

PENGARUH BERBAGAI JENIS MEDIA TANAM TERHADAP KANDUNGAN MINERAL ESENSIAL (Zn, Ca, dan S) DAN PRODUKSI *MICROGREENS* SAWI HIJAU (*Brassica juncea* L.)

*The Effect of Various Types of Growing Media on Essential Mineral Content (Zn, Ca, and S) and the Production of Green Mustard Microgreens (*Brassica juncea* L.).*

Muthia Syifa^{1*}, Yuyu Sri Rahayu², Winda Rianti³

^{1,2,3}) Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. H.S Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Kabupaten Karawang, Jawa Barat 41361, Indonesia

^{1*)}muthiasyifa0811@gmail.com

ABSTRAK

Microgreens merupakan sayuran muda yang dipanen pada usia 7–14 HST dan dikenal memiliki kandungan nutrisi yang tinggi, terutama vitamin, antioksidan, dan mineral esensial. Salah satu faktor penting yang mempengaruhi kualitas nutrisi *microgreens* adalah media tanam. Media tanam berfungsi menopang pertumbuhan tanaman, menyediakan unsur hara yang dibutuhkan, serta menjadi tempat berkembangnya sistem perakaran. Media tanam yang sesuai mampu meningkatkan penyerapan nutrisi secara optimal sehingga mendukung pertumbuhan dan perkembangan *microgreens* sawi hijau. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh berbagai jenis media tanam terhadap produksi serta kandungan mineral esensial (Zn, Ca, dan S) pada *microgreens* sawi hijau. Waktu percobaan dilaksanakan pada Desember 2025 sampai Januari 2026 di Gedung A Fakultas Pertanian Kampus 2 Universitas Singaperbangsa Karawang di Desa Margasari, Kecamatan Karawang Timur, Kabupaten Karawang, Jawa Barat. Metode penelitian yang digunakan yaitu eksperimental dengan Rancangan Acak Kelompok (RAK) Faktor Tunggal dengan 5 perlakuan dan 5 ulangan. Perlakuan terdiri atas M0 = tanah, M1 = Cocopeat, M2 = Vermiculite, M3 = Rockwool, dan M4 = Perlite. Data dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) dan dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf 5%. Hasil percobaan menunjukkan bahwa perbedaan jenis media tanam berpengaruh nyata terhadap parameter bobot segar, bobot kering, kandungan mineral zinc, kandungan mineral kalsium, dan kandungan mineral sulfur. Jenis media tanah (M0) mampu memberikan hasil terbaik dengan nilai tertinggi pada rata-rata bobot segar sebesar 81,598 gram, rata-rata bobot kering sebesar 5,018 gram, dan rata-rata kandungan kalsium (Ca) sebesar 5.319,4 mg/100g. Jenis media perlite (M4) mampu memberikan hasil kandungan mineral Zn tertinggi sebesar 35,4 mg/100g. Jenis media rockwool (M3) mampu memberikan hasil kandungan mineral Sulfur tertinggi sebesar 2.837,6 mg/100g.

Kata kunci: *microgreens, media tanam, Zinc, Kalsium, Sulfur*

ABSTRACT

Microgreens are young vegetables harvested at the age of 7–14 days after planting and are known to have high nutritional content, especially vitamins, antioxidants, and essential minerals. One of the important factors affecting nutritional quality of *microgreens* is the growing media. Growing media functions to support plant growth, provide the required nutrients, and serve as a medium for root system development. Appropriate growing media can enhance nutrient absorption optimally, thereby supporting the growth and development of green mustard *microgreens*. This study aims to determine the effect of various types of growing media on essential mineral content (Zn, Ca, and S) and the production of green mustard *microgreens*. The experiment was conducted from December 2025 to January 2026 at Building A, Faculty of Agriculture, Campus 2, Universitas Singaperbangsa Karawang, located in Margasari Village, East Karawang District, Karawang Regency, West Java. The research method used was experimental with a single-factor Randomized Block Design (RBD) consisting of 5 treatments and 5 replications. The treatments consisted of M0 = soil, M1 = cocopeat, M2 = vermiculite, M3 = rockwool, and M4 = perlite. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) and continued with the Least Significant Difference (LSD) test at a 5% significance level. The results showed that different types of growing media had a significant effect on fresh weight, dry weight, zinc content, calcium content, and sulfur content. Soil media (M0) provided the best results with the highest values in average fresh weight of 81,598 grams, average dry weight of 5,018 grams, and average calcium (Ca) content of 5.319,4 mg/100g. Perlite media (M4) produced the highest zinc (Zn) mineral content of 35,4 mg/100 g. Rockwool medium (M3) produced the highest sulfur mineral content of 2.837,6 mg/100 g.

Keywords: *microgreens, growing media, Zinc, Calcium, Sulfur*

PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah penduduk yang terus meningkat serta pesatnya proses urbanisasi telah menyebabkan terjadinya alih fungsi lahan pertanian menjadi kawasan industri, permukiman, dan infrastruktur (Nabila dan Anandaputri, 2023). Data Badan Pusat Statistik, (2024) menunjukkan bahwa Indonesia kehilangan lebih dari 650.000 hektar lahan pertanian dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir akibat konversi lahan untuk pembangunan infrastruktur dan kawasan perkotaan. FAO, (2022) juga melaporkan bahwa secara global, sekitar 30% lahan subur mengalami degradasi moderat hingga berat akibat urbanisasi, perubahan iklim, dan eksploitasi berlebihan. Kondisi ini menurunkan kapasitas produksi pangan dan mengancam ketahanan gizi masyarakat, khususnya di wilayah urban yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap pasokan pangan dari luar daerah (Sanjesti dan Silviana, 2025).

Tantangan tersebut menuntut adanya sistem pertanian alternatif yang mampu beradaptasi terhadap keterbatasan ruang dan perubahan lingkungan. Salah satu pendekatan inovatif yang berkembang secara global adalah *urban farming* (Gunapala *et al.*, 2025). *Urban farming* merupakan praktik pertanian yang dilakukan di wilayah perkotaan dengan memanfaatkan ruang terbatas seperti

pekarangan rumah, balkon, *rooftop*, hingga dinding vertikal (Islami *et al.*, 2025). *Urban farming* menjadi solusi strategis tidak hanya untuk menjaga ketersediaan pangan bergizi secara mandiri tetapi juga untuk mengurangi jejak karbon dari rantai pasok panjang, meningkatkan kualitas udara, serta memperkuat ketahanan pangan keluarga di perkotaan (Pratio *et al.*, 2024).

Salah satu komoditas yang paling sesuai untuk diaplikasikan dalam sistem urban farming adalah *microgreens*. *Microgreens* merupakan sayuran muda yang dipanen pada usia 7–14 hari setelah tanam (Panjaitan, 2022). *Microgreens* menjadi pilihan ideal karena memiliki siklus budidaya yang sangat singkat, tidak memerlukan lahan luas, dapat dibudidayakan secara vertikal ataupun *indoor*, dan tidak membutuhkan pestisida (Salim, 2021).

Microgreens dikenal sebagai sayuran muda yang memiliki kandungan berbagai senyawa gizi penting bagi kesehatan manusia, seperti vitamin, antioksidan, dan mineral esensial (Bashariah *et al.*, 2024). Kandungan nutrisi tersebut menjadikan *microgreens* semakin populer sebagai salah satu sumber pangan fungsional yang dapat dikonsumsi secara segar maupun sebagai pelengkap berbagai hidangan. Salah satu tanaman yang berpotensi dikembangkan sebagai *microgreens* adalah sawi hijau (*Brassica*

juncea L.). Tanaman ini termasuk dalam famili Brassicaceae yang dikenal memiliki kandungan nutrisi yang tinggi serta berbagai senyawa bioaktif yang bermanfaat bagi kesehatan manusia (Binder, 2020).

Menurut Charloq *et al.*, (2025), serapan mineral *microgreens* dapat dipengaruhi oleh media tanam, karena setiap media memiliki keunggulan spesifik. Media tanam berfungsi sebagai tempat tumbuh tanaman yang berperan dalam menopang sistem perakaran serta mempengaruhi ketersediaan air dan unsur hara yang dapat diserap oleh tanaman (Lemma dan Banjaw, 2022). Karakteristik media tanam seperti porositas, kemampuan menahan air, serta aerasi dapat mempengaruhi perkembangan akar dan penyerapan nutrisi oleh tanaman (Mabizela *et al.*, 2017).

Berbagai jenis media tanam dapat digunakan dalam budidaya *microgreens*, antara lain tanah, cocopeat, vermiculite, rockwool, dan perlite. Tanah merupakan media tumbuh tanaman mengandung berbagai unsur hara yang diperlukan untuk menunjang pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Menurut Salamah, (2020) unsur hara yang terdapat pada tanah terdiri atas unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S), serta unsur hara mikro seperti besi (Fe), mangan (Mn), seng (Zn), tembaga (Cu),

boron (B), klorin (Cl), dan molibdenum (Mo) yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah relatif kecil namun tetap esensial bagi proses metabolisme tanaman.

Sementara itu, cocopeat merupakan media tanam organik yang berasal dari serbuk sabut kelapa dan banyak digunakan dalam budidaya tanaman karena memiliki kemampuan menyerap dan menyimpan air dengan baik serta memiliki pH yang relatif sesuai bagi pertumbuhan tanaman (Shafira *et al.*, 2021). Media tanam vermiculite dan perlite juga sering digunakan dalam budidaya tanaman karena memiliki struktur yang ringan dan mampu meningkatkan aerasi serta kapasitas menahan air pada media tanam (Chaitra *et al.*, 2024). Penggunaan vermiculite diketahui mampu meningkatkan ketersediaan air dan nutrisi bagi tanaman serta dapat meningkatkan kandungan mineral tertentu pada tanaman *microgreens* (Savaliya *et al.*, 2025).

Sementara itu, perlite merupakan bahan mineral ringan yang sering digunakan dalam media tanam karena mampu meningkatkan aerasi dan drainase sehingga mendukung perkembangan akar tanaman (Sisriana *et al.*, 2021). Selain itu, rockwool juga banyak digunakan dalam sistem budidaya intensif karena memiliki kemampuan menyerap air yang tinggi serta mampu mempertahankan kelembapan media sehingga mendukung perkembangan

akar tanaman secara optimal (Sazali *et al.*, 2024).

Perbedaan sifat fisik dan kimia dari berbagai media tanam tersebut diduga dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman serta kemampuan tanaman dalam menyerap dan mengakumulasi unsur hara, termasuk mineral esensial seperti Zn, Ca, dan S. Media tanam dengan kemampuan retensi air yang baik serta aerasi yang optimal dapat mendukung perkembangan sistem perakaran sehingga penyerapan unsur hara menjadi lebih optimal (Lestari *et al.*, 2026). Kondisi tersebut pada akhirnya dapat mempengaruhi hasil produksi serta kandungan mineral pada *microgreens*.

Meskipun budidaya *microgreens* semakin berkembang, penelitian mengenai pengaruh berbagai jenis media tanam terhadap hasil dan kandungan mineral esensial pada *microgreens*, khususnya pada tanaman sawi hijau (*Brassica juncea* L.), masih relatif terbatas. Perbedaan karakteristik fisik dan kimia dari berbagai media tanam seperti tanah, cocopeat, vermiculite, rockwool, dan perlite diduga dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman serta kemampuan tanaman dalam menyerap dan mengakumulasi unsur hara.

Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh berbagai jenis media tanam terhadap hasil dan kandungan mineral esensial berupa zinc

(Zn), kalsium (Ca), dan sulfur (S) pada *microgreens* sawi hijau.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai jenis media tanam yang paling sesuai untuk meningkatkan hasil dan kandungan mineral esensial pada *microgreens* sawi hijau, serta menjadi referensi dalam pengembangan budidaya *microgreens* yang bernilai gizi bagi masyarakat.

METODOLOGI PENELITIAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Gedung A Fakultas Pertanian Kampus 2 Universitas Singaperbangsa Karawang yang terletak di Jl. Lingkar Tanjungpura, Desa Margasari, Karawang Timur, Karawang, Jawa Barat. Kegiatan penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2025 hingga Januari 2026.

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu benih sawi hijau varietas shinta, media tanam (tanah, cocopeat, vermiculite, rockwool, dan perlite), dan air.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah wadah plastik ukuran 16,5 cm x 12,5 cm x 6 cm, sprayer, gunting, spektrofotometer X-ray, thermohygrometer, kertas label, tag plant, luxmeter, timbangan analitik, mortar, alu, oven pengering, pH meter, lakban, penggaris, alat tulis, handphone, ayakan 100 mesh.

Rancangan Percobaan

Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan Rancangan Acak Kelompok (RAK) Faktor Tunggal dengan 5 perlakuan dan 5 ulangan sehingga diperoleh 25 unit percobaan, setiap unit percobaan terdiri dari 7 box sampel, sehingga totalnya adalah 175 box sampel. Perlakuan terdiri atas M0 = tanah, M1 = Cocopeat, M2 = Vermiculite, M3 = Rockwool, dan M4 = Perlite. Parameter yang diamati meliputi persentase perkecambahan, bobot segar tanpa akar, bobot kering, dan analisis kandungan mineral esensial (Zn, Ca, dan S).

Data hasil pengamatan dianalisis menggunakan analisis ragam (ANOVA) dan apabila terdapat perbedaan nyata, analisis dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf 5%.

Prosedur Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan, yaitu persiapan benih, persiapan media tanam, penanaman, pemeliharaan tanaman, pemanenan, dan analisis kandungan mineral microgreens. Persiapan benih dilakukan dengan perendaman benih selama ± 1 jam menggunakan air bersih, kemudian benih yang digunakan yaitu benih yang tenggelam.

Persiapan media tanam dilakukan sebelum penanaman benih microgreens sawi hijau menggunakan tanah, cocopeat, vermiculite, rockwool, dan perlite. Tanah yang digunakan berupa top soil yang

dibersihkan dari gulma, akar, dan bahan organik lain, kemudian diayak hingga bertekstur halus. Cocopeat direndam selama 24 jam untuk melarutkan senyawa kimia, terutama tanin, kemudian diperas guna menurunkan kadar air dan kandungan tanin yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman. Vermiculite dibasahi sebelum digunakan untuk menjaga kelembapan serta meningkatkan kemampuan media mengikat air dan nutrisi. Rockwool dipotong setinggi ± 3 cm sesuai kedalaman wadah, lalu direndam hingga lembap merata agar mendukung pertumbuhan tanaman. Perlite dibasahi dengan air bersih untuk menjaga kelembapan media sehingga mendukung pertumbuhan awal tanaman secara optimal.

Penanaman dilakukan menggunakan wadah mika plastik berukuran $16,5 \times 12,5 \times 6$ cm. Setiap wadah percobaan ditanam benih sebanyak 400 benih yang ditaburkan secara merata di permukaan media untuk memastikan pertumbuhan microgreens yang seragam. Pemeliharaan tanaman meliputi penyiraman secara rutin, serta upaya pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman (OPT). Pemanenan dilakukan ketika tanaman telah tumbuh dengan daun kotiledon yang sudah membuka penuh dan mulai muncul daun sejati pertama, umumnya pada 14 hari setelah tanam.

Analisis kandungan mineral microgreens dilakukan dengan

menggunakan alat spektrofotometer X-ray. Sampel microgreens yang telah dikeringkan dalam oven pada suhu 75°C selama 12 jam kemudian digerus sampai berbentuk serbuk. Setiap sampel ditimbang sebanyak 2,5 gram untuk dilakukan uji XRF.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Persentase Perkecambahan (%)

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perbedaan jenis media tanam pada *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.) memberikan pengaruh yang tidak berbeda nyata terhadap persentase perkecambahan.

Tabel 1. Rata-rata persentase perkecambahan pada *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.)

Perlakuan	Persentase Perkecambahan (%)
M0 (Tanah)	71,350 a
M1 (Cocopeat)	78,050 a
M2 (Vermiculite)	80,975 a
M3 (Rockwool)	88,900 a
M4 (Perlite)	75,800 a
KK (%)	16,448%

Sumber: Data primer setelah diolah, (2026)

Keterangan: Nilai rata-rata yang dinotasikan dengan huruf yang sama pada kolom nilai indeks menunjukkan bahwa perlakuan tidak berbeda nyata.

Rata-rata persentase perkecambahan tertinggi diperoleh pada perlakuan M3 (rockwool) sebesar 88,900%, sedangkan persentase terendah terdapat pada perlakuan M0 (tanah) sebesar 71,350%. Meskipun terdapat perbedaan nilai secara kuantitatif antarperlakuan, perbedaan tersebut tidak cukup besar untuk

memberikan pengaruh yang nyata secara statistik. Hal ini menunjukkan bahwa faktor media tanam belum menjadi faktor pembatas utama dalam fase awal perkecambahan *microgreens* sawi hijau.

Tidak berbedanya persentase perkecambahan antar perlakuan diduga karena proses perkecambahan benih lebih dipengaruhi oleh faktor internal benih, seperti viabilitas dan vigor benih, dibandingkan oleh jenis media tanam (Saputra *et al.*, 2024). Pada fase perkecambahan, benih masih memanfaatkan cadangan makanan yang terdapat di dalam biji sehingga kebutuhan terhadap sifat fisik dan kimia media tanam relatif belum dominan (Rajiman dan Megawati, 2022).

Bobot Segar (g)

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perbedaan jenis media tanam pada *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.) memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap bobot segar tanpa akar.

Tabel 2. Rata-rata bobot segar *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.)

Perlakuan	Bobot Segar (g)
M0 (Tanah)	81,598 a
M1 (Cocopeat)	46,150 b
M2 (Vermiculite)	38,377c
M3 (Rockwool)	51,043 b
M4 (Perlite)	29,348 d
KK (%)	9,320 %

Sumber: Data primer setelah diolah, (2026)

Keterangan: Nilai rata-rata yang dinotasikan dengan huruf yang sama pada kolom nilai indeks menunjukkan bahwa perlakuan tidak berbeda nyata pada uji BNT taraf $\alpha = 5\%$ atau $P \leq 0,05$.

Bobot segar tertinggi diperoleh pada perlakuan M0 (tanah) sebesar 81,598 g, yang berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Tingginya bobot segar pada media tanah diduga berkaitan dengan kemampuan tanah dalam menyediakan unsur hara serta daya ikat air yang relatif baik, sehingga mendukung pertumbuhan biomassa tanaman secara optimal (Purba *et al.*, 2021). Ketersediaan air yang cukup berperan penting dalam meningkatkan bobot segar tanaman karena sebagian besar bobot segar tersusun atas kandungan air dalam jaringan tanaman (Djajadi *et al.*, 2020).

Bobot segar terendah diperoleh pada perlakuan M4 (perlite) sebesar 29,348 g, yang berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya. Rendahnya bobot segar pada media perlite diduga disebabkan oleh kemampuan media yang rendah dalam menahan air dan unsur hara, sehingga ketersediaan air bagi tanaman menjadi terbatas dan berdampak pada rendahnya akumulasi biomassa segar (Lee *et al.*, 2022).

Bobot Kering (g)

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perbedaan jenis media tanam pada microgreens sawi hijau (*Brassica juncea* L.) memberikan pengaruh yang berbeda nyata terhadap bobot kering (Tabel 3).

Bobot kering tertinggi diperoleh pada perlakuan M0 (tanah) sebesar 5,018 g, yang berbeda nyata dibandingkan dengan

perlakuan lainnya. Tingginya bobot kering pada media tanah menunjukkan bahwa media ini mampu mendukung akumulasi biomassa kering secara optimal. Hal ini diduga berkaitan dengan kemampuan tanah dalam menyediakan unsur hara yang lebih lengkap dan mendukung proses fotosintesis, sehingga akumulasi bahan kering tanaman meningkat (Adji *et al.*, 2024). Hal ini juga didukung oleh Taiz *et al.*, (2015) yang menyatakan bahwa proses fotosintesis pada tanaman mulai berlangsung pada fase awal pertumbuhan ketika kotiledon telah berkembang dan berfungsi sebagai organ fotosintetik pertama, yang umumnya terjadi sekitar 2–4 hari setelah perkecambahan.

Tabel 3. Rata-rata bobot kering *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.)

Perlakuan	Bobot Kering (g)
M0 (Tanah)	5,018 a
M1 (Cocopeat)	4,368 b
M2 (Vermiculite)	3,432 c
M3 (Rockwool)	3,612 c
M4 (Perlite)	2,467 d
KK (%)	5,047 %

Sumber: Data primer setelah diolah, (2026)

Keterangan: Nilai rata-rata yang dinotasikan dengan huruf yang sama pada kolom nilai indeks menunjukkan bahwa perlakuan tidak berbeda nyata pada uji BNT taraf $\alpha = 5\%$ atau $P \leq 0,05$.

Bobot kering terendah diperoleh pada perlakuan M4 (perlite) sebesar 2,467 g, yang berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya. Rendahnya bobot kering pada media perlite diduga disebabkan oleh kemampuan media yang rendah dalam menahan air dan unsur hara, sehingga

proses fotosintesis dan akumulasi bahan kering tanaman menjadi terbatas (Rajaseger *et al.*, 2023).

Analisis Kandungan Mineral Esensial Zinc (Zn), Kalsium (Ca), dan Sulfur (S) (mg/100g)

Tabel 4. Rata-rata kandungan mineral Zn, Ca, dan S pada *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.)

Perlakuan	Zn (mg/100g)	Ca (mg/100g)	Sulfur (mg/100g)
M0	26,2 b	5.319,4 a	1.742,0 c
M1	22,6 c	0 c	1.230,8 d
M2	33,6 a	2.709,6 b	1.747,4 c
M3	32,4 a	3.795,2 b	2.837,6 a
M4	35,4 a	3.623,8 b	2.275,0 b
KK	8,147 %	23,805 %	10,222 %

Sumber: Data primer setelah diolah, (2026)

Keterangan: M0 = Tanah, M1 = Cocopeat, M2 = Vermiculite, M3 = Rockwool, M4 = Perlite. Nilai rata-rata yang dinotasikan dengan huruf yang sama pada kolom nilai indeks menunjukkan bahwa perlakuan tidak berbeda nyata pada uji BNT taraf $\alpha = 5\%$ atau $P \leq 0,05$.

Berdasarkan hasil analisis mineral pada Tabel 4, kandungan Zn tertinggi diperoleh pada perlakuan M4 (perlite) sebesar 35,4 mg/100g, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan M2 (vermiculite) sebesar 33,6 mg/100g dan M3 (rockwool) sebesar 32,4 mg/100g. Sementara itu, kandungan Zn terendah terdapat pada perlakuan M1 (cocopeat) sebesar 22,6 mg/100g. Kandungan Ca tertinggi diperoleh pada perlakuan M0 (tanah) sebesar 5.319,4 mg/100g dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya, sedangkan kandungan Ca terendah terdapat pada perlakuan M1 (cocopeat) sebesar 0 mg/100g. Selain itu, kandungan sulfur tertinggi diperoleh pada perlakuan M3

(rockwool) sebesar 2.837,6 mg/100g, sedangkan kandungan sulfur terendah terdapat pada perlakuan M1 (cocopeat) sebesar 1.230,8 mg/100g.

Tingginya kandungan Zn pada perlakuan perlite (M4), vermiculite (M2), dan rockwool (M3) diduga berkaitan dengan kandungan mineral alami pada masing-masing media. Rockwool diketahui mengandung senyawa ZnO dan sulfur dalam bentuk SO_3 yang berasal dari bahan baku slag baja dan batuan basal (Yap *et al.*, 2025). Vermiculite yang berasal dari mineral seperti biotit dan phlogopit juga mengandung Zn dalam struktur kristalnya (Neto *et al.*, 2023), sedangkan perlite sebagai material hasil aktivitas vulkanik mengandung Zn sebagai unsur minor dalam struktur kaca amorfnya (Angelopoulos, 2024). Keberadaan unsur-unsur tersebut menunjukkan bahwa media memiliki kemampuan berbeda dalam menyediakan dan mempertahankan ketersediaan hara bagi tanaman. Selain kandungan mineral, sifat fisik media seperti aerasi dan kemampuan menahan air yang baik juga mendukung penyerapan unsur hara secara optimal (Sutinah *et al.*, 2023).

Tingginya kandungan sulfur pada perlakuan rockwool (M3) diduga berkaitan dengan adanya senyawa sulfur dalam komposisi media tersebut, seperti SO_3 , yang berpotensi meningkatkan ketersediaan sulfur dalam larutan media tanam (Yap *et*

al., 2025). Kondisi tersebut menyebabkan unsur sulfur lebih mudah diserap oleh tanaman sehingga akumulasi sulfur dalam jaringan tanaman menjadi lebih tinggi (Baiyin *et al.*, 2021). Selain itu, tanaman famili Brassicaceae seperti sawi hijau diketahui memiliki kebutuhan dan kemampuan akumulasi sulfur yang relatif tinggi karena unsur tersebut berperan dalam pembentukan senyawa organosulfur seperti glukosinolat. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Gioia *et al.*, (2023), yang melaporkan bahwa microgreens famili Brassicaceae cenderung memiliki kandungan sulfur lebih tinggi dibandingkan beberapa famili lainnya karena berhubungan dengan akumulasi senyawa organosulfur pada jaringan tanaman muda.

Kandungan Ca tertinggi pada perlakuan tanah (M0) menunjukkan bahwa media tanah memiliki kemampuan lebih baik dalam menyediakan unsur hara makro dibandingkan media inert maupun organik murni. Tanah mineral umumnya mengandung Ca tersedia dalam bentuk Ca^{2+} serta fase padatan yang berfungsi sebagai cadangan unsur hara sehingga pasokan Ca dalam larutan tanah lebih stabil (Xiong *et al.*, 2017). Selain itu, kemampuan tanah dalam mempertahankan ketersediaan air mendukung proses transpirasi dan transport Ca melalui xilem menuju jaringan tanaman (Wdowiak *et al.*, 2024). Kondisi tersebut menyebabkan akumulasi Ca pada tanaman

yang ditanam pada media tanah menjadi lebih tinggi.

Sedangkan perlakuan cocopeat (M1) cenderung menghasilkan kandungan Zn, Ca, dan Sulfur yang terendah dibandingkan media lainnya. Kondisi ini diduga berkaitan dengan karakteristik cocopeat yang tersusun atas lignin, selulosa, hemiselulosa, serta senyawa fenolik seperti tanin (Sari *et al.*, 2023). Senyawa tanin diketahui mampu mengikat beberapa mineral, seperti Ca, Fe, Cu, dan Zn, sehingga menurunkan ketersediaannya bagi tanaman (Samtiya *et al.*, 2020). Selain itu, struktur bahan organik cocopeat yang relatif sulit terdekomposisi menyebabkan pelepasan unsur hara berlangsung lebih lambat, termasuk sulfur dalam bentuk sulfat yang dapat diserap tanaman (Magnucka *et al.*, 2023). Kondisi tersebut menyebabkan penyerapan unsur hara oleh tanaman menjadi kurang optimal sehingga kandungan mineral pada perlakuan cocopeat cenderung lebih rendah.

Perbedaan kandungan mineral pada microgreens sawi hijau menunjukkan bahwa jenis media tanam mempengaruhi kemampuan tanaman dalam menyerap dan mengakumulasi unsur hara. Zn berperan sebagai unsur mikro esensial yang terlibat dalam aktivitas enzim, metabolisme, dan pembentukan klorofil secara tidak langsung (Broadley *et al.*, 2017). Ca berperan dalam pembentukan dinding sel dan menjaga

stabilitas membran sel, sedangkan sulfur berperan dalam pembentukan asam amino yang mengandung sulfur seperti sistein dan metionin serta sintesis protein tanaman (Kopriva *et al.*, 2019). Pada tanaman famili Brassicaceae seperti sawi hijau, sulfur juga berperan dalam pembentukan glukosinolat yang berkontribusi terhadap mekanisme pertahanan alami tanaman dan karakteristik rasa khas pada jaringan tanaman muda (Czerniawski dan Bednarek, 2018).

Microgreens sawi hijau pada umur 7 HST telah mampu menyerap dan mengakumulasi unsur hara mineral, baik unsur hara makro maupun mikro (Fuente *et al.*, 2019). Kemampuan penyerapan unsur hara pada fase awal pertumbuhan menunjukkan bahwa jaringan tanaman muda telah aktif melakukan proses metabolisme dan akumulasi mineral untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Hal ini sejalan dengan penelitian Gioia *et al.*, (2023), yang menyatakan bahwa microgreens umumnya dipanen pada umur 7–19 hari setelah semai dan telah memiliki profil mineral yang jelas, meliputi N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Fe, Zn, Mn, Cu, dan B, serta kandungan mineral pada microgreens diketahui dipengaruhi oleh faktor genetik dan kondisi media tumbuh tanaman.

Seiring bertambahnya umur tanaman, perkembangan sistem perakaran menyebabkan kemampuan penyerapan unsur hara menjadi lebih optimal karena

luas permukaan akar meningkat dan aktivitas fisiologis tanaman semakin tinggi. Menurut Li *et al.*, (2021), pada umur 7 HST, microgreens sawi hijau telah menunjukkan kemampuan akumulasi mineral meskipun sistem perakarannya belum berkembang maksimal. Kondisi ini menunjukkan bahwa microgreens memiliki kemampuan akumulasi nutrisi yang relatif cepat pada fase awal pertumbuhan.

Kandungan mineral yang terakumulasi pada microgreens tidak hanya berperan penting bagi proses fisiologis tanaman, tetapi juga berpotensi memberikan manfaat bagi pemenuhan kebutuhan gizi manusia. Makronutrien menyediakan energi dan bahan pembangun, sedangkan mikronutrien seperti zinc, kalsium, dan sulfur sangat penting untuk aktivitas enzim, pembentukan tulang, serta berbagai fungsi fisiologis lainnya (Savarino *et al.*, 2021).

Menurut EFSA, (2014), Zn dibutuhkan sekitar 7,5–16,3 mg/hari pada orang dewasa dengan batas atas sekitar 25–40 mg/hari, sedangkan Ca dibutuhkan sekitar 1000 mg/hari (EFSA, 2014a), dan sulfur termasuk ke dalam kelompok makromineral yang dibutuhkan lebih dari 100 mg/hari. Kekurangan Zn, Ca, dan sulfur masih menjadi permasalahan gizi yang umum terjadi secara global, sehingga konsumsi pangan padat nutrisi seperti *microgreens* berpotensi membantu

memenuhi kebutuhan mikronutrien harian masyarakat (Passarelli *et al.*, 2024).

Berdasarkan hasil penelitian ini, kandungan Zn pada microgreens sawi hijau telah mampu memenuhi kebutuhan harian tubuh, sedangkan kandungan Ca dan sulfur bahkan menunjukkan jumlah yang melebihi kebutuhan harian yang direkomendasikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa microgreens sawi hijau berpotensi dikembangkan sebagai pangan fungsional dan sumber mineral esensial yang mudah dikonsumsi. Namun, konsumsi mineral secara berlebihan tetap perlu diperhatikan karena asupan Zn yang melebihi batas atas dapat mengganggu penyerapan mineral lain dan menyebabkan gangguan pencernaan (Hussain *et al.*, 2022), sedangkan kelebihan Ca dapat meningkatkan risiko hiperkalsemia dan pembentukan batu ginjal (Razzaque dan Wimalawansa, 2025). Konsumsi sulfur dalam jumlah berlebih juga dapat menyebabkan gangguan metabolisme dan iritasi pada saluran pencernaan. Oleh karena itu, konsumsi microgreens tetap perlu disesuaikan dengan kebutuhan harian tubuh agar manfaat kesehatannya dapat diperoleh secara optimal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Terdapat pengaruh nyata jenis media tanam berbeda terhadap bobot segar tanpa akar, bobot kering, kandungan mineral Zinc, kandungan mineral Kalsium, dan kandungan mineral Sulfur pada *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.).
- Jenis media tanah (M0) mampu memberikan hasil terbaik dengan menghasilkan rata-rata tertinggi pada parameter bobot segar sebesar 81,598 gram, rata-rata bobot kering sebesar 5,018 gram, dan rata-rata kandungan mineral kalsium sebesar 5.319,4 mg/100g pada *microgreens* sawi hijau (*Brassica juncea* L.).
- Jenis media perlite (M4) mampu memberikan hasil kandungan mineral Zn tertinggi sebesar 35,4 mg/100g.
- Jenis media rockwool (M3) mampu memberikan hasil kandungan mineral Sulfur tertinggi sebesar 2.837,6 mg/100g.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilaksanakan maka dapat disarankan:

- Penggunaan media tanah dapat direkomendasikan sebagai media tanam yang efektif dalam budidaya *microgreens* sawi hijau karena mampu menghasilkan bobot segar, bobot kering, serta kandungan mineral Ca yang lebih tinggi dibandingkan media tanam lainnya. Selain itu, penggunaan

media tanam perlite disarankan untuk meningkatkan kandungan mineral Zn, sedangkan media tanam rockwool lebih direkomendasikan untuk meningkatkan kandungan S.

- b. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai kombinasi berbagai jenis media tanam guna meningkatkan hasil serta kandungan mineral esensial pada *microgreens* komoditas lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, I. S., Susila, A. D., & Purnamawati, H. (2024). Pengaruh kandungan P dan K tanah terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman tomat (*Lycopersicon esculentum*) pada tanah andisol. *Buletin Agrohorti*, 12(3), 327–335. <https://doi.org/10.29244/agrob.v12i3.54543>
- Angelopoulos, P. M. (2024). Insights in the physicochemical and mechanical properties and characterization methodology of perlites. *MDPI Minerals*, 14(113). <https://doi.org/10.3390/min14010113%0AAcademic>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Indikator Pertanian 2023*. 37, 1–9.
- Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of substrate flow rate on nutrient uptake and use efficiency in hydroponically grown swiss chard (*Beta vulgaris* L. ssp. cicla ‘Seiyou Shirokuki’). *MDPI Agronomy*, 11(2050). <https://doi.org/10.3390/agronomy11102050>
- Bashariah, B., Mbusango, A., Ningsi, R., & Tola, K. S. K. (2024). Microgreens dan Senyawa yang terkandung didalamnya: literatur review. *Indonesia Berdaya*, 5(2), 695–704.
- Binder, G. (2020). The College of AGNR Study Nutrient-Packed Microgreens. *University of Maryland*. <https://agnr.umd.edu/news/mighty-microgreens/>
- Broadley, M. R., Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2017). Zinc in plants. *Journal Compilation New Phytologist*, 677–702.
- Chaitra, K., Sankar, M., Sreelatha, U., Anupama, T. V., & Prameela, P. (2024). Optimizing soilless growing media for compact growth of *Philodendron xanadu*. *Journal of Applied Horticulture*, 26(3), 314–318. <https://doi.org/10.37855/jah.2024.v26i03.60>
- Charloq, C., Sitepu, R. K., & Sari, V. I. (2025). Optimizing the growth of microgreen broccoli (*Brassica oleracea*) using a combination of top soil and rice husk charcoal. *Jurnal Agroteknologi*, 13(1), 1–8. <https://doi.org/10.32734/ja.v13i1.19879>
- Czerniawski, P., & Bednarek, P. (2018). Glutathione S-Transferases in the biosynthesis of Sulfur-Containing secondary metabolites in Brassicaceae plants. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01639>
- Djajadi, Heliyanto, B., & Hidayah, N. (2020). Pengaruh media tanam dan frekuensi pemberian air terhadap sifat fisik, kimia dan biologi tanah serta pertumbuhan jarak pagar. *Jurnal Littri*, 16(2), 64–69.
- EFSA. (2014a). *Scientific Opinion on Dietary Reference Values for calcium*. 1–82. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.20YY.NNNN>
- EFSA. (2014b). *Scientific Opinion on Dietary Reference Values for zinc*. 1–74. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2014.NNNN>
- FAO. (2022). *Human Induced Land Degradation*. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bc8810ae-2a13-4cfe-b019-339158c7e608/content/src/html/chapter-1-2.html?utm_source.com
- Fuente, B. de la, Garcia, G. L., Manez, V., Alegria, A., Barbera, R., & Cilla, A. (2019). Evaluation of the bioaccessibility of antioxidant bioactive compounds and minerals of four genotypes of brassicaceae

- microgreens. *MDPI Foods*, 8(350), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/foods8070250>
- Gioia, F. Di, Hong, J. C., Pisani, C., Petropoulos, S. A., Bai, J., & Roskopf, E. N. (2023). Yield performance, mineral profile, and nitrate content in a selection of seventeen microgreen species. *Frontiers in Plant Science*, 1–14.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1220691>
- Gunapala, R., Gangahagedara, R., Wanasinghe, W. C. S., Samaraweera, U., Gamage, A., Rathnayaka, C., & Hameed, Z. (2025). Urban agriculture : A strategic pathway to building resilience and ensuring sustainable food security in cities. *Farming System*, 3(3), 100150.
<https://doi.org/10.1016/j.farsys.2025.100150>
- Hussain, S., Khan, M., Majid, T., Sheikh, M., Mumtaz, M. Z., Chohan, T. A., Shamim, S., & Liu, Y. (2022). Zinc essentiality, toxicity, and its bacterial bioremediation : a comprehensive insight. *Frontiers in Microbiology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.900740>
- Islami, S. A., Budiarti, T., Donatha, A., & Makalew, N. (2025). Kajian implementasi dan manfaat pertanian perkotaan pada kelompok tani di Kota Bogor. *Jurnal Penyuluhan*, 21(1), 74–90.
<https://doi.org/10.25015/21202561348>
- Kopriva, S., Malagoli, M., & Takahashi, H. (2019). Sulfur nutrition : impacts on plant development , metabolism , and stress responses. *Journal of Experimental Botany*, 70(16), 4069–4073.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erz319>
- Lee, K., Lee, D., Lim, C., Lee, S., Yang, J., & Chung, D. (2022). Water retention characteristics of various sizes of expanded perlite produced from two different types of rocks. *MDPI Horticulturae*, 8(805), 1–12.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae8090805>
- Lemma, D. T., & Banjaw, D. T. (2022). Influence of growing media characteristics on water and nutrient management of cutting plants. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 10(02), 28–35.
<https://doi.org/10.20546/ijcrar.2022.1002.003>
- Lestari, Pujiwati, I., Karyawati, A. S., & Demirkiran, A. R. (2026). Alternative growing media to increase growth performance and quality of amaranthus, broccoli, watercress, alfalfa, mung bean, and pea shoot microgreens. *Journal of Ecological Engineering*, 27(3), 288–296.
<https://doi.org/10.12911/22998993/213649>
- Li, T., Lalk, G. T., Arthur, J. D., Johnson, M. H., & Bi, G. (2021). Shoot production and mineral nutrients of five microgreens as affected by hydroponic substrate type and post-emergent fertilization. *Horticulturae*, 7(6), 129.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7060129>
- Mabizela, G. S., Slabbert, M. M., & Bester, C. (2017). The effect of rooting media, plant growth regulators and clone on rooting potential of honeybush (*Cyclopia subternata*) stem cuttings at different planting dates. *South African Journal of Botany*, 110, 75–79.
<https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.02.200>
- Magnucka, G., Kulczycki, G., & Oksi, M. P. (2023). The effect of various forms of sulfur on soil organic matter fractions and microorganisms in a pot experiment with perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *MDPI Plants*, 12(2649), 1–15.
<https://doi.org/10.3390/plants12142649>
- Nabila, M., & Anandaputri, K. A. (2023). Dampak Pengalihan fungsi lahan pertanian Indonesia. *Jurnal Ekonomi dan Pendidikan*, 20(2), 93–97.
- Neto, P. C. de A., Sales, L. P. B., Oliveira, P. K. S., Silva, I. C. da, Barros, I. M. da S., Nóbrega, A. F. da, & Carneiro, A. M. P. (2023). Expanded vermiculite: a short review about its production, characteristics, and effects on the properties of lightweight mortars. *MDPI Buildings*, 13(3).
<https://doi.org/10.3390/buildings13030823>
- Panjaitan, T. C. D. (2022). *Budidaya*

- Microgreens Tanaman Sawi (Brassica Juncea L.) Menggunakan Komposisi Media Tanam*. [Skripsi]. Universitas Sriwijaya.
- Passarelli, S., Ree, C. M., Shepon, A., Beal, T., Batis, C., & Golden, C. D. (2024). Global estimation of dietary micronutrient inadequacies: a modelling analysis. *The Lancet Global Health*, 12(10), 1–17. [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(24\)00276-6](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(24)00276-6)
- Pratio, G. A., Rohmah, S. N., Akbarsyah, M. A., & Endro, A. (2024). Konsep urban farming pada kota tanpa lahan pertanian. *Jurnal Bengawan Solo*, 3(2), 122–141. <https://doi.org/doi.org/10.58684/jbs.v3i2.78private>
- Purba, T., Ningsih, H., Purwaningsih, Junaedi, A. S., Gunawan, B., Junairiah, Firgiyanto, R., & Arsi. (2021). *Tanah dan Nutrisi Tanaman*. Yayasan Kita Menulis.
- Rajaseger, G., Chan, K. L., Tan, K. Y., Ramasamy, S., Khin, M. C., & Amaladoss, A. (2023). Hydroponics : current trends in sustainable crop production. *Journal Bioinformation*, 19(9), 925–938. <https://doi.org/10.6026/97320630019925>
- Rajiman, & Megawati, S. (2022). viabilitas dan vigor berbagai varietas true shallot seed dengan perendaman jenis zat pengatur tumbuh (ZPT) alami. *Agritech*, 24(2).
- Razzaque, M. S., & Wimalawansa, S. J. (2025). Minerals and human health : from deficiency to toxicity. *MDPI Nutrients*, 17(454), 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/nu17030454>
- Salamah, T. S. (2020). *Kandungan Unsur Hara Makro pada Tanah Perkebunan Kelapa Sawit yang telah Menghasilkan di Desa Kota Baru Kecamatan Kunto Darussalam Kabupaten Rokan Hulu Riau*. [Skripsi]. UIN SUSKA RIAU.
- Salim, M. A. (2021). *Budidaya Microgreens: Sayuran Kecil Kaya Nutrisi dan Menyehatkan*. Yayasan Lembaga Pendidikan dan Pelatihan Multiliterasi.
- Samtiya, M., Aluko, R. E., & Dhewa, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies : an overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5, 1–14.
- Sanjesti, W., & Silviana, A. (2025). Dampak alih fungsi lahan pertanian menjadi lahan kering. *Jurnal Ilmu Hukum*, 9(2), 420–435.
- Saputra, D. I., Widiastuti, M. L., Azizah, E., & Samaullah, M. Y. (2024). Uji Viabilitas dan vigor benih beberapa varietas sorgum (*Sorghum bicolor* L.) dengan umur simpan yang berbeda. *Agroplasma*, 11(1), 119–127.
- Sari, Y., Ade, P., & Yulis, R. (2023). Tannin determination in young coconut coir (*Cocos nucifera* L.) by FTIR and UV-Vis spectroscopy. *Jurnal Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam LLDikti Wilayah I*, 1(1), 8–13.
- Savaliya, D., Patel, M., Prajapati, V., Tandel, B., & Bhatt, D. S. (2025). Effect of growing media on growth and performance of pothos (*Scindapsus aureus* L.) under modular biowall system. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 9(10), 2121–2124.
- Savarino, G., Corsello, A., & Corsello, G. (2021). Macronutrient balance and micronutrient amounts through growth and development. *Italian Journal of Pediatrics*, 1–14.
- Sazali, N., Syafiq, M., Mohd, M., Abid, A., & Radzi, M. (2024). A brief discovery on the evaluation of rock wool and zeolite in a hydroponic drip system for the cultivation of lettuce (*Lactuca sativa*). *International Journal of Technical Vocational and Engineering Technology*, 5(2), 39–46.
- Shafira, W., Akbar, A. A., & Saziati, O. (2021). Penggunaan cocopeat sebagai pengganti topsoil dalam upaya perbaikan kualitas lingkungan di lahan pascatambang di desa. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(2), 432–443. <https://doi.org/10.14710/jil.19.2.432-443>
- Sisriana, S., Suryani, S., & Sholihah, S. M. (2021). Pengaruh berbagai media tanam terhadap pertumbuhan dan kadar pigmen microgreens selada. *Jurnal Ilmiah Respati*, 12(2), 163–176. <https://doi.org/10.52643/jir.v12i2.1886>

- Sutinah, Syah, B., & Sugiono, D. (2023). Pengaruh jenis media tanam dan jenis nutrisi terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman seledri (*Apium graveolens* L.) varietas amigo pada hidroponik sistem wick. *Jurnal Agroplasma*, 10(2), 481–492.
- Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development* (Sixth). Sinauer Associates, Inc.
- Wdowiak, A., Podgórska, A., & Szal, B. (2024). Calcium in plants: an important element of cell physiology and structure, signaling, and stress responses. *Acta Physiologiae Plantarum*, 46(12), 1–20.
- <https://doi.org/10.1007/s11738-024-03733-w>
- Xiong, J., Tian, Y., Wang, J., Liu, W., Chen, Q., & Pascale, S. De. (2017). Comparison of coconut coir, rockwool, and peat cultivations for tomato production: nutrient balance, plant growth and fruit quality. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01327>
- Yap, Z. S., Khalid, N. H. A., Haron, Z., Mohamed, A., & Tahir, M. (2025). Waste mineral wool and its opportunities—a review. *MDPI Materials*, 14(5777). <https://doi.org/s://doi.org/10.3390/mal4195777>