

Mengekstrak Parameter Fungsi Skala Kanopi di Kawasan Konservasi Lembah Danum, Sabah Menggunakan Data Pesawat Udara LiDAR

(Retrieval of Canopy Scale Tree Functional Traits in Danum Valley Conservation Area, Sabah Using Airborne LiDAR)

Aisyah Marliza Muhmad Kamarulzaman^a, Wan Shafrina Wan Mohd Jaafar^{a*}, Mohd Nizam Mohd Said^{a,b}, Hamdan Omar^c, Nurul Asyiqin Abu Bakar^a & Siti Nor Maizah Saad^d

^aInstitut Perubahan Iklim, Pusat Pencerapan Bumi, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia,

^bJabatan Sains Biologi dan Bioteknologi, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia,

^cInstitut Penyelidikan Perhutanan Malaysia (FRIM), Malaysia

^dKolej Pengajian Alam Bina, Universiti Teknologi MARA Cawangan Perlis, Malaysia

*Corresponding author: wanshafrina@ukm.edu.my

Received 10 June 2023, Received in revised form 8 February 2024

Accepted 15 March 2024, Available online 30 May 2024

ABSTRAK

Restorasi hutan merupakan proses pemulihan dan keseimbangan ekosistem hutan yang mengalami kemerosotan melalui pelbagai pendekatan seperti penghutanan semula, pemulihan tanah, pemuliharaan spesies terancam, dan pencegahan kebakaran hutan. Pengumpulan data lapangan secara konvensional mempunyai banyak batasan, seperti litupan reruang yang terhad, kesukaran pengukuran tinggi pokok, dan ralat pengukuran manusia yang menghalang pemantauan dan pengekstrakan parameter fungsi skala kanopi di pelbagai jenis hutan. Kajian ini membincangkan kepentingan restorasi hutan dan cabaran yang berkaitan dengan pengukuran lapangan konvensional dalam mengekstrak parameter fungsi skala kanopi dengan menggunakan teknologi pengesanan dan julat cahaya (LiDAR) pesawat udara untuk maklumat yang lebih tepat melibatkan hutan simpanan hutan dara, restorasi hutan semula jadi dan restorasi hutan secara aktif di Kawasan Pemuliharaan Lembah Danum dan INFAPRO, Sabah. Kajian ini menggunakan pelbagai algoritma pemprosesan, persamaan alometrik, dan kaedah pemodelan korelatif. Pada peringkat grid, pelbagai parameter fungsi skala kanopi daripada LiDAR telah diukur iaitu indeks luas daun, pecahan jurang dan kepadatan kanopi. Regresi linear dan analisis perhubungan varians dianalisis antara parameter fungsi skala kanopi dan jenis rawatan hutan. Keputusan menunjukkan nilai R^2 yang tinggi antara 0.73 hingga 0.91, statistik F Anova dan nilai kebarangkalian (p) menunjukkan bahawa terdapat hubungan yang kuat antara data lapangan dan nilai LiDAR yang diekstrak untuk parameter fungsi skala kanopi bagi jenis rawatan hutan yang berbeza. Dapatan kajian menunjukkan bahawa teknologi LiDAR berkesan dalam meramalkan skala kanopi berfungsi dan berpotensi untuk memberikan maklumat yang tepat dan terperinci mengenai kawasan restorasi hutan untuk usaha pemuliharaan dan pengurusan masa hadapan.

Kata Kunci: Restorasi hutan; LiDAR; Parameter fungsi skala kanopi

ABSTRACT

Forest restoration is an effort to restore the growth and balance degraded forest ecosystems, through various approaches such as reforestation, land restoration, endangered species conservation, and forest fire prevention. Conventional field data collection challenges, such as limited spatial coverage, tall tree measurement difficulties, and human observation errors, hinder canopy-scale functional traits monitoring and extraction across forest treatments. The study addresses

the importance of forest restoration and the challenges associated with conventional field measurements in extracting canopy scale functional traits by utilizing Airborne light detection and ranging (LiDAR) technology for more accurate information involving the old growth, natural regeneration, and active restored forests in Danum Valley Conservation Area and INFAPRO Sabah. The study utilized diverse processing algorithms, allometric equations, and correlative modeling methods. At the grid level, various LiDAR functional traits were calculated, leaf area index, gap fraction, and canopy density, alongside assessment of multiple correlative modeling strategies. Linear regression and analysis of variance analyzed relationships between LiDAR-derived and field-derived canopy scale functional traits between different forest treatments. The results showed high R-squared values ranging from 0.73 to 0.91, Anova F-statistics and probability values (p) showed that there is a strong relationship between the field data and predicted LiDAR values for three-canopy scale functional traits in different forest treatment types. These results indicate that LiDAR technology is effective in predicting canopy scale functional traits and has the potential to provide accurate and detailed information on forest restoration areas for future conservation and management efforts.

Keywords: Forest Restoration; LiDAR; Canopy Scale Functional Traits

PENGENALAN

Restorasi hutan adalah usaha untuk memulihkan keadaan dan fungsi hutan setelah rosak atau mengalami kemerosotan. Kaedah restorasi hutan termasuklah memulihkan hutan yang dibalok, memulihkan struktur tanah yang terganggu, mengekalkan hutan, memulihkan habitat dan spesies yang terancam, mengawal dan mencegah kebakaran hutan (Brancalion et al. 2019; IUCN 2021; Lamb, Stanturf, and Madsen 2012). Matlamat utama program restorasi hutan adalah untuk meningkatkan fungsi hutan dan faedahnya kepada alam sekitar, hidupan dan komuniti yang bergantung kepada sumber hutan secara langsung atau tidak. Lembah Danum di Sabah merupakan salah satu daripada kawasan

yang memfokuskan kepada program restorasi hutan (Hayward et al. 2021).

Terdapat tiga jenis hutan di Lembah Danum yang secara umumnya boleh dibezakan berdasarkan keadaan hutan, usaha pemulihan dan penyelidikan yang dilakukan (Kementerian Tenaga dan Sumber Asli 2021). Setiap jenis restorasi mempunyai definisi, tujuan dan kepentingan yang berbeza, yang penting dalam usaha memulihkan dan memelihara ekosistem hutan (Jadual 1). Dengan memahami perbezaan ini, pihak berkepentingan boleh merancang dan melaksanakan strategi pemulihan yang sesuai mengikut keadaan dan matlamat yang diperlukan (Chazdon and Laestadius 2016; Camarretta et al. 2020; de Jong et al. 2021; Wu et al. 2020a).

JADUAL 1. Jenis-jenis Restorasi Hutan

Jenis Restorasi Hutan	Hutan Simpanan Hutan Dara	Restorasi Hutan Semula Jadi	Restorasi Hutan secara aktif
Definisi	Hutan yang belum pernah mengalami aktiviti penerokaan dan telah mencapai peringkat pertumbuhan matang. Memiliki ciri-ciri seperti pokok besar dan tua, kayu mati yang banyak, dan lapisan daun yang tebal. Memberikan habitat dan sumber kepada pelbagai jenis spesies tumbuhan dan haiwan sepanjang tahun (Tanioka et al. 2020).	Usaha pemulihan hutan yang telah rosak atau merosot akibat aktiviti pembalakan. Diberikan bantuan kepada proses pemulihan hutan secara semula jadi, tanpa campur tangan manusia yang terlalu banyak (Hayward et al. 2021).	Dilakukan pada hutan yang rosak teruk akibat aktiviti pembalakan. Usaha pemulihan di kawasan ini lebih intensif dan aktif, melibatkan penanaman pokok baru atau perbaikan keadaan tanah agar lebih sesuai untuk pertumbuhan hutan. Memerlukan campur tangan manusia yang lebih besar (Keller et al. 2023; Philipson et al. 2020).
Tujuan	Memelihara kepelbagaian biologi dan kelestarian ekosistem hutan yang sudah matang.	Memulihkan hutan secara semula jadi tanpa campur tangan manusia yang berlebihan.	Memulihkan hutan yang teruk akibat aktiviti pembalakan melalui penanaman pokok baru dan perbaikan tanah.
Kepentingan	Melindungi spesies, mengawal iklim, dan menyediakan sumber semula jadi dan ekonomi tempatan. Ia juga penting sebagai pembekal air bersih.	Penting dalam memulihkan hutan yang terkena impak ringan hingga sederhana akibat aktiviti pembalakan.	Penting dalam mengembalikan keadaan hutan yang sihat dan produktif.

Terdapat beberapa jenis pengukuran yang telah dijalankan dalam konteks restorasi hutan, yang bertujuan untuk memantau dan menilai keberkesanan usaha pemulihan yang dijalankan. Salah satunya adalah pengukuran konvensional iaitu pengukuran langsung di lapangan. Pengukuran konvensional ini melibatkan tinjauan lapangan yang dijalankan oleh pasukan pakar, yang merekodkan pelbagai parameter yang berkaitan dengan keadaan hutan dan proses restorasi. Pengukuran lapangan bagi sesebuah restorasi hutan menggunakan teknologi Sistem Satelit Navigasi Sejagat (GNSS) sebagai alat utama untuk pemetaan dan pemantauan. GNSS dapat digunakan untuk pelbagai aplikasi pengurusan hutan, menyediakan maklumat lokasi yang tepat untuk pelbagai elemen ekosistem hutan. GNSS juga digunakan untuk mengukur inventori hutan, seperti diameter pokok, ketinggian pokok dan kawasan penutup kanopi. Data inventori ini penting untuk pengurusan hutan yang mampan, membolehkan keputusan mengenai penyelenggaraan dan perlindungan hutan dibuat (Mazlan et al. 2023; Mohd Ghazali et al. 2022). Namun, pengukuran data di lapangan ini mempunyai beberapa kelemahan, seperti liputan ruwang yang terhad akibat faktor kekangan masa dan sumber. Proses ini juga agak sukar untuk pengukuran pokok-pokok besar yang tinggi dan kawasan yang sukar untuk diakses (Saad et al. 2023). Pengukuran lapangan juga tertakluk kepada ralat dan selisih yang dilakukan oleh manusia, seperti teknik pengukuran dan pemerhatian. Bagi mengatasi kelemahan dan keterbatasan yang ada pada pengukuran lapangan, maka teknologi penderiaan jauh telah diperkenalkan (Amri Mohd et al. 2018; Sharil et al. 2005).

Teknologi penderiaan jauh merupakan pemantauan objek jarak jauh dapat membantu mengurangkan kelemahan tersebut (Kamarulzaman et al. 2022; Mohd Jaafar et al. 2020; Jaafar et al. 2020; Mohan et al. 2021; Saad et al. 2020; Muhmad Kamarulzaman et al. 2021). Teknologi ini membolehkan pengumpulan data lebih pantas dan lebih meluas, membolehkan penyelidik memantau perubahan hutan dengan lebih berkesan dan tepat (Ahmad et al. 2023). Data yang diperolehi daripada teknologi penderiaan jauh dapat digunakan untuk mengenal pasti pola perubahan hutan, memetakan kerosakan, memantau kebakaran, dan mengenal pasti aktiviti manusia terhadap hutan (Wu et al. 2020b). Salah satunya adalah dengan menggunakan teknologi pengesanan dan julat cahaya (LiDAR). LiDAR ialah sistem teknologi pengimbasan canggih menggunakan isyarat cahaya laser yang dipancarkan untuk mendapatkan maklumat tentang bentuk dan struktur permukaan bumi serta objek di atasnya, seperti bangunan dan pokok (Almeida et al. 2019; Dong & Chen 2018; Becknell et al. 2018; Almeida et al. 2019; Phua et al. 2016). Penderia LiDAR biasanya dipasang pada pesawat

seperti helikopter atau kapal terbang kecil dan digunakan dalam pelbagai aplikasi seperti pemetaan topografi, pemantauan alam sekitar, dan pemetaan kawasan hutan (Lefsky et al. 2002).

Penderiaan LiDAR banyak digunakan dalam memantau kesan restorasi hutan menggunakan signal gelombang penuh atau diskret. Data LiDAR memberikan maklumat tentang ketinggian pokok, kepadatan kanopi, struktur dan topografi tanah, serta mengenal pasti kawasan hutan yang rosak atau terosot. Data LiDAR juga digunakan untuk memantau pertumbuhan pokok dan mengukur keberhasilan program pemulihan hutan (Almeida, Broadbent, et al. 2019; Almeida, Stark, et al. 2019). Ketepatan data LiDAR dalam mengekstrak kanopi hutan sangat dipengaruhi oleh resolusi, kekuatan signal, dan teknik pemrosesan. Semakin tinggi resolusi data LiDAR, semakin terperinci maklumat dapat dikesan, termasuk elemen kecil dalam kanopi seperti dahan dan silara. Kekuatan signal LiDAR pula mempengaruhi kemampuan penderia menembusi kanopi dan mencapai permukaan tanah. Penggunaan teknik seperti segmentasi, tapisan, dan pengkelasan penting dalam menentukan struktur kanopi. Pemilihan algoritma yang tepat dan parameter yang bersesuaian dapat meningkatkan ketepatan. Kepadatan pohon dan jenis tumbuhan juga memengaruhi ketepatan data LiDAR (Duran, Ozcan, and Atik 2021; Brown, Narine, and Gilbert 2022; Jaafar et al. 2018; Phua et al. 2016). Penggunaan data LiDAR di Sabah dijalankan dalam penyelidikan yang dijalankan di Kawasan Konservasi Lembah Danum (DVCA) dan INFAPRO serta penyelidikan menggunakan data LiDAR untuk memetakan ketinggian dan struktur hutan di tiga jenis kawasan restorasi hutan yang berbeza dan menghasilkan maklumat berguna untuk memantau keadaan hutan (Reynolds et al. 2011).

Teknologi data LiDAR mampu mengekstrak parameter fungsi skala kanopi seperti Indeks Luas Daun (LAI), pecahan jurang dan kepadatan kanopi di sesebuah kawasan hutan dengan tepat (Aguirre-Gutiérrez et al. 2021; Mazlan et al. 2023). LAI ditakrifkan sebagai separuh daripada jumlah luas daun seunit per luas permukaan tanah dan boleh diukur secara langsung atau tidak langsung. Pengukuran LAI secara konvensional telah menghasilkan kerosakan yang besar kerana pokok terpaksa ditebang untuk mendapat ukuran yang tepat. Maka kajian yang menggunakan teknologi LiDAR dapat menilai dan mengekstrak LAI di DVCA dan INFAPRO, Sabah. Selain itu, maklumat penting struktur dan ciri-ciri kanopi tumbuhan seperti kepadatan, ketinggian dan bentuk tumbuhan boleh diekstrak dengan tepat menggunakan LiDAR (Pearse 2017; Tanioka et al. 2020).

LAI ialah pembolehubah kanopi penting yang diperlukan untuk banyak kajian fisiologi dan ekosistem (Menzies et al. 2007), juga merupakan parameter berguna

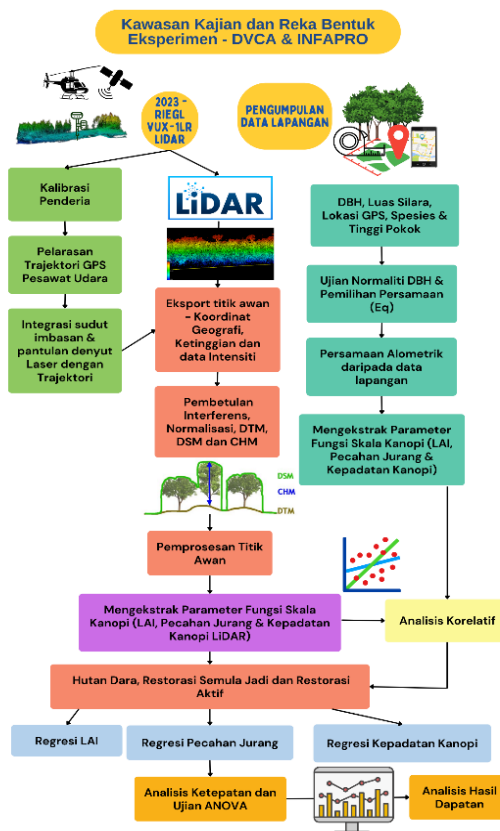
yang dijadikan sebagai input bagi kebanyakan model di kebanyakan kajian seperti persilangan kanopi, transpirasi, fotosintesis, dan produktiviti pengeluaran utama (John et al. 2015) (Stark et al. 2012). Pengekalan gas dalam jumlah daun seperti karbon dioksida yang terdapat pada kanopi secara langsung berkait rapat dengan jumlah karbon yang dibebaskan ke atmosfera (Habermann et al. 2019) (Jensen 2009). Pecahan jurang pula didefinisikan sebagai ukuran berapa banyak bukaan yang boleh dilihat melalui celahan kanopi hutan. Dalam erti kata lain, pecahan jurang mewakili jumlah cahaya matahari yang boleh menembusi kanopi dan mencecah lantai hutan. Pecahan jurang boleh diukur menggunakan pelbagai kaedah, termasuk fotografi hemisfera dan data LiDAR. Dalam LiDAR pula, sinar pancaran laser yang dihantar daripada penderia akan memantulkan semula permukaan kanopi daripada bumi, dan jumlah pantulan tersebut dapat menganggarkan ketinggian kanopi dan juga bukaan antara pokok. Pecahan jurang adalah parameter penting untuk memahami struktur dan fungsi pertumbuhan hutan, kerana ia mempengaruhi jumlah cahaya, suhu, dan lembapan yang sampai ke lantai hutan (Pearse 2017; Heiskanen et al. 2015). Kepadatan kanopi ialah ukuran jumlah litupan tumbuh-tumbuhan dalam hutan atau sistem tumbuhan lain, biasanya dinyatakan sebagai perbandingan kawasan tanah yang diliputi

oleh unjuran menegak kanopi tumbuh-tumbuhan. Ia sering digunakan sebagai indikator kesihatan atau produktiviti hutan, serta dapat menganggarkan jumlah simpanan karbon dan pemboleh ubah ekologi yang lain (Li et al. 2022a).

Kajian ini bertujuan untuk mengekstrak parameter fungsi skala kanopi untuk tiga jenis restorasi hutan yang berbeza di Lembah Danum dan INFAPRO, Sabah dengan menggabungkan data LiDAR dan data lapangan. Pada peringkat skala grid, beberapa parameter skala fungsi kanopi LiDAR dinilai melibatkan nilai DBH dari lapangan, LAI, pecahan jurang dan kepadatan kanopi. Analisis kajian ini melibatkan pelbagai teknik pemprosesan data, penggunaan persamaan alometrik, algoritma model, dan model pemodelan korelatif daripada kepelbagaian kompleksiti.

KAEDAH KAJIAN

Dalam kajian ini, data LiDAR dan data lapangan digabungkan untuk menghasilkan parameter fungsi skala kanopi hutan bagi setiap kawasan restorasi hutan iaitu kawasan H.S hutan dara, restorasi hutan secara semula jadi, dan restorasi hutan secara aktif. Rajah 1 menunjukkan carta alir keseluruhan metodologi bagi kajian ini.



RAJAH 1. Carta alir keseluruhan kajian

KAWASAN KAJIAN DAN REKA BENTUK PLOT
EKSPERIMEN

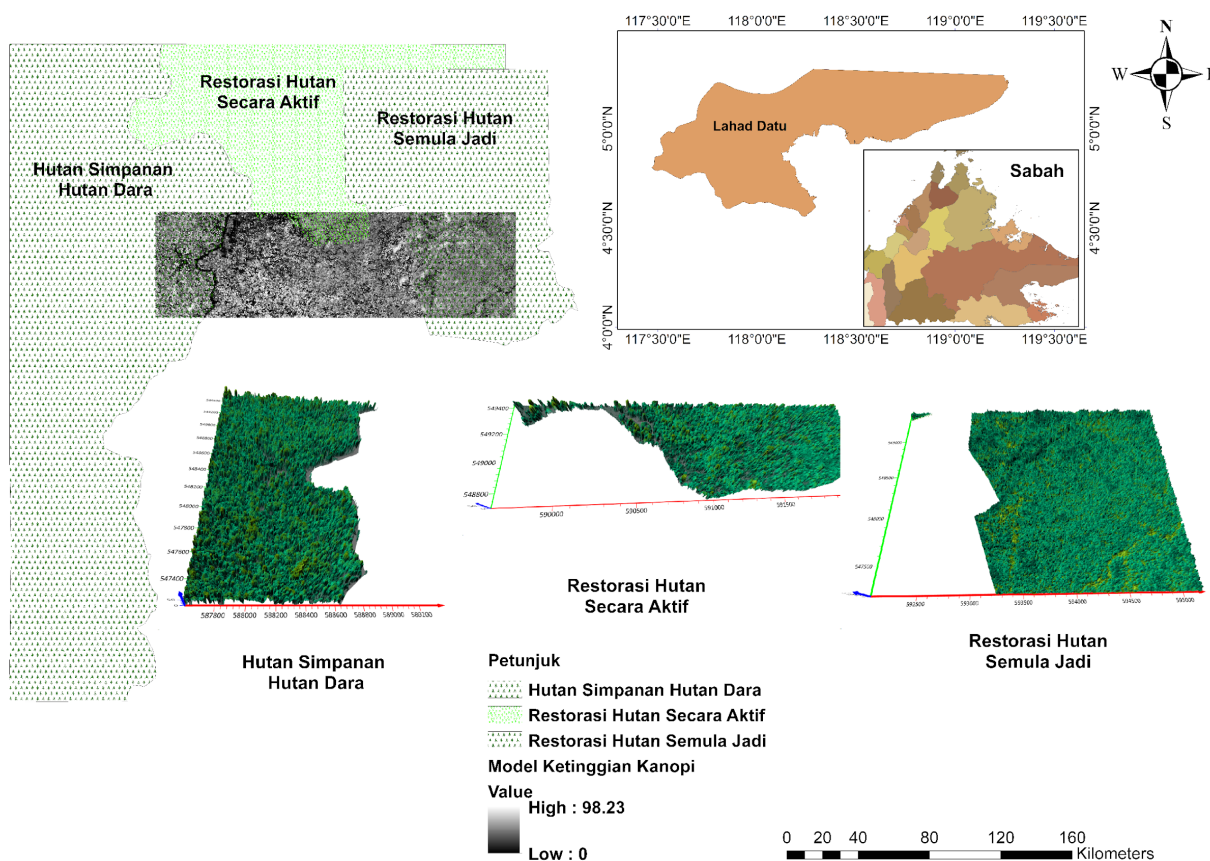
Kajian ini terdiri daripada dua tapak pensampelan data di Lahad Datu, Sabah. Tapak pertama adalah di DVCA meliputi kawasan H.S hutan dara dengan plot pengukuran yang telah ditetapkan, dan tapak kedua adalah INFAPRO yang meliputi dua jenis hutan di dalamnya iaitu restorasi hutan semula jadi dan restorasi hutan secara aktif (Rajah 2). INFAPRO merupakan kawasan yang mempunyai keluasan 1268 km² dan pembalakan telah dijalankan dengan kaedah Pembalakan Berimpak Rendah (RIL) dari tahun 1973-1993. Plot yang dipulihkan secara aktif dan dijana semula secara semula jadi dengan saiz purata 25 km². Pemulihan semula telah dijalankan dari tahun 1993 hingga 2004. DVCA ialah tapak H.S hutan dara yang merupakan hutan terkawal, terletak di Lahad Datu dan menjangkau lebih 438 km². Ianya meliputi 50 hektar plot jangka panjang yang telah ditubuhkan pada 2010. Seluas

2 ha daripada kawasan tersebut juga turut dijadikan sebagai plot kajian karbon bagi di bawah Forest-GEO. Tiga reka bentuk plot eksperimen kawasan restorasi hutan dan pensampelan secara kaedah grid berserta koordinat ditunjukkan di dalam Jadual 2.

JADUAL 2. Reka bentuk pensampelan bagi tiga jenis restorasi hutan.

Nama Kawasan	Koordinat lokasi	Bahagian
Hutan Simpanan Hutan Dara	4°57'22.72"N, 117°47'37.06"E	DVCA
Restorasi Hutan Semula jadi	4°58'13.61"N, 117°49'31.81"E	INFAPRO
Restorasi Hutan Secara aktif	4°57'49.24"N, 117°51'17.88"E	INFAPRO

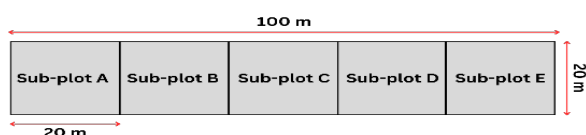
Terdapat tiga jenis restorasi hutan yang digunakan dalam kajian ini. Kawasan DVCA terdiri daripada kawasan hutan simpanan hutan dara, dan INFAPRO terdiri daripada kawasan restorasi secara aktif dan semula jadi (Martijn 2007).



RAJAH 2. Kawasan kajian

PENGUMPULAN DATA LAPANGAN

Untuk mengetahui bagaimana parameter fungsi skala kanopi hutan seperti pecahan jurang, kepadatan kanopi hutan dan Indeks Luas Daun (LAI) dapat diukur melalui teknologi LiDAR dan dikaitkan dengan pemboleh ubah bagi inventori hutan iaitu tinggi pokok, DBH dan diameter silara, maka pengumpulan data lapangan dijalankan untuk mengukur pemboleh ubah inventori hutan tersebut. Bagi pengumpulan data di lapangan, strategi segi empat tepat digunakan. Plot sampel dibahagikan kepada lima petak kecil berukuran 20 meter darab 20 meter (Rajah 3). Sebanyak 30 plot persegi dengan keluasan gabungan 12,000 m² telah dibanci dibanci, terbahagi kepada plot pembalakan memilih (20 plot setiap satu) dan plot hutan tidak dibalok (10 plot setiap satu). Dalam setiap plot pensampelan, setiap pokok yang hidup dengan DBH ≥ 15 cm diambil ukuran diameter, tinggi pokok, luas silara, dan kepadatan silara. DBH di ukur pada ketinggian sekitar 1.3 m di atas permukaan tanah (Mazlan et al. 2023). Semua ukuran direkodkan dalam borang cerapan. Titik tengah setiap plot hutan dan lokasi setiap pokok diukur dengan tepat menggunakan *real-time kinematic* (RTK) GNSS. Spesies pokok dalam setiap plot hutan juga dicatat, dan spesies dominan ditentukan berdasarkan jumlah keseluruhan spesies yang ada.



RAJAH 3. Reka bentuk plot pengukuran di lapangan

CERAPAN DATA LIDAR

Data LiDAR dicerap menggunakan penderia RIEGL VUX-1LR bertarikh Jun 2023. Penerbangan ini dilakukan pada ketinggian 300 meter dan memiliki titik kepadatan awan sebanyak 308, 628, 134 titik, dengan rata-rata kepadatan sebesar 25.36 sampel per meter persegi. Jarak antara titik LiDAR adalah 0.2305 meter. Koordinat data LiDAR adalah UTM Zon 50/WGS84/meter dan memiliki ketepatan sebesar 15 milimeter. Penderia LiDAR RIEGL VUX-1LR sangat sesuai untuk tujuan pemetaan dan ukur. Penderia ini dipasang pada helikopter bagi pencerapan data beresolusi tinggi dengan cepat dan cekap. Penderia ini dapat menghasilkan titik kepadatan awan sehingga 600,000 titik sesaat, menggunakan laser inframerah yang dapat

menembusi tumbuh-tumbuhan. Penderia mempunyai PRR sehingga 1.2 MHz, julat ketepatan +/- 5 mm, FOV 330 darjah dan pengimbasan pada 400 baris sesaat. Ia boleh beroperasi pada ketinggian sehingga 1,000 meter, menjadikannya sesuai untuk projek pemetaan berskala besar. Jadual 3 mewakili ringkasan cerapan data di kawasan kajian. Berikutan cerapan data LiDAR, trajektori GPS pesawat untuk setiap kawasan diselaraskan dengan stesen pangkalan GPS di lapangan. Selepas itu, perisian RIEGL (Riegl GmbH) digunakan untuk mengintegrasikan sudut imbasan dan pantulan denyut laser dengan trajektori. Fail titik kepadatan awan dieksport bersama koordinat geografi, ketinggian dan data intensiti yang berkaitan.

JADUAL 3. Spesifikasi Cerapan Set Data LiDAR

Item	Spesifikasi
Tarikh	Jun 2023
Penderia	RIEGL VUX-1LR
Ketinggian Penerbangan	300 m
Pesongan Gelombang	0.5 m rad
Sudut Pengimbasan	$\pm 20^\circ$
Titik Kepadatan Awan	308, 628, 134
Purata Titik Kepadatan Awan	25.36 samples/m ²
Jarak titik LiDAR	0.2305 m
Koordinat	UTM Zon 50/WGS84/ meters
Ketepatan	15 mm

PRA-PEMROSESAN DAN ANALISIS DATA LIDAR

LidR adalah pakej untuk perisian R yang dapat memproses titik kepadatan awan dan fungsinya direka khas dengan pakej analisis lain dalam perisian R, seperti *sp*, *sf*, dan *raster* (Roussel et al. 2020). Dengan menggunakan pakej lidR, titik kepadatan awan dibahagikan kepada pantulan bumi (*ground returns*) serta lain-lain pantulan. Ia mengikuti falsafah *free and open source software* (FOSS) dengan menjadi sumber terbuka (*open source*) dan membenarkan pengubahsuaian dan penambahan daripada sumber pihak ketiga. Pakej yang direka bentuk ini sangat sesuai untuk pelbagai strategi pemprosesan, termasuk fungsi yang ditentukan oleh pengguna. Ia bertujuan untuk menjadikan manipulasi dan analisis data lebih mudah untuk pengguna serta direka khas untuk tujuan pencarian dan kaedah ujian (Bivand, Pebesma, and Gómez-Rubio 2013; Ghosh and Hijmans 2021). Pendekatan interpolasi pemberat jarak songsang (*inverse distance weight*) digunakan untuk membina Model Ketinggian Berdigit (DTM) dengan resolusi reruang 1-meter menggunakan titik lapangan.

DTM LiDAR yang terhasil kemudiannya digunakan dalam penghasilan titik kepadatan awan berasaskan titik awan selepas proses normalisasi. Semua titik ketinggian yang dicerap mempunyai hubung kait yang setara dengan datum aras tanah selepas normalisasi. Menggunakan ambang ketinggian 2.0 meter, titik kepadatan awan dibahagikan kepada pantulan kanopi (canopy returns) dan pantulan di bawah kanopi (below canopy returns).

UJIAN NORMALITI DBH

Ujian normaliti DBH merujuk kepada ujian statistik yang digunakan untuk menentukan sama ada sampel ukuran DBH yang di kumpul daripada populasi pokok mengikut taburan normal atau tidak. Ini penting kerana banyak analisis statistik, seperti analisis regresi, menganggap bahawa data-data adalah mengikut taburan normal. Ujian normaliti ini dilakukan dengan membandingkan antara pemerhatian taburan bagi ukuran DBH dengan jangkaan taburan normal. Kaedah ini dapat menentukan sama ada perbezaan antara kedua-duanya adalah signifikan secara statistik atau tidak signifikan. Untuk menentukan persamaan alometrik yang sesuai untuk LAI, ujian normaliti menggunakan kaedah Ryan Joiner dilakukan terhadap taburan data DBH. Ia menilai tahap korelasi antara data dan skor normal yang sepadan. Pekali korelasi yang lebih tinggi menunjukkan bahawa populasi lebih berkemungkinan adalah taburan normal.

PENGKASTRAKAN PARAMETER FUNGSI SKALA KANOPI

Kaedah Gravimetri digunakan untuk mengira LAI. Persamaan alometrik menghubungkan LAI dengan pekali DBH sekali gus mendedahkan LAI sebagai fungsi DBH menggunakan pekali yang diperolehi daripada pengukuran empirikal pokok di lapangan. Persamaan ini berguna untuk menganggarkan nilai LAI di kawasan yang pengukurannya langsung tidak boleh dilaksanakan, kerana DBH ialah pemboleh ubah inventori hutan yang agak mudah diperolehi. Oleh itu, persamaan alometrik LAI diuji, diperbaiki dan dibandingkan dengan nilai LAI yang diperolehi daripada data LiDAR bagi kawasan hutan hujan tropika (Kahyani et al. 2016). Daripada ujian normaliti yang dilakukan, jika nilai-p kurang daripada atau sama dengan aras signifikan, keputusannya adalah untuk menolak hipotesis nul dan kesimpulannya adalah data mengikut taburan normal. Persamaannya adalah seperti di bawah:

$$\ln(LAI) = a \ln(DBH) + b \quad (1)$$

di mana a ialah pekali 1.388 dan b ialah faktor skala -5.605 yang khusus untuk spesies pokok yang diukur. Persamaan ini digunakan untuk menganggarkan nilai LAI setiap pokok berdasarkan nilai DBH.

Jika nilai-p lebih besar daripada aras signifikan, keputusannya adalah gagal untuk menolak hipotesis nul. Ini bermakna tidak mempunyai bukti yang mencukupi untuk membuat kesimpulan bahawa data tidak mengikut taburan normal. Jadi, persamaannya adalah seperti berikut:

$$LAI = a(DBH) + B \quad (2)$$

di mana a ialah pekali 0.405 dan b ialah faktor skala -1.899 yang khusus untuk spesies pokok yang diukur.

Dalam pendekatan ini, anggaran awal LAI dikira menggunakan pengukuran transmiviti kanopi pada sudut zenith 57.5° , di mana pekali G adalah 0.5, dan kemudian proses lelaran digunakan untuk memperbaiki nilai anggaran LAI. Dengan mempunyai anggaran awal LAI dari julat zenith ini, membolehkan bentuk hubungan antara sudut zenith dan sudut kecondongan daun dianggarkan secara empirikal menggunakan regresi dan diekstrapolasi ke sudut zenith lain di luar julat ini (Weiss et al. 2004). Sebagai kesimpulan, penggunaan hukum *Beer-Lambert* terhadap kanopi tumbuhan menyediakan kaedah untuk menganggarkan LAI dengan mengukur pemerhatian pecahan jurang atau pemancaran dan bertentangan dengan model *Poisson* yang mengukur penghalang cahaya melalui kanopi. Bagi kaedah di dalam kajian ini, pecahan jurang (P) perlu dikira dalam julat zenith yang berbeza (θ). Persamaannya seperti di bawah (Pearse 2017):

$$GF = e\left[-G(\theta)x \frac{LAI}{\cos(\theta)}\right] \quad (3)$$

di mana G adalah pekali koefisien 0.5 dan θ adalah sudut $\theta = (57.5 \times \frac{\pi}{180})$

Kepadatan kanopi merujuk kepada jumlah liputan tumbuh-tumbuhan di sesebuah kawasan. Ia merupakan faktor penting dalam menentukan jumlah pintasan atau serapan cahaya oleh kanopi dan kadar fotosintesis tumbuh-tumbuhan. Jumlah hujan yang dihalang oleh tumbuh-tumbuhan sebelum sampai ke tanah juga dipengaruhi oleh kepadatan kanopi, seterusnya memberi kesan kepada kadar sejatan dan hakisan. Kepadatan kanopi boleh dianggarkan menggunakan hukum *Beer-Lambert*, yang menghubungkan

pengecilan cahaya dengan kepadatan tumbuhan (Li et al. 2022b; Zhao et al. 2011). Pecahan jurang, iaitu nisbah langit yang dapat dilihat melalui kanopi, boleh digunakan untuk mengira kepadatan kanopi sebagai 1 dibezakan dengan pecahan jurang. Pengiraan ini memberikan perkadaran kanopi yang terdapat di kawasan kajian.

$$\text{Kepadatan Kanopi} = 1 - (\text{Gap Fraction}) \quad (4)$$

Kod untuk memproses kumpulan data LiDAR yang dilihat dari atas (sekurang-kurangnya 50 setiap plot) dicipta menggunakan *MATLAB R2022b* (MathWorks Inc., Natick, MA, USA) and *Lidar Toolbox*. *Lidar Toolbox*TM menyediakan algoritma, fungsi dan aplikasi untuk mereka bentuk, menganalisis dan menguji sistem pemprosesan LiDAR (Fuentes et al. 2008). *Toolbox* ini dapat melakukan pengesanan halangan, penyesuaian bentuk, segmentasi semantik, pengesanan objek serta rektifikasi data LiDAR. Titik kepadatan awan terutamanya mengandungi titik permukaan dan tumbuhan. Data normalisasi berformat. las yang digunakan diberi nama “*old_growth.las*”, “*natural_regeneration.las*” dan “*actively_restored.las*” dimuat naik menggunakan fungsi *lasFileReaderObject*, dan data titik awan dibaca menggunakan fungsi *readPointCloud*. Titik awan yang terhasil kemudiannya divisualisasikan menggunakan fungsi *pcshow*. Setelah memuat naik data titik awan ke dalam perisian *MATLAB* dan mengelaskan titik-titik tersebut kepada kelas tanah dan kelas tumbuh-tumbuhan menggunakan fungsi *helperClassifyPoints*, titik awan divisualisasikan menggunakan fungsi *pcshow*. Fungsi *helperExtractTreeMetrics* di dalam *MATLAB* boleh digunakan untuk mengekstrak atribut setiap pokok daripada data titik awan yang diperolehi daripada data LiDAR.

Tujuan penggunaan perisian *MATLAB* adalah untuk memproses dan mengekstrak data LAI, pecahan jurang dan kepadatan kanopi secara automatik di tiga kawasan restorasi hutan yang berbeza di Lembah Danum, Sabah. Hasil dapatan kajian ini dapat melihat kekuatan hubungan dengan hasil parameter fungsi skala kanopi melalui persamaan alometrik. Data titik kepadatan awan yang tinggi daripada LiDAR membolehkan penilaian terhadap sifat-sifat pokok individu sebagai hasil tambahan di dalam pengukuran kawasan hutan. Titik-titik permukaan tanah dan tumbuh-tumbuhan daripada data titik kepadatan awan yang dicerap diekstrak untuk menghasilkan metrik LiDAR di kawasan hutan. Pecahan jurang (GF) (Fuentes et al. 2008) didefinisikan sebagai kebarangkalian sinar cahaya melalui kanopi tanpa melalui dedaun atau unsur tumbuhan lain. Pengukuran pecahan jurang dikira sebagai nisbah pantulan tanah berbanding jumlah semua pantulan. Kepadatan Kanopi (CD) adalah bahagian hutan yang

diliputi oleh unjuran menegak silara pokok. Ia dikira sebagai nisbah pantulan tumbuhan berbanding jumlah semua pantulan. LAI adalah jumlah luas daun satu sisi per unit luas permukaan. Nilai LAI dikira menggunakan persamaan:

$$LAI = \cos \cos (\text{ang}) \times \ln \ln (GF)k \quad (4)$$

(5)

di mana *ang* ialah sudut imbasan purata, GF ialah pecahan jurang, dan *k* ialah pekali koefisien, yang berkait rapat dengan taburan sudut daun. Purata sudut imbasan (*ang*) merujuk kepada purata sudut di mana pancaran LiDAR dipancarkan dan dipantulkan kembali kepada penerima. Ini berkaitan dengan struktur cerun dan permukaan hutan yang diimbas. Pecahan jurang (GF) ialah ukuran nisbah kawasan antara pokok atau struktur hutan lain yang tidak dilitupi oleh daun atau dahan. Pecahan jurang ini memainkan peranan dalam menentukan berapa banyak cahaya LiDAR boleh menembusi hutan dan sampai ke permukaan tanah. Pekali koefisien (*k*) ialah parameter yang berkaitan dengan taburan sudut daun dalam kanopi. Taburan sudut daun ini mempengaruhi keberkesanan daun menangkap cahaya matahari dan mengurangkan keamatan cahaya yang sampai ke permukaan tanah.

Menggunakan persamaan ini, data LiDAR yang dikumpul boleh diproses untuk menghasilkan anggaran nilai LAI, yang memberikan pandangan penting tentang struktur dan fungsi ekosistem hutan. Semakin tinggi nilai LAI, semakin tebal kanopi hutan dan lebih banyak daun yang terdapat dalam satu unit kawasan permukaan tanah, yang boleh mempengaruhi beberapa proses ekologi, termasuk kitaran air, fotosintesis dan penyerapan karbon.

Untuk menilai hubungan antara parameter fungsi skala kanopi yang dicerap di lapangan dan cerapan daripada LiDAR, analisis regresi linear dijalankan. Ini melibatkan analisis korelatif antara dua set data, iaitu kaedah statistik yang digunakan untuk menentukan kekuatan dan arah hubungan antara dua pemboleh ubah. Dalam kes ini, pemboleh ubah adalah pengukuran lapangan dan parameter yang diperolehi daripada LiDAR. Kekuatan sesuatu hubungan diukur menggunakan pekali korelasi (R^2), berjalut dari -1 hingga +1. Nilai +1 menunjukkan korelasi positif yang sempurna, nilai -1 menunjukkan korelasi negatif, dan nilai 0 menunjukkan tiada korelasi.

HASIL DAN PERBINCANGAN

Hasil kajian ini dibahagikan kepada 4 bahagian, iaitu hasil analisis diameter pada paras dada (DBH), paparan data

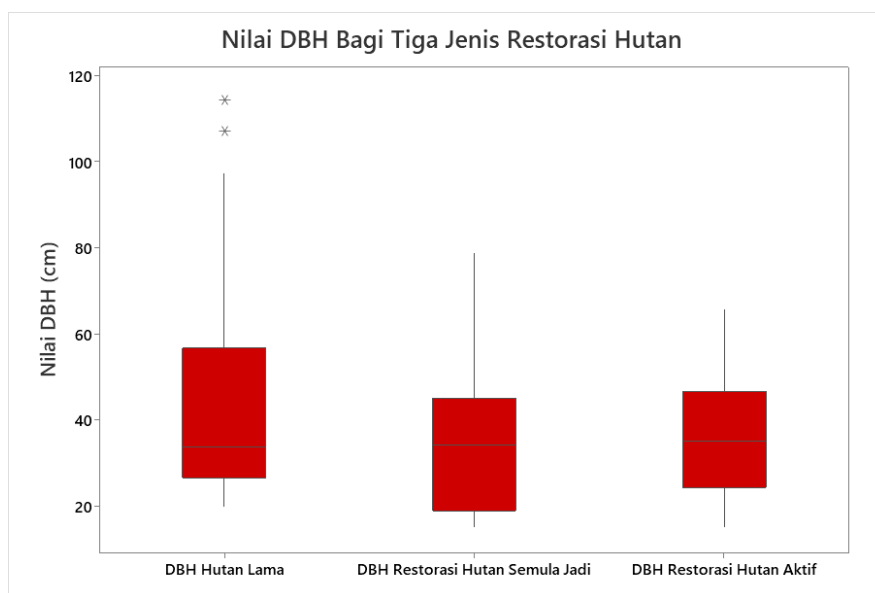
titik kepadatan awan Secara Visual, Ujian Normaliti DBH dan analisis korelatif parameter fungsi skala kanopi antara pengukuran lapangan dengan data LiDAR.

DIAMETER PADA PARAS DADA (DBH) BAGI TIGA JENIS RESTORASI HUTAN

Bagi ketiga-tiga kawasan restorasi hutan dalam kajian ini, terdapat 93 pokok yang dipulihkan secara aktif, 100 pokok tumbuh semula secara semula jadi, dan 46 pokok tua yang tidak pernah dibalak. 239 pokok terdiri daripada 34 keluarga dan 17 keluarga utama keseluruhannya, termasuk 83 pokok yang tergolong dalam kumpulan Dipterokarpa. Lain-lain spesies yang terlibat adalah Annonaceae, Meliaceae, Euphorbiaceae, Lauraceae and Malvaceae, Rhizophoraceae, Lythraceae, Polygalaceae, Fagaceae, Myrtaceae and Rubiaceae, Sapindaceae and Tetramelaceae, Ebenaceae, Lamiaceae, Magnoliaceae and Rutaceae and Sapotaceae, Cornaceae, Dilleniaceae, Myristicaceae, Oleaceae, Symplocaceae and Thymelaeaceae, Anacardiaceae, Fabaceae, Irvingiaceae, Lecythidaceae, Leguminosae,

Myrsinaceae, Myrtaceae, Phyllanthaceae, and Verbenaceae. Plot kebarangkalian DBH dalam Hutan Simpanan hutan dara, restorasi hutan semula jadi dan restorasi hutan secara aktif (Rajah 4) menghasilkan anggaran fungsi taburan kumulatif (CDF) dengan memplot nilai setiap pemerhatian terhadap anggaran kebarangkalian kumulatif.

Kawasan H.S hutan dara mempunyai pokok terbesar berdasarkan DBH dengan nilai maksimum 114.6 cm. Kawasan restorasi hutan semula jadi mempunyai nilai DBH maksimum yang rendah sedikit iaitu 74.8 cm. Manakala, kawasan hutan yang dipulihkan secara aktif mempunyai nilai DBH maksimum yang paling rendah di antara ketiga-tiga kawasan iaitu hanya 65.8 cm. Kesimpulannya, pokok-pokok di dalam hutan balak mempunyai DBH yang lebih kecil berbanding dengan pokok-pokok di dalam hutan yang tidak dibalak. Penemuan ini mungkin mempunyai beberapa implikasi, seperti pengurangan produktiviti, biojisim, atau kapasiti penyerapan karbon hutan yang dibalak berbanding dengan hutan yang tidak dibalak dan ianya konsisten dengan penyelidikan terdahulu (Hayward et al. 2021; Reynolds et al. 2011).



RAJAH 4. *Boxplot* bagi nilai DBH yang diperoleh bagi tiga jenis restorasi hutan

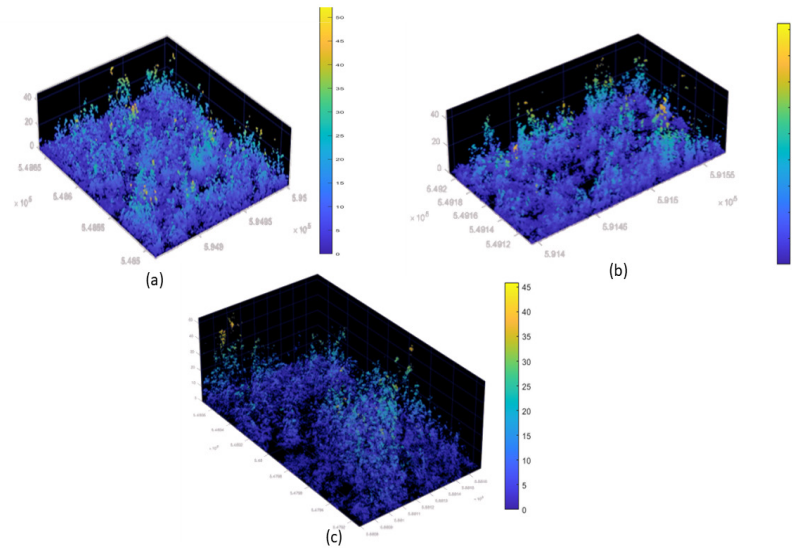
PAPARAN DATA TITIK KEPADATAN AWAN SECARA VISUAL

Kemudian, data titik awan dipaparkan secara visual dengan ketinggian pokok maksimum di tiga kawasan restorasi hutan dikira (Rajah 5). Kod yang dijana daripada perisian MATLAB menghasilkan plot serakan 3D titik awan, dengan warna setiap titik menunjukkan ketinggian pokok maksimum dan sepadan. Peta warna (colormap) dan bar warna (colorbar) di dalam perisian ini dilaraskan mengikut

keperluan untuk menunjukkan julat ketinggian pokok maksimum yang dikehendaki. Plot koordinat x, y, dan z ditetapkan kepada koordinat x, y, dan z data titik awan. Berdasarkan data yang diproses, plot yang dihasilkan menunjukkan kawasan H.S hutan dara mempunyai ketinggian pokok maksimum yang tertinggi iaitu 47 m, diikuti dengan restorasi hutan semula jadi iaitu 37 m seterusnya restorasi hutan secara aktif dengan ketinggian pokok maksimum terendah iaitu 35 m. Daripada hasil dapatan kajian ini, dapat dianalisis bahawa kawasan H.S

hutan dara mempunyai pokok yang lebih matang dan lebih besar berbanding dengan dua kawasan lain, mungkin dikaitkan dengan faktor seperti tempoh umur lebih lama kerana tidak melalui aktiviti pengusahaan, kualiti tanah dan keadaan iklim mikro yang baik. Ketinggian pokok

maksimum yang lebih rendah di kawasan restorasi hutan secara aktif disebabkan oleh usaha restorasi yang agak baru, yang mungkin tidak memberikan masa yang cukup untuk pokok itu matang dan membesar sepenuhnya.

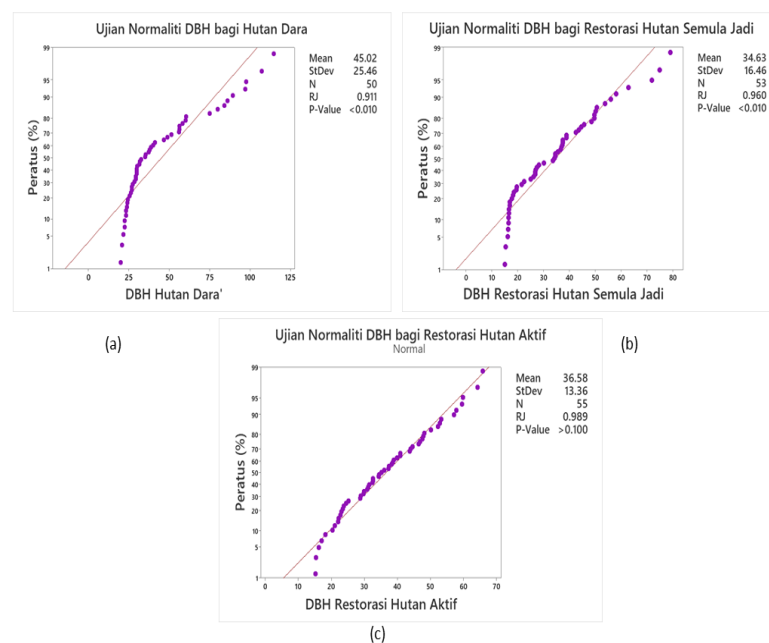


RAJAH 5. Data titik kepadatan awan secara visual dengan ketinggian pokok maksimum a) H.S hutan dara b) Restorasi secara semula jadi c) Restorasi secara aktif

UJIAN NORMALITI DBH

Jika nilai-p kurang daripada aras signifikan (umumnya 0.05), maka hipotesis nul normal ditolak, menunjukkan bahawa taburan data tidak normal. Di dalam Rajah 6(a)

dan 6(b), data DBH bagi kawasan H.S hutan dara dan restorasi hutan semula jadi mempunyai nilai-p kurang daripada 0.01, iaitu kurang daripada aras signifikan. Oleh itu, hipotesis nul ditolak dan dapat disimpulkan bahawa data DBH di kedua-dua kawasan ini tidak mengikut taburan



RAJAH 6. Ujian Normaliti DBH a) H.S hutan dara b) Restorasi hutan semula jadi c) Restorasi hutan secara aktif

normal dan condong ke kanan. Berdasarkan data di restorasi hutan secara aktif (Rajah 6(c)), nilai p adalah lebih besar daripada 0.01, menunjukkan bahawa terdapat bukti yang tidak mencukupi untuk membuat kesimpulan bahawa data condong dengan ketara daripada taburan normal. Maka data DBH di kawasan ini mengikut taburan normal.

ANALISIS KORELATIF PARAMETER FUNGSI SKALA
KANOPI ANTARA PENGUKURAN LAPANGAN DENGAN
DATA LIDAR

Jadual 4 dan Rajah 7, 8 dan 9 menunjukkan keputusan analisis regresi linear dan analisis varian bagi setiap parameter fungsi skala kanopi (LAI, pecahan jurang, dan kepadatan kanopi) untuk tiga jenis restorasi hutan yang berbeza

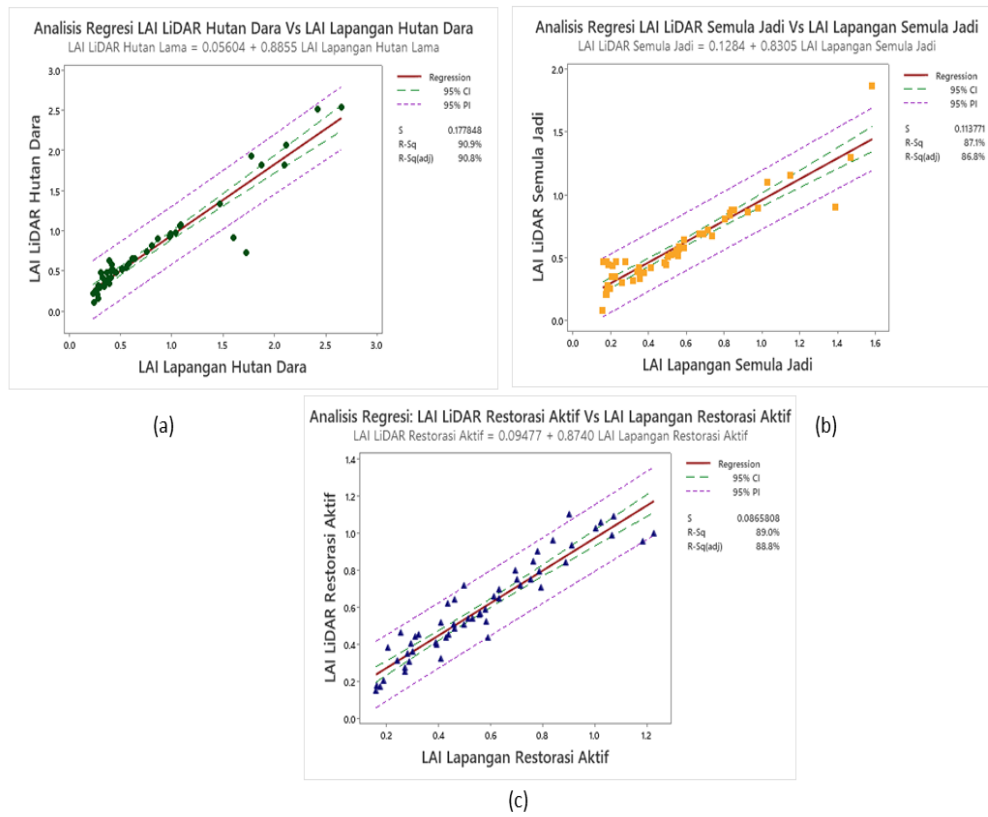
Bagi LAI, nilai R^2 yang dijana dari data dan regresi menerangkan nisbah varian yang tinggi bagi LAI untuk ketiga-tiga restorasi hutan, dengan nilai antara 0.87 hingga 0.91. Nilai R^2 terlaras, yang merangkumi bilangan diramalkan dari LiDAR dalam model, adalah lebih rendah sedikit tetapi masih tinggi, antara 0.87 hingga 0.91. Ralat residual, yang mewakili perbezaan antara nilai LAI yang diramalkan dari LiDAR dan nilai sebenar, adalah terendah untuk restorasi hutan aktif dan tertinggi untuk H.S hutan dara.

Bagi pecahan jurang, nilai R^2 menunjukkan bahawa pecahan jurang yang diukur di lapangan menjelaskan kebanyakan variasi dalam pecahan jurang yang diramalkan oleh LiDAR untuk tiga jenis restorasi hutan, dengan nilai antara 0.86 hingga 0.90. Nilai R^2 terlaras, yang merangkumi bilangan ramalan dalam model LiDAR, adalah lebih rendah sedikit tetapi masih tinggi, antara 0.86 hingga 0.90. Ralat residual, yang mengukur perbezaan antara nilai ramalan dari LiDAR dan nilai lapangan bagi pecahan jurang, adalah terendah untuk restorasi hutan aktif dan tertinggi untuk restorasi hutan semula jadi.

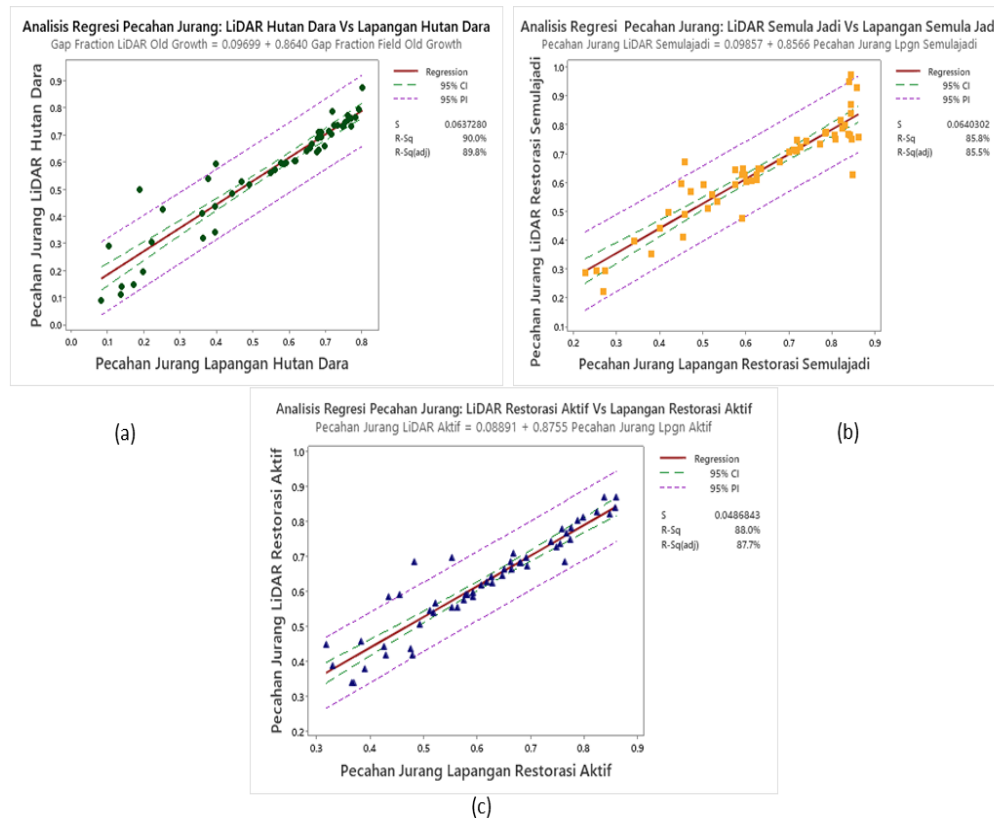
Bagi parameter kepadatan kanopi, nilai R^2 menunjukkan korelasi positif yang kuat di antara kepadatan kanopi yang diukur di lapangan dan kepadatan kanopi yang diramalkan menggunakan LiDAR di tiga kawasan restorasi hutan, dengan nilai di antara 0.73 hingga 0.78. Nilai R^2 terlaras, merangkumi bilangan ramalan daripada LiDAR di dalam model, adalah lebih rendah tetapi masih cukup kuat, antara 0.73 hingga 0.77. Ralat residual, yang mengukur perbezaan antara nilai kepadatan kanopi yang diramalkan dan nilai sebenar, adalah terendah bagi restorasi hutan aktif dan tertinggi bagi kawasan H.S hutan dara. Secara keseluruhan, nilai-F dan nilai-p menunjukkan bahawa model regresi adalah signifikan secara statistik untuk ketiga-tiga parameter fungsi skala kanopi dan ketiga-tiga jenis restorasi hutan, mempunyai hubungan yang kukuh antara data lapangan dan nilai diramal menggunakan LiDAR.

JADUAL 4. Linear Regresi (Statistik *Laerd*) dan Analisis Varian (ANOVA) bagi Parameter Fungsi Skala Kanopi

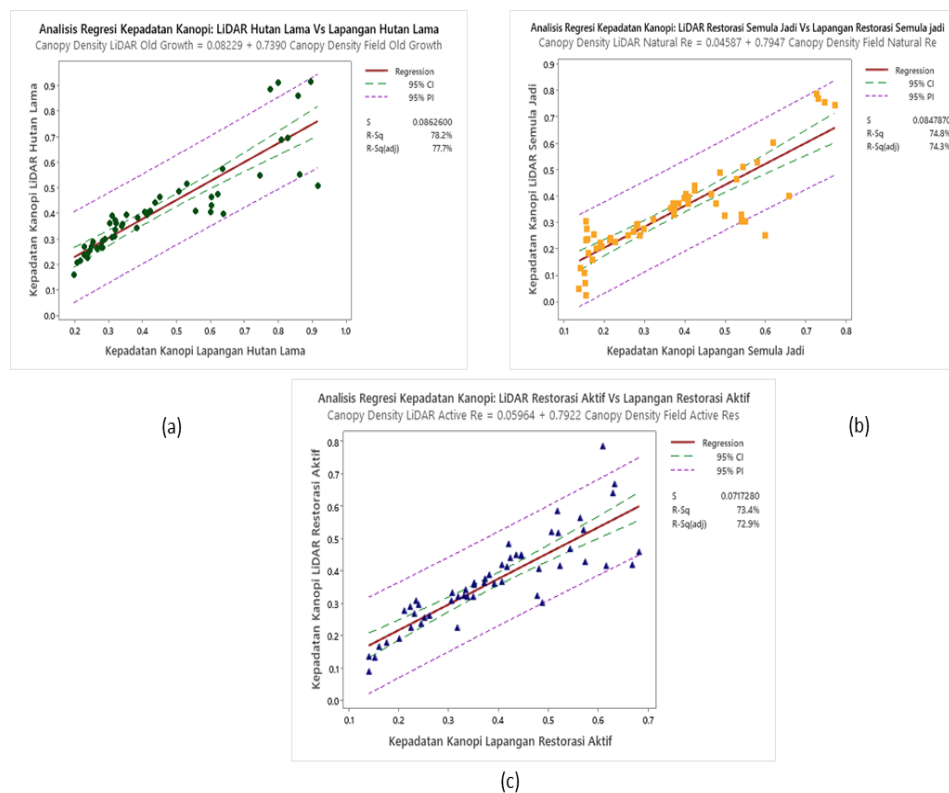
Parameter fungsi skala kanopi	Jenis restorasi hutan	R-sq.	Pelarasan R-sq.	Ralat residual	Nilai F	Nilai-P
LAI	H.S hutan dara	0.91	0.91	1.761	482.16	0.000
LAI	Semula Jadi	0.88	0.87	0.8332	342.98	0.000
LAI	Aktif	0.89	0.89	0.4631	430.05	0.000
Pecahan Jurang	H.S hutan dara	0.90	0.90	0.1949	430.91	0.000
Pecahan Jurang	Semula Jadi	0.86	0.86	0.2540	319.93	0.000
Pecahan Jurang	Aktif	0.88	0.88	0.1414	380.55	0.000
Kepadatan kanopi	H.S hutan dara	0.78	0.77	0.5114	172.06	0.000
Kepadatan kanopi	Semula Jadi	0.75	0.74	0.4510	157.03	0.000
Kepadatan kanopi	Aktif	0.73	0.73	0.3129	143.54	0.000



RAJAH 7. Analisis Regresi LAI a) H.S Hutan dara
 b) Restorasi hutan semula jadi c) Restorasi hutan secara aktif



RAJAH 8. Analisis Regresi Pecahan Jurang a) H.S Hutan Dara
 b) Restorasi hutan semula jadi c) Restorasi hutan secara aktif



RAJAH 9. Analisis Regresi Kepadatan Kanopi a) H.S Hutan dara b) Restorasi hutan semula jadi c) Restorasi hutan secara aktif

PERBINCANGAN

Kesemua hasil dapatan yang diperolehi memberikan manfaat terhadap teknologi penderiaan jauh iaitu penggunaan LiDAR di dalam aplikasi restorasi dan pemantauan hutan. Dapatan kajian ini juga menunjukkan bahawa data LiDAR dapat mengekstrak variasi data bagi ketiga-tiga parameter fungsi skala kanopi di tiga kawasan restorasi hutan. Analisis R kuasa dua (R-sq.) pada data yang dihasilkan menunjukkan keberkesanan pemboleh ubah bebas seperti parameter fungsi skala kanopi dan jenis pemulihan hutan dalam menerangkan variasi dalam pemboleh ubah bersandar. Nilai R-kuasa dua yang lebih tinggi menunjukkan bahawa model statistik mempunyai keupayaan yang lebih baik untuk menerangkan variasi data. Melalui data yang terperinci, dapat dilihat bahawa setiap gabungan pemboleh ubah menunjukkan nilai R^2 yang agak tinggi, yang menggambarkan keupayaan pemboleh ubah tidak bersandar untuk menerangkan variasi pemboleh ubah bersandar dalam setiap jenis pemulihan hutan. Dalam analisis LAI, didapati model tersebut mempunyai R^2 0.91 bagi H.S hutan dara, 0.88 untuk restorasi hutan semula jadi dan 0.89 untuk restorasi hutan secara aktif. Begitu juga, dalam analisis pecahan jurang dan kepadatan kanopi, nilai R^2 yang signifikan menunjukkan pengaruh kuat pemboleh ubah bebas terhadap pemboleh ubah bersandar dalam setiap

jenis restorasi hutan. Hasil penemuan ini konsisten dengan hasil penemuan daripada kajian yang telah dilakukan oleh (Sumnall et al. 2016; Indirabai et al. 2020) untuk analisis korelatif untuk LAI. Nilai R^2 yang tinggi dalam kajian ini memberikan bukti kukuh bahawa data LiDAR boleh digunakan untuk mengekstrak parameter fungsi skala kanopi pada tahap ketepatan yang tinggi.

Keupayaan untuk menggunakan data LiDAR untuk mengekstrak parameter fungsi skala kanopi menghasilkan kaedah yang efektif dan cekap di kawasan yang berskala besar. Tambahan pula, ianya konsisten antara dapatan kajian ini dengan kajian sebelumnya oleh (Zhao et al. 2011; Luo et al. 2014; She-Zhou et al. 2013; Heiskanen et al. 2015) yang menunjukkan bahawa hubungan antara data LiDAR dan parameter fungsi skala kanopi adalah signifikan. Nilai R^2 terlaras, yang dijana dari model data LiDAR menurun sedikit tetapi kekal tinggi maka ini menunjukkan bahawa data LiDAR boleh digunakan untuk mengekstrak parameter fungsi skala kanopi. Ralat residual yang rendah bagi kawasan restorasi hutan secara aktif menunjukkan bahawa data LiDAR adalah sangat tepat dalam mengekstrak nilai parameter fungsi skala kanopi. Walaupun nilai ralat residual adalah tinggi bagi kawasan H.S hutan dara tetapi data LiDAR masih di dalam julat yang diterima bagi mendapatkan parameter fungsi skala kanopi iaitu LAI, pecahan jurang dan kepadatan kanopi. Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahawa

LiDAR dapat menghasilkan data output yang tepat dan boleh dipercayai untuk memantau struktur dan fungsi hutan. Maklumat-maklumat ini juga dapat digunakan untuk menyokong usaha pengurusan dan konservasi hutan, serta menyediakan data yang penting serta berguna untuk penyelidikan saintifik bagi ekologi dan ekosistem hutan. Hasil kajian menunjukkan ketiga-tiga jenis kawasan restorasi hutan mempunyai parameter yang berbeza dari segi struktur dan metrik hutan. Kajian ini mendapati bahawa restorasi hutan secara aktif menghasilkan kepadatan pokok dan jumlah hutan yang lebih rendah daripada restorasi hutan semula jadi dan H.S hutan dara. Penggunaan LiDAR juga berpotensi untuk pengukuran berskala besar.

Kaedah konvensional untuk mengukur LAI, pecahan jurang, dan kepadatan kanopi memerlukan peralatan yang pelbagai, algoritma kompleks, masa yang lama dan kos tinggi. Namun, dengan menggunakan LiDAR, data dapat diekstrak dengan lebih cepat dan berpotensi menghasilkan LAI daripada ujian normaliti DBH sebagai pemboleh ubah piawai, seperti ketinggian pokok dan DBH dan signifikan dengan kajian yang telah dilakukan (Pearse 2017; Kahyani et al. 2016). Kaedah ini lebih praktikal dalam pada masa yang sama dapat mengurangkan keperluan peralatan konvensional, berketepatan tinggi dan masa yang cepat dalam pengukuran parameter persekitaran pokok dan kanopi. Teknologi penggunaan LiDAR amat berguna untuk mengekstrak parameter struktur dalam sesebuah plot dengan spesies pokok dan jenis pemulihan hutan yang berbeza.

Milodowski et al. (2021) menjalankan kajian serupa untuk menilai struktur kanopi di hutan tropika Sabah menggunakan LiDAR pesawat udara, tetapi kajian mereka memberi tumpuan kepada impak pembalakan terhadap struktur kanopi, sementara kajian ini meneroka parameter ekologi di pelbagai jenis hutan, dengan menggunakan data LiDAR untuk penilaian di skala landskap. Kedua-dua kajian menekankan kepentingan data yang tepat dalam memahami kesan degradasi hutan dan membimbing strategi pengurusan dan pemuliharaan hutan yang berkesan.

Gabungan inventori berasaskan lapangan dan teknologi LiDAR menyumbang kepada pemahaman yang lebih komprehensif mengenai proses ekologi yang rumit di hutan tropika. (Asner et al. 2018; Nunes et al. 2019) menekankan penilaian parameter ekologi, termasuk pecahan jurang, kanopi hutan, dan kawasan luas pangkal (basal), sebagai komponen penting dalam memahami struktur dan dinamik hutan. Kajian ini memberi sumbangan yang penting kepada pemahaman ini.

KESIMPULAN

Secara umumnya, proses restorasi atau pemulihan hutan adalah penting untuk mengembalikan keseimbangan semula jadi terhadap kesihatan pokok mahupun kerosakan pokok dalam sesebuah ekosistem hutan. Tujuan restorasi hutan ini adalah untuk mengekalkan fungsi dan faedah hutan kepada persekitaran, masyarakat dan kehidupan manusia. Di Lembah Danum, Sabah, pelbagai pendekatan digunakan untuk tujuan ini seperti proses pemulihan semula hutan, kawalan serangga dan penyakit, dan pemulihan tanah untuk proses restorasi hutan. Kajian ini membuktikan bahawa teknologi LiDAR dapat memberikan hasil yang tepat dan signifikan di atas pencapaian usaha, seterusnya dapat membantu dalam usaha restorasi hutan. Pengukuran parameter fungsi skala kanopi iaitu LAI, pecahan jurang, dan kepadatan kanopi adalah penting untuk memahami struktur hutan, menganggar jumlah karbon yang terbebas dan juga lain-lain maklumat ekologi hutan. Dapatan kajian ini seterusnya diyakini berguna untuk pengurusan hutan yang lebih efisien dan membantu dalam inisiatif program konservasi kawasan hutan hujan tropika di mana proses pembentukan hutan sangat penting untuk keseimbangan biodiversiti dan penyimpanan karbon.

PENGHARGAAN

Kami ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih kepada Kementerian Pengajian Tinggi (KPT) Malaysia atas sokongan kewangan melalui skim geran penyelidikan *Fundamental Research Grant Scheme* (FRGS/1/2020/WAB03/UKM/02/1) dan Dana Penyelidikan ZF-2022-007. Jutaan terima kasih diucapkan kepada semua warga Institut Perubahan Iklim, IPI, UKM serta pakar dalam bidang ini atas kerjasama, komen dan pandangan yang berharga dalam menjayakan penyelidikan ini.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Aguirre-Gutiérrez, J., Rifai, S., Shenkin, A., Oliveras, I., Bentley, L. P., Svátek, M., Girardin, C. A. J., et al. 2021. Pantropical modelling of canopy functional traits using Sentinel-2 remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 252.

- Ahmad, N., Ullah, S., Zhao, N., Mumtaz, F., Ali, A., Ali, A., Tariq, A., et al. 2023. Comparative Analysis of Remote Sensing and Geo-Statistical Techniques to Quantify Forest Biomass. *Forests* 14(2).
- Almeida, D. R. A., Broadbent, E. N., Zambrano, A. M. A., Wilkinson, B. E., Ferreira, M. E., Chazdon, R., Meli, P., et al. 2019a. Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 79: 192–198.
- Almeida, D. R. A., Stark, S. C., Chazdon, R., Nelson, B. W., Cesar, R. G., Meli, P., Gorgens, E. B., et al. 2019. The effectiveness of lidar remote sensing for monitoring forest cover attributes and landscape restoration. *Forest Ecology and Management* 438(September 2018): 34–43.
- Amri Mohd, F., Nizam Abdul Maulud, K., Karim Jabatan Kejuruteraan Awam dan Struktur, O. A., Kejuruteraan dan Alam Bina, F., Afiq Ibrahim, M., Anak Benson, Y., Kejuruteraan Pantai dan Lautan, P., et al. 2018. Integrasi Kaedah Geospasial dan Pemodelan Hidrodinamik untuk Mengkaji Impak Kenaikan Aras Laut Terhadap Kawasan Pantai (Integration of Geospasial Method and Hydrodynamic Modelling to Study the Impact of Sea Level Rise on the Coastal Area). *Jurnal Kejuruteraan* 30(1): 65–75.
- Asner, G. P., Brodrick, P. G., Philipson, C., Vaughn, N. R., Martin, R. E., Knapp, D. E., Heckler, J., et al. 2018. Mapped aboveground carbon stocks to advance forest conservation and recovery in Malaysian Borneo. *Biological Conservation* 217: 289–310.
- Bivand, R. S., Pebesma, E. & Gómez-Rubio, V. 2013. *Applied Spatial Data Analysis with R*.
- Brancalion, P. H. S., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F. S. M., Zambrano, A. M. A., Baccini, A., et al. 2019. Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Sci. Adv* 5: 3223–3226.
- Brown, S., Narine, L. L. & Gilbert, J. 2022. Using Airborne Lidar, Multispectral Imagery, and Field Inventory Data to Estimate Basal Area, Volume, and Aboveground Biomass in Heterogeneous Mixed Species Forests: A Case Study in Southern Alabama. *Remote Sensing* 14(11).
- Camarretta, N., Harrison, P. A., Bailey, T., Potts, B., Lucieer, A., Davidson, N. & Hunt, M. 2020. Monitoring forest structure to guide adaptive management of forest restoration: a review of remote sensing approaches. *New Forests* 51(4): 573–596.
- Chazdon, R. L. & Laestadius, L. 2016. Forest and landscape restoration: Toward a shared vision and vocabulary. *American Journal of Botany* 103(11): 1869–1871.
- de Jong, W., Liu, J. & Long, H. 2021. The forest restoration frontier. *Ambio* 50(12): 2224–2237.
- Duran, Z., Ozcan, K. & Atik, M. E. 2021. Classification of photogrammetric and airborne lidar point clouds using machine learning algorithms. *Drones* 5(4).
- Fuentes, S., Palmer, A. R., Taylor, D., Zeppel, M., Whitley, R. & Eamus, D. 2008. An automated procedure for estimating the leaf area index (LAI) of woodland ecosystems using digital imagery, MATLAB programming and its application to an examination of the relationship between remotely sensed and field measurements of LAI. *Functional Plant Biology* 35(10): 1070–1079.
- Ghosh, A. & Hijmans, R. J. 2021. *Remote Sensing Image Analysis with R*.
- Habermann, E., San Martin, J. A. B., Contin, D. R., Bossan, V. P., Barboza, A., Braga, M. R., Groppo, M., et al. 2019. Increasing atmospheric CO₂ and canopy temperature induces anatomical and physiological changes in leaves of the C4 forage species *Panicum maximum*. *PLoS ONE* 14(2).
- Hayward, R. M., Banin, L. F., Burslem, D. F. R. P., Chapman, D. S., Philipson, C. D., Cutler, M. E. J., Reynolds, G., et al. 2021. Three decades of post-logging tree community recovery in naturally regenerating and actively restored dipterocarp forest in Borneo. *Forest Ecology and Management* 488.
- Heiskanen, J., Korhonen, L., Hietanen, J. & Pellikka, P. K. E. 2015. Use of airborne lidar for estimating canopy gap fraction and leaf area index of tropical montane forests. *International Journal of Remote Sensing* 36(10): 2569–2583.
- Indirabai, I., Nair, M. V. H., Nair, J. R. & Nidamanuri, R. R. 2020. Direct estimation of leaf area index of tropical forests using LiDAR point cloud. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 18.
- IUCN. 2021. *Taking the Bonn Challenge to Rio*.
- Jaafar, W. S. W. M., Said, N. F. S., Maulud, K. N. A., Uning, R., Latif, M. T., Kamarulzaman, A. M. M., Mohan, M., et al. 2020. Carbon emissions from oil palm induced forest and peatland conversion in Sabah and Sarawak, Malaysia. *Forests* 11(12): 1–22.
- Jaafar, W. S. W. M., Woodhouse, I. H., Silva, C. A., Omar, H., Maulud, K. N. A., Hudak, A. T., Klauber, C., et al. 2018. Improving individual tree crown delineation and attributes estimation of tropical forests using airborne LiDAR data. *Forests* 9(12).
- Jensen, J. R. 2009. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*, hlm. 2nd Editio. New Delhi: Pearson Education India.
- John, N. K., Gabriel, M. M., Francis, N. G., Samuel, M. K., Margaret, N. K. & Eliud, M. W. 2015. Vegetation composition and dynamics along degradation gradient of Kiangombe hill forest in the drylands of Kenya. *Journal of Horticulture and Forestry* 7(7): 168–178.

- Kahyani, S., Sohrabi, H., Hosseini, S. M. & Vanclay, J. 2016. LAI and Leaf Biomass Allometric Equations for Three Common Tree Species in a Hyrcanian Temperate Forest. *Open Journal of Forestry* 06(02): 1–7.
- Kamarulzaman, A. M. M., Jaafar, W. S. W. M., Maulud, K. N. A., Saad, S. N. M., Omar, H. & Mohan, M. 2022. Integrated Segmentation Approach with Machine Learning Classifier in Detecting and Mapping Post Selective Logging Impacts Using UAV Imagery. *Forests* 13(1).
- Keller, N., Niklaus, P. A., Ghazoul, J., Marfil, T., Godoong, E. & Philipson, C. D. 2023. Biodiversity consequences of long-term active forest restoration in selectively logged tropical rainforests. *Forest Ecology and Management* 549.
- Kementerian Tenaga dan Sumber Asli. 2021. Dasar Perhutanan Malaysia. *Kementerian Tenaga dan Sumber Asli* 136.
- Lamb, D., Stanturf, J. & Madsen, P. 2012. What Is Forest Landscape Restoration? 3–23.
- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G. & Harding David J. 2002. Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* 52(1).
- Li, C., Zheng, Y., Zhang, X., Wu, F., Li, L. & Jiang, J. 2022a. Comparison of Canopy Cover and Leaf Area Index Estimation from Airborne LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry in Tropical Forests. *Applied Sciences (Switzerland)* 12(19).
- Li, C., Zheng, Y., Zhang, X., Wu, F., Li, L. & Jiang, J. 2022b. Comparison of Canopy Cover and Leaf Area Index Estimation from Airborne LiDAR and Digital Aerial Photogrammetry in Tropical Forests. *Applied Sciences (Switzerland)* 12(19).
- Luo, S., Wang, C., Xi, X. & Pan, F. 2014. Estimating FPAR of maize canopy using airborne discrete-return LiDAR data. *Optics Express* 22(5): 5106.
- Martijn. 2007. *INFAPRO Rehabilitation of logged-over dipterocarp forest in Sabah, Malaysia*.
- Mazlan, S. M., Wan Mohd Jaafar, W. S., Omar, H., Teh, Y. A. & Cutler, M. E. J. 2023. Assessing Forest Carbon Accumulation Potential Across Different Treatments using Field Inventory Data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, hlm. Vol. 1167. Institute of Physics.
- Menzies, J., Jensen, R., Brondizio, E., Moran, E. & Mausel, P. 2007. Accuracy of neural network and regression leaf area estimators for the Amazon Basin. *GIScience and Remote Sensing* 44(1): 82–92.
- Milodowski, D. T., Coomes, D. A., Swinfield, T., Jucker, T., Riutta, T., Malhi, Y., Svátek, M., et al. 2021. The impact of logging on vertical canopy structure across a gradient of tropical forest degradation intensity in Borneo. *Journal of Applied Ecology* 58(8): 1764–1775.
- Mohan, M., Leite, R. V., Broadbent, E. N., Wan Mohd Jaafar, W. S., Srinivasan, S., Bajaj, S., Dalla Corte, A. P., et al. 2021. Individual tree detection using UAV-lidar and UAV-SfM data: A tutorial for beginners. *Open Geosciences* 13(1): 1028–1039.
- Mohd Ghazali, N., Mohd Said, M. N., Wan Mohd Jaafar, W. S., Muhmad Kamarulzaman, A. M. & Saad, S. N. M. 2022, October 1. Research Opportunity on Fractional Cover of Forest: A Bibliometric Review. *Forests*. MDPI.
- Mohd Jaafar, W. S. W., Maulud, K. N. A., Muhmad Kamarulzaman, A. M., Raihan, A., Sah, S. M., Ahmad, A., Maizah Saad, S. N., et al. 2020. The influence of deforestation on land surface temperature-A case study of Perak and Kedah, Malaysia. *Forests* 11(6).
- Muhmad Kamarulzaman, A. M., Wan Mohd Jaafar, W. S., Saad, S. N. M., Omar, H. & Mahmud, Mohd. R. 2021. An object-based approach to detect tree stumps in a selective logging area using Unmanned Aerial Vehicle imagery. *Malaysian Journal of Society and Space* 17(4).
- Nunes, M. H., Both, S., Bongalov, B., Brelford, C., Khoury, S., Burslem, D. F. R. P., Philipson, C., et al. 2019. Changes in leaf functional traits of rainforest canopy trees associated with an El Nino event in Borneo. *Environmental Research Letters* 14(8).
- Pearse, G. D. 2017. *Estimating Leaf Area Index from Airborne Laser Scanning in Pinus Radiata Forests*. School of Forestry, University of Canterbury, Canterbury.
- Philipson, C. D., Cutler, M. E. J., Brodrick, P. G., Asner, G. P., Boyd, D. S., Costa, P. M., Fiddes, J., et al. 2020. Active restoration accelerates the carbon recovery of human-modified tropical forests. *Science* 369(6505): 838–841.
- Phua, M. H., Hue, S. W., Ioki, K., Hashim, M., Bidin, K., Musta, B., Suleiman, M., et al. 2016. Estimating logged-over lowland rainforest aboveground biomass in sabah, Malaysia using airborne LiDAR data. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 27(4): 481–489.
- Reynolds, G., Payne, J., Sinun, W., Mosigil, G. & Walsh, R. P. D. 2011. Changes in forest land use and management in Sabah, Malaysian Borneo, 1990–2010, with a focus on the Danum Valley region. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366(1582): 3168–3176.
- Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R. H., Meador, A. S., Bourdon, J. F., et al. 2020, December 15. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*. Elsevier Inc.

- Saad, S. N. M., Maulud, K. N. A., Jaafar, W. S. W. M., Kamarulzaman, A. M. M. & Omar, H. 2020. Tree Stump Height Estimation Using Canopy Height Model at Tropical Forest in Ulu Jelai Forest Reserve, Pahang, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 540(1).
- Saad, S. N. M., Wan Mohd Jaafar, W. S., Omar, H., Abdul Maulud, K. N., Muhmad Kamarulzaman, A. M., Adrah, E., Mohd Ghazali, N., et al. 2023. Modeling Carbon Emissions of Post-Selective Logging in the Production Forests of Ulu Jelai, Pahang, Malaysia. *Remote Sensing* 15(4).
- Sharil, S., Karim, O. A., Mastura, S. & Abdullah, S. 2005. *Teknik Penderiaan Jauh dalam Kajian Sedimen Terampai di Muara Sungai Langat. Jurnal Kejuruteraan*, hlm. Vol. 17.
- She-Zhou, L., Cheng, W., Gui-Bin, Z., Xiao-Huan, X. & Gui-Cai, L. 2013. *Forest leaf area index (lai) estimation using airborne discrete return LiDAR data. Chinese journal of geophysics*, hlm. Vol. 56.
- Stark, S. C., Leitold, V., Wu, J. L., Hunter, M. O., de Castilho, C. V., Costa, F. R. C., McMahon, S. M., et al. 2012. Amazon forest carbon dynamics predicted by profiles of canopy leaf area and light environment. *Ecology Letters* 15(12): 1406–1414.
- Sumnall, M., Peduzzi, A., Fox, T. R., Wynne, R. H., Thomas, V. A. & Cook, B. 2016. Assessing the transferability of statistical predictive models for leaf area index between two airborne discrete return LiDAR sensor designs within multiple intensely managed Loblolly pine forest locations in the southeastern USA. *Remote Sensing of Environment* 176: 308–319.
- Tanioka, Y., Cai, Y., Ida, H. & Hirota, M. 2020. A spatial relationship between canopy and understory leaf area index in an old-growth cool-temperate deciduous forest. *Forests* 11(10).
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G. J., Jonckheere, I. & Coppin, P. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors, and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(1–2): 37–53.
- Wu, J., Chen, B., Reynolds, G., Xie, J., Liang, S., O'Brien, M. J. & Hector, A. 2020a. Monitoring tropical forest degradation and restoration with satellite remote sensing: A test using Sabah Biodiversity Experiment. *Advances in Ecological Research*, hlm. Vol. 62, 117–146. Academic Press Inc.
- Wu, J., Chen, B., Reynolds, G., Xie, J., Liang, S., O'Brien, M. J. & Hector, A. 2020b. Monitoring tropical forest degradation and restoration with satellite remote sensing: A test using Sabah Biodiversity Experiment. *Advances in Ecological Research*, hlm. Vol. 62, 117–146. Academic Press Inc.
- Zhao, K., Popescu, S., Meng, X., Pang, Y. & Agca, M. 2011. Characterizing forest canopy structure with lidar composite metrics and machine learning. *Remote Sensing of Environment* 115(8): 1978–1996.