BTM BULETIN TEKNOLOGI MARDI
Bil. 44 (2025)
65 – 74

Kaedah pemprosesan imej udara untuk menganggar kandungan klorofil pokok padi

(*An aerial image processing approach for estimating chlorophyll content in paddy plants*)

Teoh Chin Chuang dan Mohd Khairil Izani Ishak

Kata kunci: kenderaan udara tanpa pemandu (UAV), pemprosesan imej, kandungan klorofil, klorofil meter SPAD, peta bacaan SPAD

Pengenalan

Padi merupakan makanan ruji yang penting dalam kehidupan rakyat Malaysia. Oleh itu, pengeluaran serta penetapan harga beras memainkan peranan besar dalam memastikan kestabilan ekonomi negara dan keterjaminan makanan. Sebarang perubahan dalam pengeluaran atau kos boleh memberi impak yang ketara terhadap kesejahteraan rakyat dan kelangsungan bekalan makanan negara. Jumlah keluasan penanaman padi di Malaysia pada tahun 2023 ialah 614,082 hektar dengan jumlah pengeluaran sebanyak 2.175 juta tan metrik. Kebelakangan ini, kos pengeluaran dalam industri pertanian khususnya penanaman padi telah meningkat dengan ketara, terutamanya harga baja.

Pengeluaran hasil tanaman bergantung terus kepada jumlah dan kualiti nutrien yang diserap oleh tanaman, di mana baja memainkan peranan penting dalam membekalkan nutrien utama seperti nitrogen, fosforus, kalium dan unsur mikro. Penggunaan baja yang tepat dan seimbang dapat meningkatkan pertumbuhan, pengeluaran hasil serta ketahanan tanaman terhadap serangan penyakit. Kekurangan unsur baja boleh menjejaskan pertumbuhan tanaman, manakala penggunaan baja berlebihan pula boleh menyebabkan pengasidan tanah serta pencemaran sumber air. Oleh itu, pengoptimuman penggunaan baja adalah penting bagi meminimumkan kos pengeluaran, memaksimumkan hasil dan mengurangkan impak negatif terhadap alam sekitar. Pada masa kini, kebanyakan petani menggunakan baja pada kadar yang sama di seluruh kawasan penanaman. Amalan ini boleh menyebabkan pembaziran sumber dan menghalang pengeluaran hasil yang maksimum kerana kepelbagaian ruang (*spatial variability*) tidak diambil kira dalam pengurusan baja. Aplikasi baja secara pukal (*blanket*) untuk kawasan yang luas adalah tidak efisien kerana nutrien semula jadi tanah berbeza di setiap bahagian dalam ladang.

Pertanian tepat (PT) merupakan pendekatan yang berfokus untuk mengoptimumkan penggunaan input seperti baja dengan memanfaatkan maklumat terperinci berkaitan ciri tanah dan tanaman di setiap bahagian ladang. PT adalah teknologi berasaskan maklumat yang diterapkan dalam sistem pengurusan pertanian untuk mengurus kebolehubahan di ladang. Ia menggabungkan amalan pertanian yang sesuai dengan tujuan memaksimumkan keuntungan, meningkatkan produktiviti dan mencapai pengeluaran pertanian yang mampan.

Nitrogen (N) merupakan salah satu nutrien makro yang paling penting dan diperlukan dalam kuantiti yang tinggi oleh tanaman yang juga dikenali sebagai unsur yang paling mudah bergerak dan bersifat dinamik dalam sistem tanah. Kajian telah menunjukkan bahawa sifat fizikal dan kimia tanah yang berubah mengikut ruang boleh mempengaruhi dinamik N serta mekanisme kehilangannya. Pemberian N secara amnya mampu meningkatkan hasil tanaman dengan ketara, namun keperluan sebenar N berbeza-beza mengikut lokasi dan variasi landskap di peringkat ladang. Pengurusan kadar N berubah-ubah (*variable-rate N management*) merupakan salah satu aktiviti terpenting dalam PT untuk memastikan jumlah baja yang tepat digunakan bagi memaksimumkan hasil tanaman. Warna daun dapat menggambarkan status kandungan klorofil dalam tumbuhan dan berfungsi sebagai indikator visual untuk menilai sama ada bekalan N mencukupi berdasarkan amalan pengurusan baja. Maklumat ini sangat berguna untuk aplikasi kadar N berubah-ubah di sepanjang musim penanaman. Oleh itu, pelbagai strategi pengurusan kadar N berubah-ubah berdasarkan sifat warna daun telah dibangunkan untuk mengoptimumkan penggunaan baja N dalam penanaman padi secara lebih cekap, kos efektif dan mampan.

Klorofil meter SPAD (*Soil Plant Analysis Development*) boleh digunakan untuk mengukur kandungan klorofil daun secara mudah alih dan sering digunakan sebagai penunjuk kesuburan tumbuhan. Meter ini boleh digunakan untuk memantau status N tumbuhan bagi aplikasi baja N secara optimum dalam penanaman padi. Walaupun klorofil meter SPAD telah menjadi alat diagnostik yang mudah, pantas dan mudah alih untuk memantau status N tumbuhan, tetapi proses pengambilan data ini menjadi semakin mencabar apabila melibatkan kawasan tanaman padi yang luas. Ini kerana pengukuran secara manual di pelbagai kedudukan dalam sawah padi memerlukan tenaga kerja yang banyak, memakan masa yang lama dan melibatkan kos yang tinggi. Oleh itu, terdapat keperluan untuk membangunkan pendekatan alternatif yang lebih efisien dan kos efektif bagi pemantauan status N tumbuhan dalam penanaman padi. Objektif utama kajian ini adalah untuk membangunkan satu pendekatan pemprosesan imej udara bagi menganggar kandungan klorofil pokok padi. Pendekatan ini bertujuan untuk menyokong usaha pemetaan status kesihatan tanaman secara lebih efisien dan berskala luas, sekali gus membolehkan penghasilan peta rawatan baja nitrogen yang lebih tepat dan berasaskan keperluan sebenar tanaman. Kaedah ini dijangka dapat membantu meningkatkan keberkesanan pengurusan input ladang, mengurangkan pembaziran baja dan menyumbang kepada amalan pertanian lestari. Aliran kerja kajian ini merangkumi beberapa peringkat utama iaitu pengumpulan data di lapangan, perolehan imej, pemprosesan imej udara, analisis statistik serta penjanaan peta bacaan SPAD.

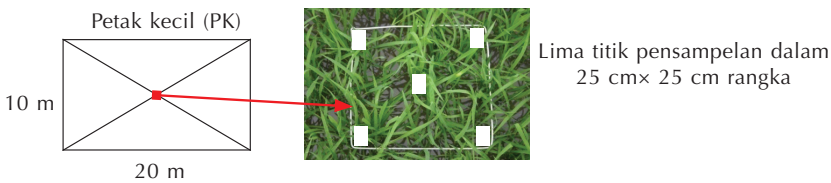
Pengumpulan data di lapangan

Satu plot kajian dengan enam rawatan baja N yang berbeza telah disediakan di kawasan sawah padi FELCRA Seberang Perak untuk mengumpul data mengenai kesan pelbagai tahap aplikasi baja N

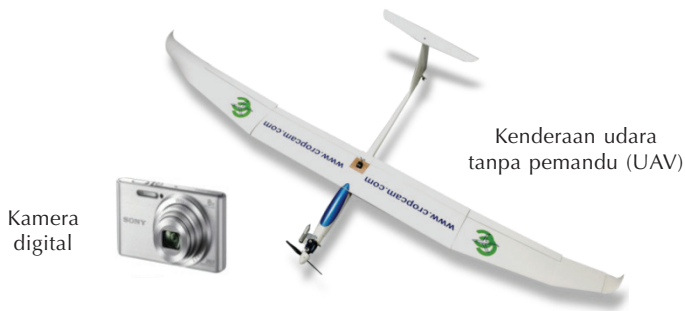
terhadap kandungan klorofil dan pertumbuhan pokok padi. Varieti padi yang digunakan ialah MR 219 yang ditanam di empat petak sawah (PS) dengan rawatan baja N yang berbeza. Setiap PS dibahagikan kepada enam petak kecil (PK) yang bersaiz sama berukuran 20 m × 10 m. Setiap PK menerima rawatan baja N berlainan seperti berikut: PK 1 = 0 kg, PK 2 = 1 kg, PK 3 = 2 kg, PK 4 = 3 kg, PK 5 = 3.5 kg dan PK 6 = 4 kg. Bacaan klorofil daun diambil menggunakan klorofil meter SPAD pada hari ke-51 peringkat pertumbuhan tanaman. Bacaan SPAD diambil pada lima titik pensampelan iaitu di empat sudut dan titik pusat pada rangka bersaiz 25 cm^2 yang diletakkan di setiap PK seperti dalam *Gambar rajah 1*.

Pengambilan imej udara

Sebanyak 100 keping merah (R), hijau (G) dan biru (B) imej udara bagi kawasan kajian telah diperoleh menggunakan CropCam (*Gambar 1*) dengan ketinggian penerbangan sebanyak 280 m. Imej-imej ini dirakam menggunakan kamera digital RGB yang diselaraskan menggunakan sistem kedudukan sejagat (GPS) yang membolehkan pengumpulan data yang tepat berdasarkan lokasi. CropCam adalah sebuah kenderaan udara tanpa pemandu (UAV) yang berfungsi secara autonomi dengan pelan penerbangan yang telah diprogramkan. CropCam membolehkan imej beresolusi tinggi dapat diambil, yang boleh digunakan untuk analisis vegetasi, pemantauan status kesihatan tanaman serta kajian pertumbuhan tanaman dalam kawasan yang luas. UAV berupaya untuk terbang pada ketinggian tertentu dengan kelajuan yang stabil bagi membolehkan pemantauan kawasan pertanian dapat dilakukan dengan lebih efisien dan kos efektif.



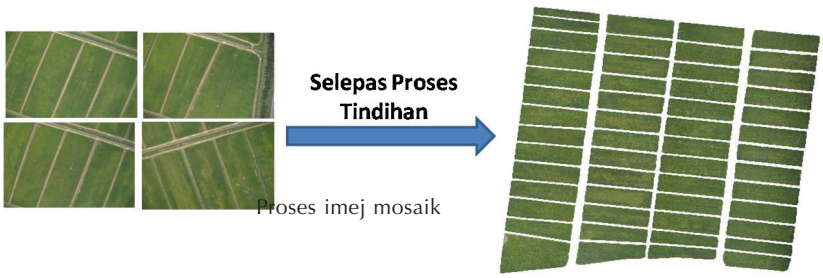
Gambar rajah 1. Pengambilan bacaan SPAD pada lima titik pensampelan dalam 25 cm × 25 cm rangka di pusat petak kecil 10 m × 20 m



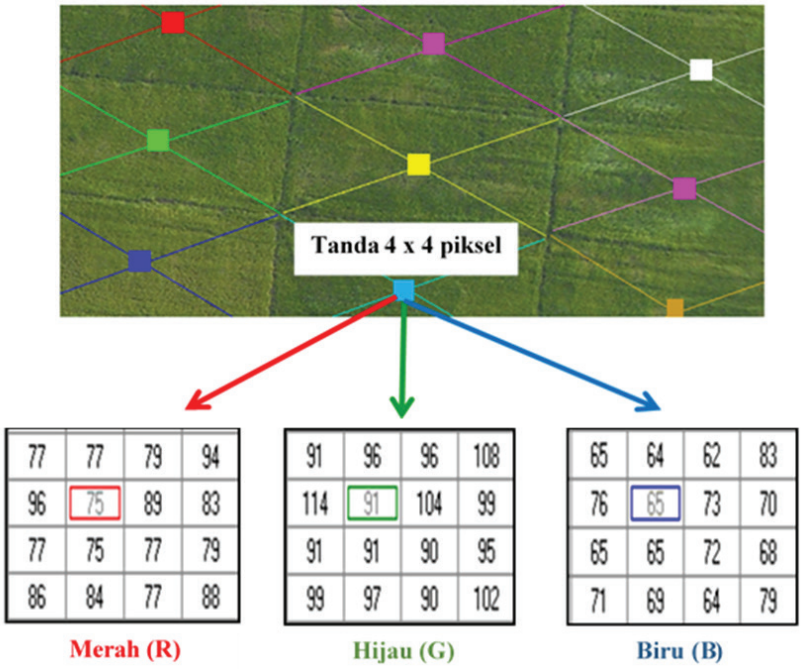
Gambar 1. Kenderaan udara tanpa pemandu (UAV) CropCam

Pemprosesan imej udara

Proses menyusun kesemua imej kecil menjadi satu imej besar yang dikenali juga sebagai imej mosaik dilaksanakan bagi menggambarkan keseluruhan kawasan kajian. Dalam kajian ini, imej yang dirakam bersama maklumat latitud, longitud dan altitud disusun menggunakan perisian pemprosesan imej *PCI Geomatics*. Proses ini menghasilkan imej mosaik dengan resolusi 6.25 cm/piksel seperti dalam *Gambar 2*. Lokasi pengambilan bacaan SPAD di setiap titik pusat PK telah dikenal pasti pada imej mosaik. Tanda berukuran 4 × 4 piksel yang bersamaan dengan saiz rangka 25 cm² ditanda pada titik pusat setiap PK pada imej mosaik bagi tujuan mengambil nilai digital R, G dan B (*Gambar rajah 2*).



Gambar 2. Proses imej mosaik bagi menyusun semua RGB imej untuk menghasil imej mosaik kawasan kajian



Gambar rajah 2. Pengambilan nilai digital RGB bagi tanda 4 × 4 piksel pada titik pusat setiap petak kecil (PK)

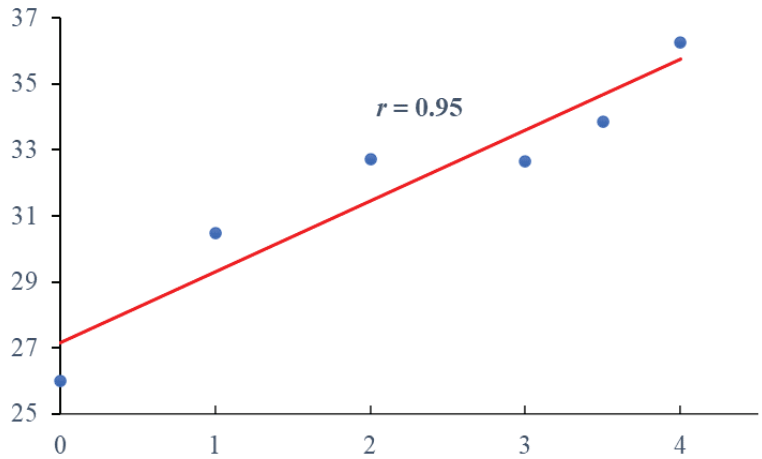
Model ramalan bacaan SPAD terhadap rawatan baja (N)

Jadual 1 menunjukan purata bacaan SPAD dan purata nilai digital R, G, B serta nilai nisbah R/(R + G + B), G/(R + G + B) dan B/(R + G + B) bagi setiap PK mengikut rawatan baja N. *Rajah 1* menunjukkan hubungan yang amat rapat dan positif terhadap nilai pekali korelasi (r = +0.95) antara bacaan SPAD dan kadar baja N. Kandungan klorofil dalam daun yang diukur menggunakan meter SPAD adalah berkadar terus dengan jumlah N yang diaplikasikan di lapangan untuk pertumbuhan pokok padi. Bacaan SPAD meningkat apabila jumlah aplikasi N meningkat disebabkan oleh jumlah nutrien yang mencukupi yang diserap oleh pokok padi untuk menghasilkan warna hijau yang sihat. Bacaan SPAD bergantung kepada jumlah kandungan klorofil (iaitu pigmen hijau) yang terdapat dalam daun pokok padi. Hubungan antara bacaan SPAD dengan nilai digital R, G, B serta nisbah nilai digital R/(R + G + B), G/(R + G + B) dan B/(R + G + B) dianalisis bagi membangun model regresi ramalan bacaan SPAD. Persamaan yang menghasilkan nilai r tertinggi dianggap sebagai model terbaik untuk meramalkan bacaan SPAD. *Rajah 2*(*a*) menunjukkan hubungan antara bacaan SPAD dan nilai digital R, G dan B, manakala *Rajah 2*(*b*) mempersembahkan hubungan antara bacaan SPAD dan nisbah nilai digital R/(R + G + B), G/(R + G + B) dan B/(R + G + B). Pemboleh ubah yang paling tinggi hubungan dengan bacaan SPAD ialah R/(R + G + B) (r = –0.99) diikuti oleh R (r = –0.97), G (r = –0.82), G/(R + G + B) (r = +0.74), B/(R + G + B) (r = +0.67) dan B (r = –0.42). Nilai r negatif menunjukkan bahawa apabila nilai digital meningkat, bacaan SPAD menurun, manakala nilai positif menunjukkan hubungan linear antara kedua-dua pemboleh ubah, di mana peningkatan nilai digital juga meningkatkan bacaan SPAD. Perbandingan nilai r menunjukkan bahawa nilai R/(R + G + B) mempunyai hubungan tertinggi dengan bacaan SPAD dan model regresi bagi pengiraan bacaan SPAD adalah seperti berikut:

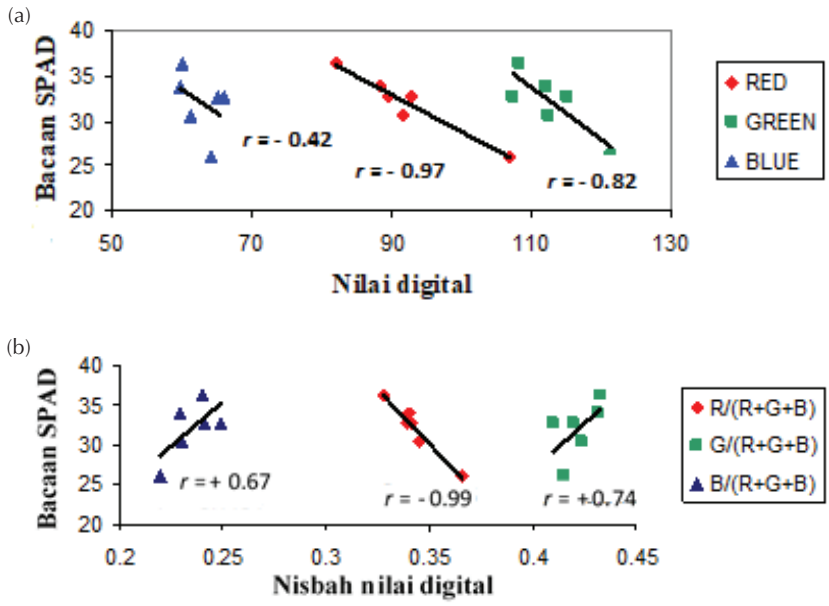
$$\text{Bacaan SPAD} = -277.26 \times [R/(R+G+B)] + 127.12 \quad (1)$$

Jadual 1. Purata bacaan SPAD dan purata nilai digital R, G, B serta nilai nisbah R/(R + G + B), G/(R + G + B) dan B/(R + G + B) bagi setiap petak kecil (PK) mengikut rawatan baja N

Petak kecil (PK)	Rawatan baja N (kg)	Purata bacaan SPAD	Purata nilai digital			Nilai nisbah		
			R	G	B	R/(R+G+B)	G/(R + G + B)	B/(R + G + B)
PK 1	0	25.99	106.75	121.25	64.25	0.37	0.41	0.22
PK 2	1	30.49	91.75	112.50	61.25	0.35	0.42	0.23
PK 3	2	32.71	92.75	115.00	66.00	0.34	0.42	0.24
PK 4	3	32.65	89.50	107.25	65.25	0.34	0.41	0.25
PK 5	3.5	33.86	88.50	112.25	59.75	0.34	0.43	0.23
PK 6	4	36.25	82.00	108.25	60.00	0.33	0.43	0.24



Rajah 1. Hubungan antara bacaan SPAD dan rawatan baja N



Rajah 2. (a) Hubungan antara bacaan SPAD dan nilai digital R, G dan B serta (b) Hubungan antara bacaan SPAD dan nisbah nilai digital R/(R + G + B), G/ (R + G + B) dan B/(R + G + B)

Penjanaan peta bacaan SPAD

Nilai digital RGB yang diperoleh daripada imej mosaik digunakan sebagai input untuk menganggarkan bacaan SPAD melalui aplikasi persamaan 1 yang telah dibangunkan berdasarkan hubungan empirikal antara nilai R/(R+G+B) dan bacaan SPAD sebenar di lapangan. Proses pengiraan ini dilaksanakan dengan menggunakan perisian pemprosesan imej PCI *Geomatics* yang membolehkan penerapan persamaan tersebut secara spatial ke seluruh kawasan kajian. Hasil akhir ditunjukkan dalam *Gambar rajah 3* yang memaparkan imej bacaan SPAD yang dijana daripada imej mosaik RGB tersebut.

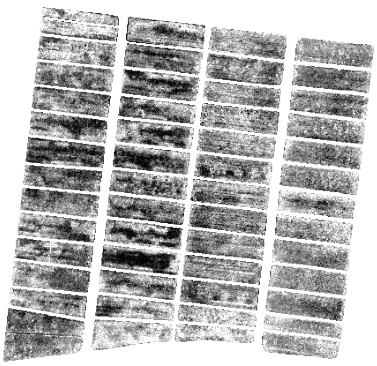
Imej bacaan SPAD yang telah dijana kemudiannya diklasifikasikan kepada tiga kluster utama iaitu rendah, sederhana dan tinggi bagi menggambarkan tahap kandungan klorofil atau kesuburan tanaman. Proses pengelasan ini dilaksanakan menggunakan algoritma *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique* (ISODATA) yang tersedia dalam perisian PCI Geomatics. ISODATA merupakan satu kaedah pengelasan tanpa penyeliaan (*unsupervised classification*) yang digunakan secara meluas dalam pemprosesan imej udara. Teknik ini berasaskan kepada kaedah pengklusteran, di mana piksel dalam imej dikumpulkan ke dalam kluster atau kumpulan berdasarkan persamaan ciri spektrum seperti nilai digital. Proses pengklusteran dijalankan menggunakan formula jarak Euclidean, di mana piksel akan dimasukkan ke dalam kluster yang mempunyai jarak spektrum paling minimum daripada pusat kluster. Formula pengiraan jarak Euclidean adalah mengikut persamaan berikut:

$$dc = \sqrt{(BV_{ij1} - \mu_{c1})^2 + (BV_{ij2} - \mu_{c2})^2 + \ldots (BV_{ijk} - \mu_{ck})^2}$$

$$= \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (BV_{ijk} - \mu_{ck})^2} \qquad (2)$$

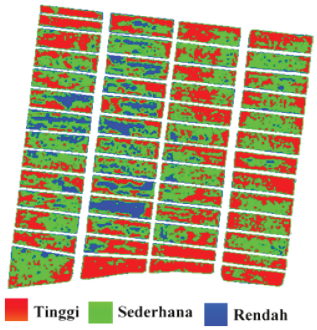
di mana:
d_c = *Euclidian distance* bagi kelas *c*
BV_{ijk} = nilai piksel dalam barisan *i*, kolum *j* bagi band *k*
μ_{ck} = nilai purata vektor bagi kelas *c* dikira dalam bank *k*
c = 1, 2, 3,.... *m* kelas
k = *1, 2, 3,.... n* band

Sesuatu piksel yang tidak diketahui kelas boleh ditentukan dengan pengiraan nilai *Euclidian distance* kelas *c* (d_c) antara setiap nilai piksel yang tidak diketahui (BV_{ijk}) dan setiap nilai purata vektor (μ_{ck}) dalam *k* band.



Gambar rajah 3. Imej bacaan SPAD

Dalam kajian ini, semua piksel dalam imej bacaan SPAD telah dikategorikan kepada tiga kelas iaitu tinggi, sederhana dan rendah seperti dalam *Gambar Rajah 4*. Peta taburan bacaan SPAD ini memberikan gambaran visual yang berguna untuk mengenal pasti tahap kandungan klorofil tumbuhan pada lokasi-lokasi tertentu berdasarkan nilai SPAD yang dianggarkan. Secara tidak langsung, maklumat ini dapat menyokong pengurusan pembajaan N yang lebih tepat dan efisien di kawasan sawah padi dengan menumpukan input pada kawasan yang memerlukan.



Gambar rajah 4. Peta bacaan SPAD

Kesimpulan

Kajian ini telah membuktikan bahawa teknik penderiaan jauh berasaskan imej udara berupaya menganggar kandungan klorofil tanaman padi secara tepat dan berkesan. Melalui analisis nilai digital R, G dan B daripada imej udara yang diperoleh menggunakan UAV, satu model regresi linear telah dibangunkan menggunakan indeks R/(R+G+B) yang menunjukkan korelasi tinggi (r = –0.99) dengan bacaan SPAD. Imej bacaan SPAD yang dijana melalui model ini telah dikelaskan kepada tiga tahap iaitu rendah, sederhana dan tinggi menggunakan pengelasan tanpa penyeliaan ISODATA. Peta bacaan SPAD ini memberi maklumat penting tentang status kesihatan tanaman dan variasi keperluan nitrogen di lapangan. Secara keseluruhan, pendekatan ini adalah praktikal serta kos efektif untuk digunakan dalam pengurusan pembajaan yang lebih tepat dan efisien bagi kawasan berskala besar. Selain itu, teknologi dron kini telah berkembang dengan pesat dan memainkan peranan penting dalam transformasi pertanian moden. Adalah dicadangkan agar dron yang dilengkapi dengan penderia multispektral dan sistem penentududukan global (GPS) berketepatan tinggi digunakan bagi membolehkan pengumpulan data ladang secara tepat dan efisien. Dengan integrasi teknologi kecerdasan buatan (AI) dan Internet benda (IoT), dron bukan sahaja digunakan untuk pengimejan, malah berupaya menganalisis keadaan tanaman serta mengenal pasti masalah awal serta menyokong keputusan pembajaan dan pengurusan ladang. Perkembangan ini menjadikan dron sebagai alat strategik dalam pelaksanaan sistem pertanian pintar yang lebih cekap dan mampan.

Penghargaan
Penulis merakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan ucapan terima kasih kepada Institut Penyelidikan dan Kemajuan Pertanian Malaysia (MARDI), khususnya kepada para pegawai penyelidik dan pegawai sokongan di Pusat Penyelidikan Kejuruteraan atas penglibatan mereka secara langsung dan tidak langsung dalam memastikan kejayaan pelaksanaan kajian ini.

Bibliografi

Balasubramanian, V., Morales, A. C., Cruz, R. T., & Abdulrachman, S. (1999). On-farm adaptation of knowledge-intensive nitrogen management technologies for rice systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* 53(1), 59–69.

Bilal, M., Alrasheedi, M. A., Aamir, M. et al. (2024). Enhanced forecasting of rice price and production in Malaysia using novel multivariate fuzzy time series models. *Sci. Rep.,* 14, 29903.

Dobermann, A., & White, P. F. (1999). Strategies for nutrient management in irrigated and rainfed lowland rice systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 53(1), 1–18.

Jahne, B. (1991). *Digital image processing*. New York: Springer-Verlag.

Khosla, R., Fleming, K., Delgado, J. A., Shaver, T. M., & Westfall, D. G. (2002). Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *Journal of Soil and Water Conservation,* 57(6), 513–518.

Olk, D. C., Cassman, K. G., Simbahan G., Sta. Cruz, P. C., Abdulrachman, S., Nagarajan, R., Tan, P. S., & Satawathananont, S. (1999). Interpreting fertilizer use efficiency in relation to soil nutrient-supplying capacity, factor productivity and agronomic efficiency. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* 53(1), 35–41.

Patil, V. C. (2009). Precision nutrient management: A review. *Indian Journal of Agronomy,* 54(2), 113–119.

Peng, S., Garcia, F. V., Laza, R. C., Sanico, A. L., Visperas, R.M., & Cassman, K. G. (1996). Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice. *Field Crops Res.,* 47, 243–252.

Perangkaan Agromakanan Malaysia (2023). Kementerian Pertanian Dan Keterjaminan Makanan.

Percival, G. C., Keary, I. P., & Noviss, K. (2008). The potential of a chlorophyll content SPAD meter to quantify nutrient stress in foliar tissue of Sycamore (*Acer pseudoplatanus*), English oak (*Quercus robur*), and European beech (*Fagus sylvatica*). *Arboriculture and Urban Forestry,* 34(2), 89–100.

Scharf, P. C., Schmidt, J. P., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Hong, S. Y., Lory, J. A., & Davis, J. G. (2002). Remote sensing for nitrogen management. *Journal of Soil and Water Conservation,* 57(6), 518–524.

Ringkasan
Kajian ini bertujuan untuk membangunkan teknik pemprosesan imej udara yang berupaya menganggar kandungan klorofil tanaman padi. Pengumpulan data dijalankan di sawah padi FELCRA Seberang Perak melalui penggunaan klorofil meter SPAD dan imej udara yang diperoleh menggunakan UAV CropCam. Melalui analisis nilai digital merah (R), hijau (G) dan biru (B) daripada imej mosaik, persamaan bagi mengira bacaan klorofil meter SPAD dengan ketepatan yang tinggi telah dibangunkan. Hubungan antara bacaan SPAD dengan nilai digital R, G, B serta nisbah R/(R+G+B), G/(R+G+B) dan B/(R+G+B) telah dikenal pasti, di mana nisbah R/(R+G+B) menunjukkan korelasi tertinggi berbanding parameter lain. Berdasarkan hasil ini, satu model regresi linear telah dibangunkan menggunakan pemboleh ubah R/(R+G+B) yang terbukti dapat menganggar bacaan SPAD secara berkesan dan menghasilkan imej bacaan SPAD. Seterusnya, imej ini dikelaskan kepada tiga kluster iaitu rendah, sederhana dan tinggi melalui pengelasan ISODATA untuk menjana peta bacaan SPAD. Peta ini dapat menganggar tahap status kandungan klorofil dan kesuburan pokok padi serta keperluan baja nitrogen bagi kawasan tertentu dalam sawah. Secara keseluruhannya, pendekatan ini merupakan satu kaedah yang praktikal, kos efektif dan efisien untuk pengurusan baja secara lebih tepat dalam sistem pertanian berskala besar.

Summary
This study aims to develop an aerial image processing technique capable of estimating chlorophyll content in rice plants. Data were collected from a paddy field in FELCRA Seberang Perak using SPAD meters and aerial images captured by a UAV CropCam. The digital values of red (R), green (G) and blue (B) extracted from the mosaic images were analyzed to formulate an accurate equation for estimating SPAD readings. The analysis revealed that the ratio R/(R+G+B) had the highest correlation with SPAD readings compared to other parameters. Based on this finding, a linear regression model was developed using that ratio as the predictor variable, enabling indirect estimation of SPAD values and subsequently generating SPAD reading image. This image was then classified into low, medium and high clusters using the ISODATA classification method to produce a SPAD reading map. This map reflects the chlorophyll content status, overall plant health and nitrogen fertilizer requirements for specific zones within the paddy field. Overall, this approach offers a practical, cost-effective and efficient method for more precise fertilization management in large-scale agricultural systems.

Pengarang
Teoh Chin Chuang (Dr.)
Pusat Penyelidikan Kejuruteraan, Ibu Pejabat MARDI,
Persiaran MARDI-UPM, 43400 Serdang, Selangor
E-mel: cchin@mardi.gov.my

Mohd Khairil Izani Ishak
Pusat Penyelidikan Kejuruteraan, Ibu Pejabat MARDI,
Persiaran MARDI-UPM, 43400 Serdang, Selangor