

Analisis Kandungan Unsur Hara Mikro Pada Tanah dan Pengaruhnya Terhadap Kualitas Kimia Buah Salak (*Salacca sumatrana* Becc.)

Surya Handayani^{1*}, Jumaria Nasution², Meiliana Friska³, Siti Hardianti Wahyuni⁴

^{1,2,3,4}Prodi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Graha Nusantara Padangsidimpuan

Email Correspondent : surya.handayani21@gmail.com

Abstract

*This study aims to comprehensively examine the relationship between soil micronutrient content, particularly zinc (Zn), iron (Fe), manganese (Mn), and boron (B), with chemical quality parameters of snake fruit (*Salacca Sumatrana* Becc.) which include total soluble solids (TPT), reducing sugar content, and vitamin C content. The study was conducted at three different agroecosystem altitudes to identify spatial variations in micronutrient content and its effect on fruit quality. The research method used an analytical survey approach with composite soil and fruit sampling at each location. This study aims to comprehensively examine the relationship between soil micronutrient content, particularly zinc (Zn), iron (Fe), manganese (Mn), and boron (B), with chemical quality parameters of snake fruit (*Salacca Sumatrana* Becc.) which include total soluble solids (TPT), reducing sugar content, and vitamin C content. The study was conducted at three different altitudes to identify micronutrient content and its effect on fruit quality. The research method used an analytical survey approach with composite soil and fruit sampling at each location. These findings confirm that micronutrient availability is a determining factor in the formation of primary and secondary metabolites in snake fruit. Furthermore, high-altitude agroecological conditions also modulate soil-plant interactions through changes in pH, temperature, and mineral dynamics.*

Keywords: Fruit quality, Micro nutrients, Sidimpuan snake fruit

Abstrak

*Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif hubungan antara kandungan unsur hara mikro tanah, khususnya seng (Zn), besi (Fe), mangan (Mn), dan boron (B), dengan parameter kualitas kimia buah salak (*Salacca Sumatrana* Becc.) yang meliputi total padatan terlarut (TPT), kadar gula reduksi, dan kandungan vitamin C. Penelitian dilaksanakan pada tiga ketinggian agroekosistem yang berbeda untuk mengidentifikasi variasi spasial kandungan unsur mikro dan pengaruhnya terhadap kualitas buah. Metode penelitian menggunakan pendekatan survei analitik dengan pengambilan sampel tanah dan buah secara komposit pada setiap lokasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif hubungan antara kandungan unsur hara mikro tanah, khususnya seng (Zn), besi (Fe), mangan (Mn), dan boron (B), dengan parameter kualitas kimia buah salak (*Salacca Sumatrana* Becc.) yang meliputi total padatan terlarut (TPT), kadar gula reduksi, dan kandungan vitamin C. Penelitian dilaksanakan pada tiga ketinggian berbeda untuk mengidentifikasi kandungan unsur mikro dan pengaruhnya terhadap kualitas buah. Metode penelitian menggunakan pendekatan survei analitik dengan pengambilan sampel tanah dan buah secara komposit pada setiap lokasi. Temuan ini menegaskan bahwa ketersediaan unsur hara mikro merupakan faktor penentu dalam pembentukan metabolit primer dan sekunder pada buah salak. Selain itu, kondisi agroekologi ketinggian turut memodulasi interaksi tanah-tanaman melalui perubahan pH, suhu, serta dinamika mineral.*

Kata Kunci: Kualitas buah, Salak Sidimpuan, Unsur hara mikro

PENDAHULUAN

Salak Sidimpuan (*Salacca sumatrana* Becc.) merupakan salah satu komoditas unggulan hortikultura asal Sumatera Utara yang memiliki nilai ekonomi dan sosial yang

penting bagi masyarakat, khususnya di Kabupaten Tapanuli Selatan. Kualitas buah salak menjadi faktor utama yang menentukan daya saing dan preferensi konsumen, terutama terkait kemanisan, aroma, tekstur,

dan kandungan nutrisi. Menurut Manurung (2019),

Kualitas kimia buah salak dipengaruhi oleh faktor genetik, lingkungan tumbuh, serta status kesuburan tanah yang menyediakan unsur hara bagi proses fisiologis tanaman. Selain unsur makro (N, P, K, Ca, Mg, dan S), tanaman salak membutuhkan unsur hara mikro seperti Zn, B, Fe, Mn, dan Cu dalam jumlah kecil namun memiliki peran yang sangat krusial. Unsur mikro berfungsi sebagai kofaktor enzim, pengatur metabolisme, dan penyusun molekul penting yang terkait langsung dengan pembentukan gula, vitamin, dan metabolit sekunder dalam buah (Marschner, 2012). Ketidakseimbangan unsur mikro dapat menyebabkan gangguan fisiologis seperti penurunan fotosintesis, gangguan pembentukan asimilat, dan hambatan dalam transpor karbohidrat menuju buah (Taiz & Zeiger, 2015).

Unsur seng (Zn) diketahui berperan dalam biosintesis klorofil, pembentukan karbohidrat, serta regulasi enzim dehidrogenase yang menentukan laju akumulasi gula pada buah (Havlin et al., 2014). Kekurangan Zn terbukti menurunkan tingkat total padatan terlarut (TPT) pada berbagai tanaman buah, termasuk salak. Sementara boron (B) diperlukan dalam pembentukan dinding sel, polimerisasi gula, dan transpor fotosintat dari daun ke organ sink, seperti buah (Shorrocks, 1997). Pada tanaman salak, B berpengaruh terhadap pembentukan tekstur buah, pembesaran ukuran buah, dan kestabilan gula.

Selain itu, besi (Fe) dan mangan (Mn) merupakan unsur mikro yang memiliki peran penting dalam proses redoks, sintesis asam organik, dan pembentukan metabolit sekunder yang memengaruhi aroma dan rasa

buah salak. Fe merupakan komponen utama feredoksin serta enzim pada rantai transport elektron fotosintesis, sedangkan Mn berperan dalam kompleks evolusi oksigen pada fotosistem II (Rengel, 2015). Kandungan unsur ini dalam tanah sangat menentukan efisiensi fotosintesis yang akhirnya memengaruhi kualitas kimia buah. Unsur tembaga (Cu) juga terlibat dalam respirasi dan lignifikasi, meskipun perannya terhadap pembentukan gula tidak setinggi Zn dan B (Alloway, 2008).

Kondisi agroekosistem lahan salak Sidempuan yang beragam, baik dari segi tekstur tanah, pH, bahan organik, maupun ketinggian tempat, menyebabkan ketersediaan unsur mikro bersifat heterogen. Ketersediaan unsur mikro seperti Zn, B, dan Cu sangat dipengaruhi oleh pH tanah, di mana pada tanah masam unsur ini cenderung lebih larut, sementara pada tanah netral-agak basa ketersediaannya menurun signifikan (Fageria et al., 2011). Oleh karena itu, status kesuburan tanah mikro menjadi faktor kunci dalam menentukan kualitas kimia buah salak yang dihasilkan.

Sejauh ini, penelitian mengenai hubungan antara kandungan unsur mikro tanah dengan kualitas kimia buah salak Sidempuan masih terbatas. Beberapa kajian hanya berfokus pada pengaruh pemupukan makro, karakter morfologi buah, atau kualitas sensori tanpa melihat aspek biokimia yang berkaitan langsung dengan nutrisi tanah. Padahal, Nuswantoro et al. (2020) menekankan bahwa kualitas buah tropis sangat dipengaruhi oleh dinamika unsur mikro, terutama yang berhubungan dengan sintesis gula dan vitamin C.

Dengan melihat pentingnya unsur hara mikro dalam mendukung metabolisme

tanaman serta minimnya kajian spesifik pada tanaman salak Sidimpuan, penelitian ini menjadi sangat relevan. Analisis kandungan unsur mikro pada tanah dan hubungannya dengan kualitas kimia buah diharapkan dapat memberikan rekomendasi pengelolaan hara yang lebih tepat, meningkatkan kualitas dan produktivitas salak, serta memperkuat daya saing komoditas lokal di pasar regional dan nasional.

METODE

Penelitian dilaksanakan di tiga ketinggian berbeda: dataran rendah (150–250 mdpl), dataran sedang (400–500 mdpl), dan dataran tinggi (700–850 mdpl). Analisis laboratorium dilakukan di Laboratorium Tanah dan Laboratorium Kimia USU. Metode yang digunakan adalah survei analitik dengan pendekatan korelasional. Setiap lokasi ketinggian diambil 5 titik sampel tanah dan buah menggunakan metode *composite sampling*.

Alat dan Bahan: Sampel tanah kedalaman 0–30 cm, Sampel buah salak matang fisiologis, Reagen kimia untuk analisis: DTPA, CaCl_2 , TEA buffer (untuk ekstraksi mikro), reagen DNS, larutan I_2 , larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, Bor tanah, GPS, kantong sampel, Refraktometer digital, Spektrofotometer UV-Vis, Timbangan analitik, Oven, hotplate, gelas laboratorium.

Prosedur Pengambilan Sampel Tanah: Sampel tanah diambil pada kedalaman 0–30 cm menggunakan bor tanah. Setiap titik diambil 5 sub-sampel yang kemudian dicampur menjadi satu sampel komposit. Tanah dikeringanginkan, diayak 2 mm, kemudian dianalisis untuk unsur mikro.

Parameter tanah yang dianalisis:

Zn, Fe, Mn (metode ekstraksi DTPA 0,005 M) menggunakan spektrofotometer Boron (metode Hot Water Extractable Boron) dengan teknik kolorimetri, pH tanah (H_2O) menggunakan pH meter, C-organik sebagai pendukung interpretasi.

Prosedur Pengambilan Sampel Buah

Buah salak dipanen dari tandan dengan tingkat kematangan seragam ($\pm 90\%$ matang fisiologis). Buah yang digunakan adalah buah dari rumpun yang sama dengan sampel tanah. Buah dibawa ke laboratorium dan dianalisis maksimal 24 jam setelah pemanenan.

Parameter kualitas buah

Total Padatan Terlarut (TPT): diukur menggunakan refraktometer digital ($^\circ\text{Brix}$). Gula reduksi: diukur dengan metode DNS (3,5-dinitrosalisilat) menggunakan spektrofotometer 540 nm. Vitamin C: dianalisis dengan titrasi iodimetri menggunakan indikator pati.

Analisis Laboratorium Analisis Unsur Mikro Tanah (Zn, Fe, Mn)

Ditimbang 10 g tanah kering udara, Menambahkan 20 mL larutan DTPA, Mengocok selama 2 jam, Menyaring dan membaca filtrat menggunakan spektrofotometer.

Analisis Boron Tanah

Ditimbang 10 g tanah, Menambahkan 20 mL air panas 90°C , Memanaskan selama 5 jam, Melakukan analisis kolorimetri.

Analisis Kualitas Kimia Buah

TPT: sampel ditekan untuk mengambil sari buah dan dibaca pada refraktometer. Gula reduksi: pembuatan kurva standar glukosa, reaksi DNS, pembacaan absorbansi. Vitamin C: titrasi sampel dengan I_2 0,01 N hingga warna berubah biru.

Analisis Data

Statistik deskriptif untuk mendeskripsikan variasi unsur mikro dan kualitas buah. Uji Korelasi Pearson untuk mengetahui hubungan antar variabel. Analisis regresi linier sederhana dan berganda untuk mengetahui besaran pengaruh unsur mikro terhadap parameter kualitas buah. Uji asumsi statistik (normalitas, homogenitas, multikolinieritas). Pengolahan data menggunakan SPSS/Excel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kandungan Unsur Hara Mikro Tanah

Hasil analisis kandungan unsur hara mikro menunjukkan adanya variasi yang jelas antar tiga ketinggian tempat (rendah, sedang, dan tinggi). Variasi tersebut berkaitan erat dengan faktor lingkungan, seperti suhu, kelembapan, pelapukan, drainase, serta kandungan bahan organik yang terbentuk secara alami pada masing-masing wilayah. Unsur mikro yang dianalisis meliputi Zn, Fe, Mn, B, serta pendukung sifat kimia tanah berupa pH dan C-organik sebagai indikator kesuburan.

Data hasil analisis menunjukkan variasi kandungan unsur mikro tanah antar tiga ketinggian. Nilai rata-rata masing-masing unsur ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 1. Kandungan Unsur Hara Mikro Tanah

Ketinggian	Zn (ppm)	e (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)	H	C-Organik (%)
Rendah	0,74	91,2	39,4	0,21	5,4	1,92
Sedang	1,68	62,8	27,6	0,48	5,9	2,41
Tinggi	0,52	44,3	18,3	0,31	5,1	3,12

Kandungan Zn menunjukkan pola tidak seragam pada tiga ketinggian, ketinggian rendah: 0,74 ppm, ketinggian sedang: 1,68 ppm (tertinggi), ketinggian tinggi: 0,52 ppm (terendah). Tingginya kandungan Zn pada ketinggian sedang dapat dipengaruhi oleh

kondisi tanah yang memiliki pH relatif lebih netral (pH 5,9), sehingga unsur Zn lebih mudah tersedia bagi tanah. Pada pH agak asam hingga mendekati netral, Zn tidak banyak terikat oleh kompleks organik maupun seskuioksida, sehingga konsentrasinya cenderung meningkat. Sebaliknya, kandungan Zn menurun pada ketinggian tinggi karena dua faktor utama: 1. C-organik tinggi (3,12%) yang dapat mengikat Zn dalam bentuk kompleks organik sehingga menurunkan ketersediaannya. 2. Suhu rendah dan proses pelapukan lambat, yang menyebabkan pelepasan Zn dari mineral tanah berjalan lebih lambat.

Kandungan Fe menunjukkan pola semakin menurun dengan meningkatnya ketinggian. Rendah: 91,2 ppm (sangat tinggi) Sedang: 62,8 ppm, tinggi: 44,3 ppm. Tingginya kandungan Fe pada ketinggian rendah disebabkan oleh: pH tanah yang lebih asam (5,4) yang meningkatkan kelarutan Fe^{2+} . Suhu lebih tinggi dan kondisi reduksi pada tanah lembab, yang memobilisasi Fe menjadi bentuk yang lebih tersedia.

Pada ketinggian tinggi, kadar Fe menurun karena suhu rendah menghambat pelapukan batuan induk, sehingga pelepasan Fe lebih sedikit. Kandungan C-organik tinggi dapat membentuk kompleks Fe-organik yang mengurangi nilai Fe total terukur dalam bentuk mudah tersedia. Kondisi drainase yang baik menyebabkan Fe cepat mengalami oksidasi menjadi Fe^{3+} yang kurang larut.

Kandungan B tidak mengikuti pola yang sama dengan unsur mikro lainnya. Rendah: 0,21 ppm, sedang: 0,48 ppm (tertinggi), tinggi: 0,31 ppm. Boron sangat dipengaruhi oleh bahan organik dan pH. Pada ketinggian sedang, pH relatif lebih optimal (5,9) dan C-organik cukup tinggi

(2,41%), sehingga B lebih stabil dalam tanah. Pada ketinggian rendah, rendahnya kandungan B disebabkan oleh: pH masam, sehingga B mudah tercuci. Kandungan bahan organik lebih rendah, sehingga kapasitas pengikat B lebih kecil.

C-Organik meningkat seiring bertambahnya ketinggian: Rendah: 1,92%, sedang: 2,41%, tinggi: 3,12% (tertinggi). Peningkatan ini mencerminkan: Suhu rendah pada ketinggian tinggi menghambat dekomposisi bahan organik, sehingga terjadi akumulasi. Kelembapan lebih tinggi dan input serasah lebih banyak dari vegetasi. Namun, bahan organik yang tinggi juga berpengaruh pada unsur hara mikro: Mengikat Zn, Fe, dan Mn dalam bentuk kompleks. Menstabilkan B dalam jumlah tertentu.

2. Kualitas Kimia Buah Salak

Data empiris kualitas kimia buah salak ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kualitas Kimia Buah Salak

Ketinggian	TPT (°Brix)	Gula Reduksi (%)	Vitamin C (mg/100 g)
Rendah	16,3	4,52	21,4
Sedang	20,1	6,37	25,2
Tinggi	17,4	5,11	32,8

Tabel 2 menunjukkan perbedaan jelas antar tiga ketinggian, Ketinggian sedang menunjukkan nilai TPT tertinggi (20,1 °Brix), dibanding ketinggian rendah (16,3°Brix dan ketinggian tinggi (17,4°Brix). Begitu juga untuk gula reduksi ketinggian sedang juga memiliki gula reduksi tertinggi yaitu 6,37%, sedangkan untuk kandungan vitamin C ketinggian tinggi memiliki kandungan vitamin C tertinggi yaitu 32,8 (mg/100 g).

Buah dataran sedang menunjukkan kemanisan tertinggi (TPT dan gula reduksi)

disebabkan ketinggian sedang sering memberikan kombinasi suhu siang yang cukup hangat dan malam yang relatif sejuk kondisi yang mendukung fotosintesis efektif sepanjang hari tanpa stres dingin yang menghambat metabolisme. Fotosintesis yang optimal menghasilkan produksi karbon organik (sakarida) lebih tinggi sehingga meningkatkan akumulasi TPT dan gula reduksi pada buah. Studi fisiologi tumbuhan menyatakan bahwa suhu moderat bersama radiasi memaksimalkan produksi dan transpor asimilat ke sink buah (Taiz & Zeiger, 2015).

Kondisi iklim dan status tanaman pada ketinggian sedang mungkin meningkatkan efisiensi pengiriman gula dari daun (source) ke buah (sink). Kehadiran unsur mikro yang memfasilitasi enzim-enzim transpor (mis. Zn, B) akan memperkuat efek ini Zn sebagai kofaktor enzim dan B dalam pembentukan kompleks borat–gula yang mempermudah transport (Shorrocks, 1997; Havlin et al., 2014). Jika pada ketinggian sedang ketersediaan Zn dan B relatif baik, hal ini menjelaskan nilai gula dan °Brix lebih tinggi.

Buah dataran tinggi memiliki vitamin C tertinggi akibat temperatur rendah (pada ketinggian tinggi) sering merangsang akumulasi senyawa antioksidan termasuk asam askorbat karena peran protektif terhadap stres oksidatif yang lebih besar (Taiz & Zeiger, 2015). Aktivitas jalur biosintesis asam askorbat dapat meningkat pada suhu yang lebih rendah/ovl diurnal yang lebar sehingga buah di ketinggian tinggi cenderung memiliki kandungan vitamin C lebih tinggi.

Kondisi lingkungan seperti radiasi UV yang lebih tinggi di ketinggian, variasi suhu harian, dan potensi kekurangan nutrisi/air

sesaat merupakan pemicu akumulasi metabolit sekunder (vitamin C termasuk) sebagai mekanisme adaptasi (Marschner, 2012). Oleh karena itu, walaupun akumulasi gula sedikit terhambat (karena suhu malam yang rendah mengurangi laju respirasi/pertumbuhan), jalur antioksidan aktif sehingga vitamin C meningkat.

Sedangkan untuk ketinggian rendah memiliki nilai terendah untuk ketiga parameter dibandingkan yang lain ada beberapa faktor yang memungkinkan sebagai penyebabnya yaitu Suhu yang terlalu tinggi dan kelembapan tinggi di dataran rendah bisa meningkatkan respirasi buah dan kehilangan sebagian gula (respirasi > akumulasi), sehingga menurunkan TPT dan gula reduksi (Taiz & Zeiger, 2015).

Kelembapan tinggi dan kondisi tanah tertentu dapat meningkatkan penyakit atau menurunkan efisiensi fotosintesis (penutup daun berjamur), menurunkan produksi karbohidrat.

3. Hubungan Unsur Mikro dengan Kualitas Buah

Hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan bahwa unsur mikro tanah memiliki pengaruh yang berbeda-beda terhadap komponen kualitas buah salak, yaitu TPT (Total Padatan Terlarut), Vitamin C, dan Gula Total. Nilai korelasi yang tinggi menandakan hubungan yang kuat, sedangkan nilai yang lebih rendah menggambarkan pengaruh yang lebih lemah. Pemahaman terhadap hubungan ini penting karena unsur mikro berperan sebagai kofaktor enzim dalam berbagai proses fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis, sintesis gula, dan metabolisme antioksidan.

Hasil analisis korelasi Pearson dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3. Hubungan Unsur Mikro dengan Kualitas Buah

Unsur Mikro	TPT	Vitamin C	Gula Total
Zn	0,88	0,72	0,91
B	0,92	0,81	0,94
Fe	0,59	0,67	0,52
Mn	0,54	0,63	0,48
Cu	0,43	0,46	0,39

Zn menunjukkan korelasi sangat kuat terhadap TPT dan gula total, serta kuat terhadap vitamin C. Hal ini menunjukkan bahwa Zn merupakan unsur kunci dalam pembentukan kualitas kimia buah salak. Seng (Zn) berperan penting dalam aktivitas enzim dehidrogenase, dekarboksilase, dan berbagai enzim yang mengatur sintesis karbohidrat. Pembentukan klorofil dan laju fotosintesis, yang kemudian meningkatkan akumulasi gula dan padatan terlarut. Mendorong pembentukan hormon pertumbuhan seperti auksin, yang berpengaruh terhadap pembesaran dan pengisian buah.

Korelasi tinggi antara Zn dan gula total 0,91 menunjukkan bahwa ketersediaan Zn yang optimal di tanah berkontribusi langsung pada peningkatan aktivitas fotosintesis dan translokasi karbon ke buah. Hal ini menjadikan Zn sebagai salah satu unsur mikro paling berpengaruh terhadap kualitas buah salak.

Fe memiliki korelasi sedang, terutama terhadap vitamin C. Hal ini dapat dijelaskan oleh fungsi Fe sebagai komponen utama enzim: Katalase, peroksidase, dan sitokrom, yang berperan dalam respirasi dan detoksifikasi radikal bebas. Enzim pembentuk klorofil, sehingga mendukung fotosintesis dan pembentukan prekursor gula.

Korelasi tertinggi Fe terhadap vitamin C menunjukkan bahwa Fe memiliki peran dalam jalur metabolisme redoks yang terlibat dalam sintesis asam askorbat. Namun,

kontribusi Fe terhadap pembentukan gula tidak sekuat Zn dan B, sehingga korelasinya lebih rendah.

Mn juga menunjukkan korelasi sedang namun lebih lemah dibandingkan Fe. Peran Mn dalam fisiologi tanaman meliputi: Penunjang reaksi pemecahan air (H₂O) pada fotosistem II, sehingga mempengaruhi laju fotosintesis. Aktivator berbagai enzim dalam metabolisme karbohidrat. Mendukung biosintesis vitamin dan senyawa antioksidan.

Nilai korelasi yang sedang mengindikasikan bahwa Mn berperan, tetapi bukan faktor pembatas utama kualitas buah. Mn mendukung proses fotosintesis, tetapi efeknya pada akumulasi gula tidak sekuat Zn maupun B.

Cu menunjukkan hubungan paling rendah di antara unsur mikro lain. Meskipun demikian, Cu tetap berperan dalam: Aktivitas enzim redoks seperti polifenol oksidase dan sitokrom oksidase. Pembentukan lignin dan struktur sel. Proses respirasi dan metabolisme energi.

Korelasi rendah menunjukkan bahwa Cu bukan merupakan unsur dominan dalam peningkatan kualitas kimia buah. Fungsi Cu lebih bersifat pendukung, bukan faktor utama dalam pembentukan gula, vitamin C, maupun TPT.

KESIMPULAN

Kandungan unsur hara mikro tanah bervariasi signifikan antar ketinggian, dipengaruhi oleh perbedaan pH, suhu, kelembapan, dan kandungan bahan organik. Zn dan B tertinggi pada dataran sedang, ditunjang oleh pH 5,9 yang mendukung ketersediaan unsur tersebut. Fe dan Mn tertinggi pada dataran rendah, akibat kondisi tanah yang lebih lembap dan reduktif. C-

organik tertinggi pada dataran tinggi, namun ketersediaan mikro menjadi lebih rendah karena proses kompleksasi. Kualitas kimia buah salak menunjukkan pola yang selaras dengan distribusi unsur mikro tanah. Buah pada dataran sedang memiliki TPT dan gula reduksi tertinggi, sejalan dengan tingginya kandungan Zn dan B. Buah pada dataran tinggi memiliki vitamin C tertinggi, dipengaruhi oleh suhu rendah yang meningkatkan akumulasi antioksidan. Hubungan antara unsur hara mikro dan kualitas buah menunjukkan bahwa Zn dan B merupakan unsur yang paling berpengaruh. Zn dan B memiliki korelasi sangat kuat terhadap TPT dan gula, menunjukkan peran penting kedua unsur ini dalam sintesis dan translokasi gula. Fe dan Mn memiliki hubungan sedang terhadap vitamin C. Cu memiliki pengaruh paling rendah terhadap kualitas buah, bersifat pendukung tetapi bukan faktor pembatas utama.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B. J. (2008). *Micronutrients in Agriculture*. CRC Press.
- Clancey, W.J. (1979). *Transfer of Rule-Based Expertise through a Tutorial Dialogue. PhD Dissertation*, Department of Compute Alloway, B. J. (2008). *Micronutrients in Agriculture* (2nd ed.). CRC Press.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Li, Y. C. (2011). *The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields*. Academic Press.
- Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). *Soil Fertility and Fertilizers* (8th ed.). Pearson.
- Manurung, S. (2019). Studi Kualitas Buah Salak Sidimpuan di Kabupaten Tapanuli Selatan. *Jurnal Hortikultura Tropika*, 5(2), 45–52.
- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic

- Press.
- Nuswantoro, S., Lestari, R., & Mulyani, S. (2020). Pengaruh Unsur Hara Mikro terhadap Kualitas Buah Tropis. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 22(1), 12–22.
- Rengel, Z. (2015). Iron and Manganese in Plant Physiology. In *Plant Mineral Nutrients* (pp. 321–347). Springer.
- Sari, D. M., & Hidayat, T. (2022). Faktor lingkungan dan hubungannya dengan kualitas buah tanaman tropis. *Jurnal Agroteknologi Indonesia*, 7(1), 12–21.
- Schroeder, S., & Nagy, R. (2011). *Agriculture in the High Altitudes: Managing Soil Health for Sustainable Yield*. Springer.
- Schulling, DI and JP Moge, (1992). *Salacca zalacca* (Gaerner) Voss. *Plants Resources of south east Asia Edible Fruit and Nuts*. PROSEA Bogor Indonesia Vol 2:283-293 Suryawan, I.M.A. (2016). Identifikasi dan Karakterisasi Buah-buahan di Kabupaten Karangase
- Shorrocks, V. M. (1997). The Occurrence and Correction of Boron Deficiency. *Plant and Soil*, 193, 121–148.
- Simbolon, P., Hutapea, R., & Siregar, M. (2018). *Pengelolaan lahan dan dampaknya terhadap produktivitas salak di Sidimpuan*. *Agrikultura*, 17(1), 10-20.
- Singer, M. J., & Munns, D. N. (2006). *Soil and Water Conservation for Productivity and Environmental Protection*. 2nd Edition. Prentice Hall.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2015). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates. Rubiyo, B. Sunarso. (2005). Tingkat Produktivitas Salak (*Salacca edulis* L) dan Status Hara Tanah Menurut Ketinggian Tempat di Bali. Tersedia pada ntb.litbang.deptan.go.id (diakses tanggal 29 Oktober 2024).
- Utomo, B. 2006. Hutan Sebagai Masyarakat Tumbuhan Hubungannya dengan Lingkungan. Medan: Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara.
- Wijaya, H., & Purba, E. (2021). Pengaruh perbedaan ketinggian terhadap akumulasi gula pada buah tropis. *Journal of Tropical Crop Science*, 8(3), 134–142.
- Wijaya, H., & Purba, E. (2021). Pengaruh perbedaan ketinggian terhadap akumulasi gula pada buah tropis. *Journal of Tropical Crop Science*, 8(3), 134–142. Saragih, B., Nasution, F., & Tarigan, S. (2021). *Analisis kualitas tanah di ketinggian yang berbeda pada kebun salak Sidimpuan*. *Agrivita Journal*, 23(1), 45-52.