dianalisis melalui perangkat lunak visualisasi suara (Riede, 1998). Penggunaan spektrogram memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi dan membedakan spesies berdasarkan sinyal akustik, bahkan dalam kondisi pencahayaan rendah atau medan yang tertutup vegetasi lebat.

Keunggulan lain dari suara burung adalah sifatnya yang khas secara spesifik, baik dari segi struktur frekuensi maupun pola waktunya. Karakteristik ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi spesies, memantau dinamika populasi, dan bahkan mengestimasi posisi individu berdasarkan pola propagasi suara (Kogan & Margoliash, 1998). Dalam beberapa tahun terakhir, pendekatan ini berkembang lebih jauh dengan meneliti kemungkinan penggunaan parameter akustik seperti energi, frekuensi puncak, dan sebaran spektral untuk memperkirakan jarak antara sumber suara dan alat perekam (Dabelsteen, 2005).

Dalam konteks penelitian ini, bioakustik menjadi dasar metodologi untuk menganalisis rekaman suara burung *Otus angelinae* (Celepuk Jawa) di kawasan Gunung Merbabu. Dengan mengekstrak dan memodelkan parameter akustik dari suara panggilan burung, dimungkinkan untuk memperkirakan distribusi spasial individu secara tidak langsung berbasis suara. Teknik ini sangat bernilai dalam konteks lingkungan pegunungan di mana survei visual sulit dilakukan atau berpotensi mengganggu ekosistem. Dengan menempatkan mikrofon secara strategis di berbagai titik elevasi dan tipe habitat, peneliti dapat memetakan lokasi vokalisasi dan mengaitkannya dengan variabel lingkungan seperti suhu, kelembapan, struktur vegetasi, dan tekanan antropogenik (Depraetere et al., 2012). Hal ini penting untuk memahami preferensi habitat spesifik dan zona aktivitas spesies secara lebih akurat.

Namun, meskipun bioakustik menawarkan banyak keunggulan, metode ini juga memiliki beberapa keterbatasan teknis. Salah satu keterbatasan dalam studi ini adalah estimasi jarak sumber suara yang dilakukan hanya berdasarkan interpretasi spektral, tanpa pengukuran intensitas akustik absolut. Oleh karena itu, hasil pemetaan distribusi spasial bersifat pendekatan dan bukan representasi jarak yang pasti dari posisi individu burung (Blumstein et al., 2011; Sueur et al., 2008). Faktor lingkungan seperti angin, topografi, dan penyerapan vegetasi juga dapat memengaruhi kualitas dan jangkauan suara yang terekam.

Terlepas dari tantangan tersebut, pendekatan bioakustik tetap dianggap sebagai salah satu metode yang paling efektif dan efisien dalam survei keanekaragaman hayati, terutama untuk spesies burung endemik yang jarang

ditemukan. Dengan data suara yang terekam, penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting bagi pengembangan basis data vokalisasi, serta mendukung konservasi berbasis bukti untuk spesies seperti *Otus angelinae* di habitat alaminya.

F. Propagasi Suara di Udara

Propagasi suara di udara merupakan proses perambatan gelombang akustik dari sumber menuju penerima melalui medium atmosfer. Dalam konteks ekologi akustik, memahami karakteristik propagasi ini sangat penting untuk menginterpretasikan sinyal suara yang terekam dan memperkirakan jarak sumber suara terhadap alat perekam (Wiley & Richards, 1978). Secara fisik, suara merupakan gelombang longitudinal yang mengalami berbagai bentuk redaman selama merambat di udara, termasuk redaman geometris (*spreading loss*), yaitu pelemahan energi akibat menyebarnya gelombang dalam ruang tiga dimensi. redaman atmosferik (*atmospheric absorption*), yang terjadi karena interaksi gelombang dengan molekul udara, terutama dipengaruhi oleh suhu, kelembaban, dan frekuensi suara. Hamburan vegetatif dan permukaan tanah, yang memecah dan menyerap sebagian energi suara. Efek suhu dan angin, yang dapat menekuk (*refraction*) atau mempercepat perambatan gelombang suara.

Redaman geometris sering dijelaskan melalui model *inverse-square law*, di mana tekanan suara menurun sebanding dengan kuadrat jarak. Dalam konteks energi, hubungan ini bersifat logaritmik, yaitu

$$L_p = L_0 - 20\log_{10}(d)$$

L_p menunjukkan level tekanan suara pada jarak d , L_0 adalah tekan suara pada jarak acuan yang umumnya 1 meter dan d adalah jarak dalam meter. Model ini menunjukkan bahwa setiap kenaikan logaritmik dalam jarak akan menghasilkan penurunan linier dalam energi suara (Rossing, 2007). Oleh karena itu, dalam penelitian akustik lapangan, pendekatan logaritmik sangat umum digunakan, termasuk dalam estimasi jarak hewan berdasarkan energi akustik yang terekam. Penerapan model ini juga sangat relevan dalam estimasi jarak burung seperti *Otus angelinae*, di mana suara yang dipancarkan mengalami pelemahan energi secara konsisten sesuai dengan hukum propagasi logaritmik. Penggunaan regresi linier antara log jarak dan energi akustik dapat dijustifikasi secara fisik dan telah diterapkan dalam berbagai penelitian bioakustik terdahulu (Dabelsteen, 2005; Morton, 1975).

G. Parameter Akustik Digital

Dalam analisis bioakustik, sinyal suara terekam diubah menjadi bentuk digital melalui proses sampling. Dari sinyal digital ini, sejumlah parameter akustik dapat diekstraksi untuk menggambarkan karakteristik fisik suara secara kuantitatif (Charif, Waack & Strickman, 2010). Parameter ini berfungsi untuk mengidentifikasi jenis sinyal, mengevaluasi kualitasnya, serta membangun model prediktif seperti estimasi jarak. Beberapa parameter penting yang digunakan dalam penelitian ini antara lain *low frequency* (Hz) dan *high frequency* (Hz), *frequency 5%* (Hz) dan *frequency 95%* (Hz), *peak frequency* (Hz), *peak power density* (dB/Hz) dan *energy* (dB FS). *low frequency* (Hz) dan *high frequency* (Hz). *Low frequency* menunjukkan batas bawah dari spektrum

suara yang memiliki energi signifikan, sedangkan *high frequency* menunjukkan batas atasnya. Rentang ini menggambarkan sebaran total energi suara dan dapat dipengaruhi oleh spesies burung, struktur suara, serta kondisi propagasi di lapangan (Catchpole & Slater, 2008). Rentang frekuensi yang terlalu lebar atau terlalu sempit dapat mengindikasikan kualitas sinyal yang rendah atau gangguan dari suara latar belakang (*noise*).

Parameter Freq 5% (Hz) dan Freq 95% (Hz) menunjukkan batas bawah dan atas dari *Bandwidth* efektif, yaitu rentang frekuensi di mana 90% energi sinyal terkonsentrasi (50% berada di antara frekuensi 5% hingga 95%). Ini penting untuk memahami di mana pusat distribusi energi suara berada dan sering digunakan untuk membedakan spesies berdasarkan struktur akustiknya (Kogan & Margoliash, 1998). *Peak frequency* (Hz) atau Frekuensi puncak merupakan frekuensi dengan kepadatan energi tertinggi dalam sinyal suara. Frekuensi puncak sering dianggap sebagai “*fingerprint*” akustik dari spesies tertentu karena relatif stabil dan khas per individu atau spesies (Marler & Slabbekoorn, 2004). *Peak frequency* juga sangat berguna dalam estimasi lokasi karena lebih tahan terhadap redaman dibandingkan frekuensi tinggi.

Peak power density (dB/Hz) merupakan nilai tertinggi dari densitas spektral daya sinyal. Nilai ini memberikan informasi mengenai kekuatan sinyal relatif terhadap latar belakang dan membantu menilai kejernihan atau dominasi suara burung dalam rekaman (Blumstein et al., 2011). *Energy* (dB FS) memiliki satuan *decibel full-scale* (dB FS) menunjukkan total energi akustik sinyal relatif terhadap maksimum representasi digital. Parameter ini menjadi sangat penting

dalam model estimasi jarak karena nilai energi menurun secara logaritmik terhadap jarak dari sumber suara. Oleh karena itu, energi dipakai sebagai variabel dependen utama dalam model regresi linier logaritmik (Dabelsteen, 2005; Rossing, 2007).

H. Regresi Linier dan Metode *Least Squares*

Regresi linier merupakan salah satu metode analisis statistik yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu variabel bebas (X) dengan satu variabel terikat (Y). Dalam bentuk paling sederhana, model regresi linier dapat dinyatakan sebagai $Y = aX + b$. Y adalah variabel terikat (dalam penelitian ini adalah energi suara dalam dB FS, X adalah variabel bebas (logaritma jarak berupa $\log_{10}(d)$), a adalah koefisien kemiringan (*slope*) yang menunjukkan seberapa besar perubahan Y untuk setiap perubahan unit X , dan b adalah intersep (*intercept*) yang menunjukkan nilai Y saat nilai $X = 0$.

I. Metode *Least Squares*

Menurut Montgomery et al., 2012 dan Walpole et al., 2011 metode kuadrat terkecil (*least squares method*) adalah teknik statistik yang digunakan untuk mencari nilai a dan b sedemikian rupa agar jumlah kuadrat dari selisih antara nilai aktual Y dan nilai prediksi $\hat{Y}$ adalah seminimal mungkin. Fungsi objektif yang diminimalkan adalah

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$$

Melalui turunan kalkulus terhadap fungsi tersebut, diperoleh formula untuk menentukan koefisien a dan b :

$$a = \frac{n \sum(xy) - \sum x \cdot \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{n}$$

J. Aplikasi dalam Bioakustik

Dalam konteks bioakustik, regresi linier digunakan untuk memodelkan hubungan antara energi suara (dB FS) dan jarak sumber suara. Karena propagasi suara di udara mengikuti pola logaritmik, maka digunakan bentuk transformasi

$$E = a \cdot \log_{10}(d) + b$$

Hubungan logaritmik ini mencerminkan bahwa setiap kali jarak meningkat secara logaritmik, energi suara akan menurun secara linier. Oleh karena itu, regresi linier antara $\log_{10}(d)$ dan E merupakan pendekatan umum untuk estimasi jarak berbasis parameter akustik (Rossing, 2007; Dabelsteen, 2005). Asumsi regresi linier sederhana didasarkan pada beberapa asumsi statistik yaitu hubungan antara variabel X dan Y bersifat linier. Residual berdistribusi normal dengan nilai rata-rata nol, varian residual bersifat konstan dan Data observasi bersifat independen. Jika asumsi-asumsi tersebut terpenuhi, maka model regresi dapat memberikan estimasi yang efisien dan tidak bias (Montgomery et al., 2012).

K. Model Estimasi Jarak Akustik

Estimasi jarak berdasarkan data akustik merupakan pendekatan tidak langsung untuk menentukan posisi spasial sumber suara dengan menggunakan parameter energi sinyal yang direkam. Dalam konteks ekologi akustik, metode ini berguna untuk memperkirakan jarak keberadaan hewan (misalnya burung)

terhadap mikrofon tanpa harus melakukan observasi visual langsung (Blumstein et al., 2011).

Berdasarkan penjelasan pada bagian sebelumnya, energi suara menurun secara sistematis seiring bertambahnya jarak dari sumber ke penerima karena redaman geometris dan atmosferik. Fenomena ini memungkinkan pengembangan model matematis yang dapat menghubungkan jarak dan energi suara secara kuantitatif. Salah satu model yang umum digunakan dalam konteks ini adalah

$$E = a \cdot \log_{10}(d) + b$$

E menunjukkan energi sinyal dalam dB *Full Scale* (dB FS), d adalah jarak dari sumber suara ke perekam dalam meter, a merupakan koefisien kemiringan, merepresentasikan laju penurunan energi per logaritma jarak, dan b merupakan intersep, menggambarkan energi teoritis pada jarak 1 meter. Model ini merupakan bentuk transformasi dari hukum sebaran logaritmik energi suara, dan telah diterapkan dalam berbagai penelitian akustik dan bioakustik lapangan (Rossing, 2007; Dabelsteen, 2005). Dalam praktiknya, nilai a dan b diperoleh melalui kalibrasi dengan data lapangan berjarak diketahui, kemudian digunakan untuk memprediksi jarak dari suara yang tidak diketahui posisinya.

Kelebihan metode ini adalah non-invasif dan tidak memerlukan kontak langsung dengan satwa, relatif cepat dan dapat diotomatisasi untuk dataset besar, cocok untuk medan sulit seperti pegunungan atau hutan lebat. Namun metode ini juga memiliki kekurangan yaitu Sensitif terhadap *noise* dan perubahan kondisi atmosfer, asumsi redaman seragam tidak selalu berlaku dalam lingkungan nyata, dan diperlukan kalibrasi spesifik lokasi dan spesies (Wiley & Richards, 1978)

L. Karakteristik Vokalisasi Burung Hantu

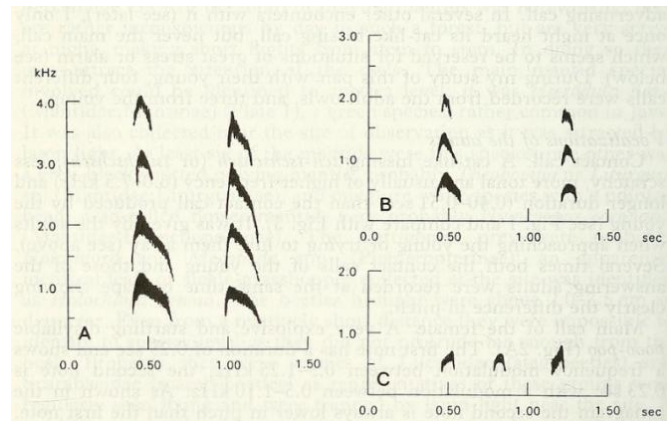
Vokalisasi merupakan salah satu karakter khas burung hantu yang memiliki fungsi penting dalam berbagai aspek perilaku, mulai dari komunikasi teritorial, pemanggilan pasangan (*Mate Calling*), hingga sinyal peringatan

terhadap kompetitor atau adanya pemangsa. Burung hantu umumnya aktif bersuara pada malam hari, dan suara tersebut dapat didengar dalam jarak yang cukup jauh, menjadikannya indikator utama dalam deteksi kehadiran spesies melalui metode bioakustik (König dan Weick, 2010; Slabbekoorn, 2004).

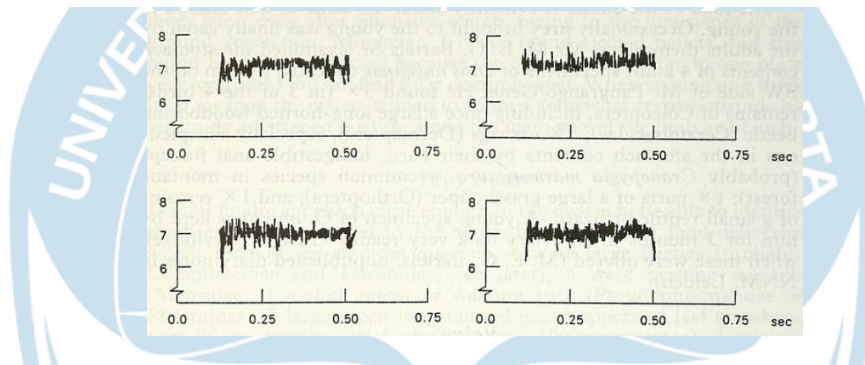
Setiap spesies burung hantu memiliki vokalisasi yang berbeda secara struktur akustik. Ciri utama yang dapat dianalisis secara ilmiah meliputi:

- Frekuensi dominan (*dominant frequency*), yaitu puncak frekuensi suara yang paling kuat.
- Durasi suara, yaitu lamanya satu unit vokal atau panggilan berlangsung.
- Lebar pita frekuensi (*Bandwidth*), yaitu rentang frekuensi dari suara tersebut.
- Polanya dalam waktu, seperti jumlah pengulangan, jeda antar panggilan, dan ritme.

Vokalisasi burung hantu bersifat spesifik antar spesies dan menjadi kunci penting dalam survei terutama saat musim berkembang biak ketika suara jantan lebih mudah terdengar (van der Heide, 1994; Rasmussen & Collar, 2001).



Gambar 2. Sonogram dari vokalisasi individu dewasa, A betina; B jantan dan C, call untuk menenangkan anakan saat pejantan menghampiri (Becking, 1994).



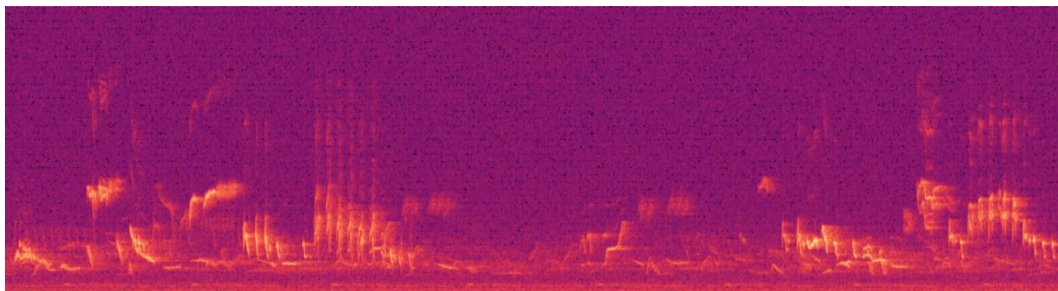
Gambar 3. Vokalisasi panggilan individu dewasa (Becking, 1994).

Dengan mempertimbangkan hal tersebut, pemahaman terhadap taksonomi dan morfologi *Otus angelinae* sangat penting untuk mendukung penelitian ekologi dan konservasi lebih lanjut. Terlebih dalam metode bioakustik, akurasi dalam mengenali spesies sangat bergantung pada pemahaman dasar tentang ciri-ciri fisik dan suara yang khas dari spesies tersebut.

Vokalisasi pada genus *Otus* umumnya terdiri atas nada-nada tunggal atau berseri dengan interval tertentu. Meskipun data mengenai *Otus angelinae* masih terbatas, deskripsi awal menyebutkan bahwa spesies ini menghasilkan panggilan tunggal menyerupai suara “whoop” yang diulang secara berkala, biasanya terdengar jelas pada malam hari saat kondisi tenang (van der Heide,

1994). Ciri ini membedakan *O. angelinae* dari spesies lain dalam genus yang sama, seperti *Otus lempiji*, yang memiliki panggilan lebih cepat dan bernada lebih tinggi. Menurut Marler (1955) dan studi lanjutan menunjukkan bahwa panggilan alarm dan mobbing pada burung cenderung memiliki bandwidth yang lebar, sehingga memudahkan deteksi dan lokalisasi oleh individu lain. Panggilan dengan *bandwidth* lebar ini dipilih secara selektif karena memberikan sinyal arah yang jelas dan cepat memperluas jangkauan deteksi. Sebaliknya, panggilan dengan *bandwidth* sempit “yah”, panggilan pendek atau *contact calls* digunakan untuk komunikasi lokal yang tidak memerlukan lokalisasi spasial yang akurat. Pada *bandwidth* sempit memfokuskan energi pada frekuensi tertentu, mengurangi interferensi dan memperjelas pesan antar-individu dalam jarak dekat.

Analisis vokalisasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak seperti Raven atau Seewave untuk menghasilkan spektrogram—yaitu representasi visual dari suara dalam dimensi waktu (*X*), frekuensi (*Y*), dan intensitas (warna atau kecerahan). Dengan spektrogram, peneliti dapat mendeteksi dan membandingkan elemen suara secara objektif dan menghindari kesalahan identifikasi akibat persepsi pendengaran subjektif (Sueur et al., 2008).



Gambar 4. Contoh spektrogram (Dokumentasi pribadi, 2022)

Vokalisasi juga dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan seperti kelembapan udara, suhu, kerapatan vegetasi, dan topografi. Faktor-faktor ini dapat memengaruhi propagasi suara, sehingga penting untuk mempertimbangkan konteks ekologis saat merekam dan menganalisis suara. Misalnya, suara mungkin teredam pada habitat dengan vegetasi rapat atau mengalami distorsi pada area berbukit (Blumstein et al., 2011).

Dengan karakteristik vokal yang unik dan relatif konsisten antarindividu, vokalisasi burung hantu menjadi alat identifikasi yang sangat penting dalam studi distribusi spesies, terutama dalam kondisi minim cahaya dan medan sulit. Oleh karena itu, pemahaman tentang struktur vokal ini menjadi dasar penting dalam penelitian bioakustik, khususnya dalam studi keberadaan dan distribusi *Otus angelinae* di Taman Nasional Gunung Merbabu.

M. Studi Terdahulu tentang Bioakustik dan Burung Hantu

Penggunaan metode bioakustik dalam studi burung hantu telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir, terutama sebagai respon terhadap tantangan dalam mendeteksi spesies yang bersifat nokturnal, soliter, dan sulit diamati secara visual. Berbagai studi di tingkat global maupun regional telah menunjukkan efektivitas pendekatan ini dalam mendeteksi keberadaan suatu spesies, mengidentifikasi perbedaan antar spesies, dan memantau dinamika populasi secara jangka panjang (Hardouin et al., 2008; Goyette et al., 2011).

Di kawasan tropis, penelitian bioakustik pada burung hantu masih tergolong terbatas, tetapi menunjukkan potensi besar. Misalnya, Goyette et al.

(2011) melakukan studi bioakustik terhadap *Otus nudipes* di Karibia dan berhasil mengidentifikasi pola vokalisasi serta zona distribusi berdasarkan analisis panggilan malam hari untuk mempertahankan teritorial dan menarik pasangan, pola ini juga konsisten dengan observasi umum bahwa vokalisasi burung hantu memiliki dua puncak aktivitas, pada senja dan fajar, sebagaimana dilaporkan oleh Marín-Gómez *et al.* (2020). Studi serupa yang dilakukan oleh Rognan *et al.* (2012) di Kalimantan menunjukkan bahwa rekaman suara sangat efektif untuk mendeteksi burung hantu yang tidak pernah terdeteksi melalui metode visual biasa, bahkan di habitat yang sulit dijangkau.

Di Indonesia, studi bioakustik terhadap burung hantu relatif sedikit dan umumnya terbatas pada observasi non-sistematis. Penelitian tentang *Otus angelinae* secara khusus hampir tidak tersedia dalam literatur ilmiah, kecuali catatan lapangan oleh van der Heide (1994) yang menyebutkan ciri vokalisasi awal dari spesies ini. Oleh karena itu, penelitian yang menggunakan pendekatan bioakustik secara sistematis untuk mendeteksi keberadaan *Otus angelinae* di kawasan seperti Taman Nasional Gunung Merbabu memiliki nilai ilmiah dan konservasi yang tinggi.

Selain identifikasi spesies, beberapa studi juga memanfaatkan data akustik untuk analisis ekologis yang lebih dalam. Misalnya menurut Heinicke *et al.* (2015) menggunakan panggilan burung hantu untuk memetakan preferensi habitat dan ketinggian, serta menguji korelasi dengan variabel lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Dengan kata lain, data vokalisasi tidak hanya

berfungsi sebagai indikator kehadiran, tetapi juga sebagai dasar untuk memahami dinamika ekologi spesies.

Temuan dari studi-studi terdahulu mendukung bahwa bioakustik merupakan pendekatan yang valid dan efisien untuk studi distribusi burung hantu, terutama di daerah pegunungan tropis. Keterbatasan akses lapangan, kerapatan vegetasi, dan perilaku burung yang tertutup menjadi alasan kuat untuk mengadopsi metode ini dalam penelitian terhadap *Otus angelinae*, yang hingga kini masih minim dokumentasi ilmiahnya di wilayah Jawa Tengah. asi merupakan.

N. Tantangan dalam Penelitian Bioakustik di Lapangan

Meskipun bioakustik telah terbukti sebagai metode yang efektif dan non-invasif dalam studi keanekaragaman hayati, terutama untuk spesies burung nokturnal seperti burung hantu, terdapat tantangan yang sering dihadapi dalam pengimplementasiannya di lapangan. Tantangan ini dapat berasal dari faktor teknis, lingkungan, maupun keterbatasan sumber daya penelitian (Blumstein et al., 2011; Depraetere et al., 2012). Salah satu tantangan utama adalah interferensi suara dari lingkungan sekitar. Suara angin, hujan, aliran sungai, serangga malam, hingga aktivitas manusia dapat menyebabkan gangguan sinyal pada rekaman suara, sehingga mengurangi kualitas data akustik dan menyulitkan proses identifikasi spesies. Di habitat tropis seperti Gunung Merbabu, kondisi ini menjadi kendala yang signifikan, terutama saat musim hujan atau saat lokasi berada dekat dengan jalur pendakian.

Selain itu, penempatan mikrofon di lapangan sering kali terbatas oleh medan yang sulit, vegetasi yang sangat rapat, dan aksesibilitas lokasi yang rendah. Posisi alat rekam yang tidak ideal dapat memengaruhi kualitas suara yang terekam, misalnya karena terhalang pepohonan atau terlalu dekat dengan permukaan tanah, yang menyebabkan pantulan suara tidak merata (Gibb et al., 2019). Tantangan lainnya berkaitan dengan interpretasi data suara, terutama dalam memperkirakan jarak sumber suara. Dalam penelitian ini, estimasi jarak suara dilakukan berdasarkan analisis spektral tanpa pengukuran intensitas akustik absolut, sehingga hasil peta distribusi spasial bersifat pendekatan, bukan representasi jarak sebenarnya. Topografi, kelembapan, dan jenis vegetasi juga dapat memengaruhi bagaimana suara merambat dan terekam oleh alat (Sueur et al., 2008).

Secara praktis, proses identifikasi spesies berdasarkan vokalisasi memerlukan data pembandingan yang akurat dan berkualitas tinggi. Namun, untuk spesies seperti *Otus angelinae*, referensi suara yang tersedia masih sangat terbatas. Hal ini dapat menimbulkan ambiguitas dalam analisis, khususnya jika ada spesies lain dengan vokalisasi yang serupa di lokasi yang sama. Dari sisi sumber daya, tantangan umum lainnya meliputi keterbatasan alat perekam berstandar penelitian, kebutuhan penyimpanan data yang besar, dan waktu analisis yang relatif lama karena rekaman perlu diperiksa satu per satu secara manual atau semi-otomatis.

Meskipun demikian, tantangan-tantangan tersebut tidak mengurangi potensi besar metode bioakustik sebagai alat konservasi dan riset

keanekaragaman hayati. Dengan perencanaan yang matang dan tepat, pemilihan lokasi strategis, dan penggunaan perangkat lunak akustik yang sesuai, kendala tersebut dapat diminimalisasi untuk menghasilkan data yang bermanfaat dan akurat, khususnya dalam studi spesies yang sulit dideteksi secara langsung seperti *Otus angelinae*.

O. Temuan Baru dan Kontribusi bagi Konservasi

Penelitian ini memiliki potensi untuk memberikan kontribusi baru yang signifikan dalam bidang konservasi burung endemik Indonesia, khususnya Celepuk Jawa (*Otus angelinae*), yang hingga saat ini masih minim data distribusi dan karakteristik ekologi. Mengingat bahwa sebagian besar literatur yang tersedia bersifat terbatas, tidak terdigitalisasi, atau hanya berupa catatan lapangan singkat (van der Heide, 1994; BirdLife International, 2016), pendekatan ilmiah berbasis data vokalisasi dapat mengisi kekosongan informasi tersebut. Salah satu temuan penting yang diharapkan dari penelitian ini adalah konfirmasi keberadaan *Otus angelinae* di wilayah Taman Nasional Gunung Merbabu, yang hingga kini belum tercatat secara resmi dalam basis data nasional maupun global. Jika keberadaannya dapat dibuktikan melalui deteksi vokalisasi, maka hal ini akan memperluas pemahaman tentang sebaran geografis spesies dan dapat menjadi rujukan baru dalam evaluasi status konservasi jangka panjang.

Melalui karakterisasi akustik terhadap vokalisasi spesies, penelitian ini juga berkontribusi dalam membangun bank data vokal (*acoustic reference library*) untuk spesies endemik Jawa. Basis data ini memiliki peran yang

penting untuk pengembangan metode monitoring jangka panjang dan memungkinkan integrasi dengan teknologi pengenalan suara otomatis di masa depan (Blumstein et al., 2011). Dari sisi metodologi, penelitian ini juga menunjukkan bahwa bioakustik dapat digunakan sebagai pendekatan alternatif dan komplementer terhadap metode observasi visual yang selama ini menjadi standar dalam studi burung. Ini menjadi penting dalam konteks spesies yang sulit dideteksi secara langsung karena sifatnya yang nokturnal, pemalu, dan hidup di habitat tertutup.

Kontribusi praktis lain adalah memberikan informasi dasar bagi pengelola kawasan konservasi, khususnya Balai Taman Nasional Gunung Merbabu, dalam menyusun strategi perlindungan spesies dan pengelolaan habitat yang lebih responsif terhadap keberadaan burung hantu endemik. Data hasil penelitian ini juga dapat digunakan sebagai dasar untuk menyusun sistem pemantauan rutin berbasis bioakustik yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Dengan demikian, selain mengisi kekosongan informasi ilmiah, penelitian ini diharapkan dapat mendorong penguatan praktik konservasi berbasis data di Indonesia, dan memperkuat posisi penting kawasan pegunungan tengah Jawa sebagai wilayah yang layak diprioritaskan dalam perlindungan spesies endemik

P. Kerangka Konseptual

Penelitian ini bertujuan untuk memahami keberadaan dan pola distribusi spasial *Otus angelinae* di kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu dengan

menggunakan pendekatan bioakustik. Vokalisasi burung hantu digunakan sebagai indikator kehadiran spesies, yang kemudian dianalisis berdasarkan titik-titik perekaman di lokasi dengan elevasi yang bervariasi.

Kerangka konseptual dalam penelitian ini didasarkan pada asumsi bahwa:

1. Spesies burung hantu tertentu memiliki panggilan vokal yang unik dan dapat diidentifikasi secara akustik.
2. Aktivitas vokalisasi memiliki keterkaitan dengan faktor lingkungan seperti elevasi.
3. Distribusi spasial spesies dapat dipetakan secara tidak langsung melalui sebaran vokalisasi yang terekam.

Dalam konteks penelitian ini, karakteristik vegetasi tidak dianalisis secara rinci karena keterbatasan data lapangan. Oleh karena itu, analisis spasial difokuskan pada hubungan antara elevasi dan aktivitas vokalisasi, tanpa mengkaji tipe habitat secara klasifikatif.

Q. Hipotesis

Berdasarkan kerangka tersebut, hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah:

1. *Otus angelinae* terdeteksi melalui vokalisasi di beberapa titik dalam kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu.
2. Vokalisasi *Otus angelinae* memiliki ciri khas akustik yang dapat diidentifikasi melalui analisis spektral, seperti frekuensi dominan dan durasi.

3. Deteksi vokalisasi *Otus angelinae* lebih sering terjadi pada titik-titik rekaman yang berada di elevasi menengah hingga tinggi (>1500 mdpl).

Hipotesis tersebut akan diuji menggunakan data hasil perekaman lapangan, visualisasi spektrogram, serta pemetaan titik vokalisasi berdasarkan data koordinat dan ketinggian.

