

Respon Fisiologi Pasak Bumi (*Eurycoma longifolia*, Jack) di Bawah Cekaman Kekeringan

Physiological Response of Eurycoma longifolia Jack Under Drought Stress

Zulfahmi*, Eko Irnanda, Gusrinaldi, Rita Elfianis, Rosmaina

Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian dan Peternakan, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau, Pekanbaru, Indonesia

*Corresponding author: zulfahmi@uin-suska.ac.id

Received: September 18, 2025; October 24, 2025; Published: December 15, 2025

ABSTRACT

Drought stress is one of the abiotic factors that can inhibit plant growth and yield. This study aims to assess the effect of drought stress on the physiological characteristics of pasak bumi (*Eurycoma longifolia*, Jack). This study used a completely randomized design with two treatments, namely P0 = daily watering (control) and P1 = drought stress for two days. Each treatment consisted of 15 plants; there were 30 sample plants. Parameters observed included chlorophyll content, stomatal conductance, transpiration rate, photosynthetic rate, and Water Use Efficiency. The results of this study showed that drought stress decreased chlorophyll content (5.81%), stomatal conductance (10.34%), transpiration rate (18.73%), photosynthetic rate (3.78%), and water use efficiency (33.127%) compared to control plants. *Eurycoma longifolia* Jack exhibits an adaptive physiological response to drought stress, characterized by moderate reductions in chlorophyll content, photosynthesis rate, and stomatal conductance while maintaining efficient photosynthetic activity. Although water use efficiency declined significantly, the findings indicate effective compensatory mechanisms, positioning this species as a potential candidate for cultivation under water-limited conditions.

Keywords: Drought Stress, Photosynthesis Rate, Stomatal Conductance, Transpiration Rate, Water Use Efficiency

Cite this as: Zulfahmi., Irnanda., Gusrinaldi., Elfianis, R., & Rosmaina. (2025). Respon Fisiologi Pasak Bumi (*Eurycoma longifolia*, Jack) di Bawah Cekaman Kekeringan. *Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi*, 27(2), 103-110. DOI: <http://dx.doi.org/10.20961/agsjpa.v27i2.109126>

PENDAHULUAN

Pasak Bumi (*Eurycoma longifolia* Jack) merupakan tanaman obat endemik Asia Tenggara yang tumbuh secara liar di hutan tropis, meliputi Indonesia, Malaysia, Thailand, Brunei, Vietnam, Laos, dan Kamboja (Rosmaina & Zulfahmi, 2013; Zulfahmi, 2015). Pasak bumi banyak dikonsumsi oleh masyarakat sebagai obat antimalaria, menghambat pertumbuhan sel kanker, melindungi osteroporosis, dan meningkat hormon testosteron (Zulfahmi, 2015; Thu et al., 2018). Permintaan global terhadap Pasak Bumi terus meningkat karena potensi farmakologis yang dikandungnya seperti senyawa kuasinoid dan alkaloid (Tran et al., 2021), sementara di sisi lain populasi alamnya terancam oleh eksploitasi berlebihan dan perubahan iklim (Ismail & Jahan, 2019).

Eksplorasi berlebihan tanaman pasak bumi di alam menyebabkan dampak ekologis yang serius. Hertanto et al. (2023) melaporkan bahwa populasi alami pasak bumi di hutan Sumatra mengalami penurunan hingga 70-80% dalam kurun waktu 10 tahun terakhir. Pemanenan pasak bumi umumnya dilakukan dengan mengambil seluruh bagian tanaman tidak hanya akar saja, sehingga

hal ini menyebabkan degradasi genetik yang sangat besar. Perubahan iklim global juga telah memunculkan ancaman berupa peningkatan frekuensi dan intensitas cekaman kekeringan yang dapat mengganggu kelangsungan hidup tanaman pasak bumi di alam dan yang dibudidayakan, terutama pada fase bibit yang rentan terhadap cekaman, sehingga diduga menjadi salah satu menyebabkan pengurangan jumlah populasi. Upaya konservasi yang terintegrasi dan berkelanjutan diperlukan untuk menyelamatkan spesies penting ini dari ancaman kepunahan. Salah satu strategi yang dilakukan yaitu melalui domestikasi dan budidaya intensif untuk mengurangi tekanan pada populasi alami.

Cekaman kekeringan adalah suatu kondisi dimana tanaman mengalami kekurangan air sehingga menyebabkan terganggunya proses metabolisme dan translokasi unsur hara yang berdampak pada penurunan pertumbuhan dan produksi tanaman (Rosmaina et al., 2018; Rosmaina et al., 2019). Cekaman kekeringan memicu serangkaian respons fisiologis yang saling terkait, dimulai dari penutupan stomata sebagai mekanisme konservasi air, yang kemudian berimbas

pada penurunan laju fotosintesis melalui pembatasan difusi CO₂ (Chaves et al., 2016). Kondisi ini memicu produksi Spesies Oksigen Reaktif (ROS) yang berfungsi ganda yaitu pada tingkat cekaman yang tinggi berpotensi sebagai agen perusak seluler, sekaligus sebagai sinyal yang mengaktifasi jalur biosintesis metabolit sekunder pada tingkat moderat (Hussain et al., 2019). Studi pada tanaman obat seperti *Andrographis paniculata* dan *Catharanthus roseus* cekaman kekeringan menyebabkan penurunan biomassa tetapi diiringi peningkatan signifikan dalam konsentrasi senyawa bioaktif (Ghorbani et al., 2022; García-Caparrós et al., 2019; Tátrai et al., 2016).

Respon tanaman obat terhadap cekaman kering terjadi melalui serangkaian adaptasi fisiologis yang kompleks. Respons awal ditandai dengan penutupan stomata untuk mengurangi transpirasi, yang langsung berdampak pada penurunan laju fotosintesis (Husna et al., 2022). Pada tanaman Sambiloto (*Andrographis paniculata*) cekaman kekeringan 50% kapasitas lapang menyebabkan penurunan konduktansi stomata sebesar 67,8% dan penurunan laju fotosintesis sebesar 45,3% dibandingkan kontrol (Winarto et al., 2023). Selain itu respons biokimia terhadap cekaman kekeringan pada tanaman Meniran (*Phyllanthus niruri*) dapat meningkatkan akumulasi osmolit protektif seperti prolin 3,2 kali lebih tinggi dan peningkatan aktivitas enzim katalase 2,8 kali lipat (Sari et al., 2022). Akumulasi senyawa osmotik ini berfungsi untuk mempertahankan turgor sel dan melindungi struktur seluler dari kerusakan akibat dehidrasi (Ghorbani et al., 2022).

Respon tanaman obat terhadap cekaman kering bersifat dinamis dan tergantung pada spesies, tingkat cekaman, durasi pemaparan, umur tanaman dan fase pertumbuhan tanaman (Sapeta et al., 2013). Optimalisasi kondisi cekaman diperlukan untuk memaksimalkan produksi metabolit sekunder tanpa menyebabkan stres fisiologis yang irreversibel. Sejauh ini belum ada yang melaporkan pengaruh cekaman kekeringan terhadap karakter fisiologis tanaman pasak bumi, sehingga penelitian ini sangat penting dilakukan sebagai basis data fisiologis yang komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk melihat respon fisiologi tanaman Pasak bumi terhadap cekaman kekeringan.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus-September 2021 di Rumah Kasa Fakultas Pertanian dan Peternakan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau (0.4686° N, 101.3513° E). Ketinggian lokasi penelitian adalah 29 m dari permukaan laut. Kondisi suhu selama penelitian di dalam rumah kaca adalah 24,5°C dipagi hari, 31,5°C disiang hari dan 27,5°C disore hari dengan kelembaban ±78%.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanaman pasak bumi (*E. longifolia*, Jack) berumur dua tahun hasil perbanyakan dari biji yang ditanam di polybag dengan ukuran 30 x 30 cm. Media tanam terdiri dari tanah topsoil dan pasir dengan perbandingan (3:1). Alat ukur fisiologi yang digunakan adalah LI-COR 6400XT Portable Photosynthesis System dan klorofil

meter.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap dengan perlakuan yaitu P0 (kontrol) = penyiraman setiap hari dan P1 (tercekam kekeringan) = tanaman dibiarkan tercekam kekeringan selama dua hari. Penetapan batas cekaman kekeringan selama dua hari, karena tanpa pemberian air lebih dari dua hari tanaman pasak bumi mengalami layu yang parah, sehingga dikhawatirkan bersifat irreversible. Masing-masing perlakuan diulang sebanyak 15 tanaman, sehingga terdapat 30 tanaman. Tanaman ditempat secara acak dengan jarak 60 x 60 cm.

Parameter Pengamatan

Parameter yang diamati untuk melihat respon tanaman pasak bumi terhadap cekaman kekeringan adalah kandungan klorofil, konduktansi stoma, laju transpirasi, laju fotosintesis, dan efisiensi penggunaan air. Pengukuran dilakukan pada daun ketiga termuda dari pucuk setiap tanaman dan daun yang telah berkembang sempurna. Pengamatan dilakukan pada jam 9.00-12.00 WIB. Pengamatan laju fotosintesis, konduktansi stomata, dan laju transpirasi diukur menggunakan LI-COR Infra Red Gas Analyzer IRGA, LI-6400XT. Kandungan klorofil diukur dengan menggunakan klorofil meter. Efisiensi penggunaan air (*water use efficiency* = WUE) ditentukan dengan mengukur rasio antara nilai laju fotosintesis dan laju transpirasi (Angraini et al., 2015).

Analisis Data

Data yang diperoleh dilakukan analisis sidik ragam (*analysis of variance*) menggunakan SAS 9.0. Jika terdapat perbedaan signifikan diantara perlakuan, maka dilakukan uji lanjut *Duncan Multiple Range Test* (DMRT) pada taraf 5%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan Klorofil Total

Klorofil merupakan pigmen utama dalam kloroplas yang memiliki peranan sentral dalam proses fotosintesis, yakni menangkap energi cahaya dan mengkonversinya menjadi energi kimia. Kandungan klorofil dalam daun tanaman menunjukkan korelasi positif terhadap laju fotosintesis; semakin tinggi kandungan klorofil, semakin efisien proses fotosintesis berlangsung. Nilai rata-rata kandungan klorofil pada tanaman kontrol dan tercekam kekeringan dapat dilihat pada Gambar 1. Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa kandungan klorofil pada perlakuan cekaman kering dengan tanaman kontrol tidak berbeda nyata, hal ini disebabkan karena cekaman kekeringan yang diberikan berada pada tingkat sedang. Nilai kandungan klorofil daun tanaman pasak bumi pada kondisi tanpa cekaman adalah 62,56 SPAD (dinyatakan dalam indeks SPAD), sedangkan nilai kandungan klorofil pada kondisi tercekam kering adalah 58,93 SPAD, dimana cekaman kekeringan menyebabkan penurunan kandungan klorofil daun sebesar 5,81%. Penurunan ini tidak signifikan secara statistik, karena cekaman kekeringan yang diberikan termasuk dalam kategori sedang.

Meskipun secara statistik tidak signifikan, penurunan kandungan klorofil sebesar 5,81% mencerminkan

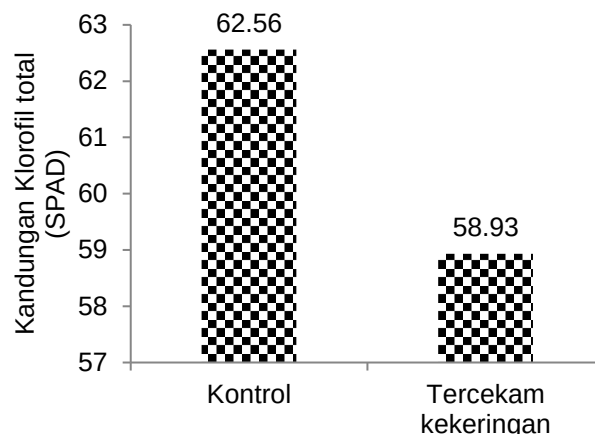
adanya interaksi kompleks antara stres oksidatif, gangguan enzimatis, perubahan ekspresi gen, dan keterbatasan nutrisi yang semuanya saling terkait. Kekurangan air memicu produksi spesies oksigen reaktif (Reactive Oxygen Species/ROS) seperti anion superoksida dan hidrogen peroksida. Zat-zat ini menyebabkan peroksidasi lipid pada membran tilakoid, yaitu lokasi utama penempelan klorofil dalam kloroplas (Husna et al., 2022). Selain itu, kekeringan juga meningkatkan aktivitas enzim klorofilase hingga 3,2 kali lipat, yang mempercepat degradasi klorofil menjadi feofitin (Kalaji et al., 2017). Di tingkat seluler, defisit air menghambat biosintesis klorofil melalui penurunan aktivitas enzim ALA-dehidratase sebesar 45% dan gangguan transpor ion Mg^{2+} , unsur penting dalam struktur inti klorofil (Farooq et al., 2022).

Penurunan kandungan klorofil akibat cekaman kekeringan bervariasi antar spesies. Sebagai perbandingan, tanaman Sambiloto (*Andrographis paniculata*) mengalami penurunan hingga 12,5% di bawah kondisi stres kekeringan (Winarto et al., 2023), sedangkan tanaman Meniran (*Phyllanthus niruri*) menunjukkan penurunan sebesar 8,7% (Sari et al., 2022). Tingkat kerusakan ini sangat dipengaruhi oleh efisiensi sistem antioksidan masing-masing tanaman dan kemampuannya dalam mengakumulasi senyawa kompatibel (compatible solutes) yang membantu menstabilkan membran tilakoid (Ghorbani et al., 2022). Studi komparatif oleh Yang et al. (2020) pada berbagai tanaman obat mengungkapkan adanya korelasi negatif antara kandungan klorofil dan aktivitas enzim antioksidan seperti superoxide dismutase (SOD) dan katalase. Artinya, tanaman dengan sistem antioksidan yang lebih baik cenderung mengalami penurunan klorofil yang lebih rendah saat menghadapi stres kekeringan.

Pada level molekuler, stres kekeringan mengakibatkan perubahan ekspresi gen yang berkaitan dengan metabolisme klorofil, seperti gen *HEMA1* dan *GUN4* yang terlibat dalam biosintesis klorofil, mengalami penurunan ekspresi, sedangkan gen *PAO* yang berperan dalam degradasi klorofil mengalami peningkatan ekspresi. Faktor lingkungan seperti intensitas cahaya dan faktor genetik (jenis tanaman) juga mempengaruhi respon tanaman terhadap stres kekeringan, sebagaimana dilaporkan oleh Purnamaningsih et al. (2023) pada tanaman Tempuyung (*Sonchus arvensis*).

Ketersediaan air dalam tanah sangat menentukan efisiensi penyerapan unsur hara oleh akar. Air bertindak sebagai pelarut bagi unsur hara seperti nitrogen dan magnesium yang penting dalam pembentukan klorofil. Kekurangan air menyebabkan gangguan penyerapan unsur-unsur tersebut, yang berdampak pada menurunnya kandungan klorofil (Baccari et al., 2020). Selain itu, biosintesis prekursor klorofil-a juga dapat terhambat akibat cekaman kekeringan (Dalal & Tripathy, 2018), yang diperparah oleh akumulasi ROS yang bersifat toksik, seperti O_2^- dan H_2O_2 , yang dapat merusak struktur lipid dan menyebabkan kerusakan klorofil (Muhammad et al., 2021). Akibatnya, proses dekomposisi klorofil dipercepat, daya serap cahaya menurun, dan proses fotosintesis terganggu (Li et al., 2018). Rendahnya ketersediaan air pada zona perakaran turut menyebabkan terhambatnya distribusi hara ke bagian atas tanaman, sehingga tanaman yang

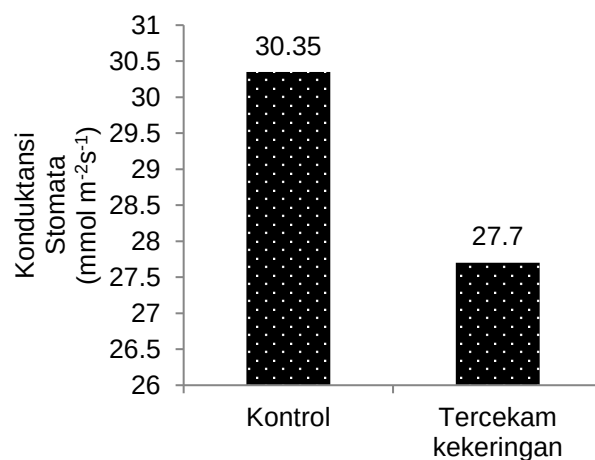
mengalami kekurangan air selama masa pertumbuhan cenderung memiliki kandungan klorofil yang rendah (Hamida & Dewi, 2015).



Gambar 1. Nilai rata-rata kandungan klorofil bibit Pasak bumi kontrol dan tercekam.

Konduktansi Stomata

Stomata merupakan struktur mikroskopis pada permukaan daun yang berperan sebagai jalur utama pertukaran gas, yaitu pengambilan karbon dioksida (CO_2) dan pengeluaran uap air melalui transpirasi. Kecepatan penguapan ini tercermin dalam parameter konduktansi stomata, yang sangat bergantung pada karakteristik spesifik tanaman seperti kerapatan dan ukuran stomata, umur serta ukuran daun, struktur sel pelindung, dan tekanan turgor sel (Nemeskéri & Helyes, 2019). Nilai rata-rata konduktansi stomata dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa perlakuan cekaman kering tidak berbeda signifikan terhadap konduktansi stomata tanaman kontrol. Konduktansi stomata tanaman pasak bumi pada kondisi tanpa cekaman adalah $30,35 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sedangkan konduktansi stomata pada kondisi tercekam kekeringan adalah $27,70 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, dimana terjadi penurunan konduktansi stomata sebesar 8,73% akibat kondisi tercekam kering.



Gambar 2. Rata-rata konduktansi stomata bibit pasak bumi pada kondisi kontrol dan tercekam kekeringan.

Penurunan konduktansi stomata sebesar 8,73% merupakan hasil dari mekanisme fisiologis yang dikendalikan secara ketat melalui jalur hormonal dan hidrolik. Farrell et al. (2022) menjelaskan bahwa

kekurangan air di zona perakaran merangsang akumulasi hormon asam absisat (ABA) di akar, yang kemudian diangkut ke daun melalui xilem. Di sel penjaga stomata, ABA memicu peningkatan konsentrasi ion kalsium (Ca^{2+}) dalam sitosol yang menyebabkan keluarnya ion kalium (K^+) dan anion dari vakuola. Akibatnya, tekanan turgor menurun dan stomata menutup secara bertahap.

Respons tanaman terhadap cekaman kekeringan sangat bervariasi antar spesies, terutama dalam hal penurunan konduktansi stomata. Winarto et al. (2023) melaporkan bahwa tanaman Sambiloto (*Andrographis paniculata*) mengalami penurunan konduktansi hingga 67,8%, sedangkan tanaman Tempuyung (*Sonchus arvensis*) mengalami penurunan sebesar 65,4% (Purnamaningsih et al., 2023). Variasi ini berkaitan dengan faktor anatomi seperti kerapatan stomata, indeks stomata, dan kedalaman rongga substomata, serta perbedaan sensitivitas terhadap hormon ABA (Husna et al., 2022). Sementara itu, Farooq et al. (2022) mengungkapkan bahwa spesies dengan mekanisme isolasi hidraulik yang lebih baik seperti keberadaan sel selubung xilem mengalami penurunan konduktansi yang lebih moderat karena terlindungi dari risiko embolisme.

Pada level molekuler, kekeringan menginduksi perubahan ekspresi gen yang terkait dengan regulasi stomata. Cekaman menyebabkan penurunan ekspresi gen *SLAC1* yang berfungsi sebagai kanal anion, dan peningkatan ekspresi gen *ALMT12* yang turut berperan dalam penutupan stomata. Ini sejalan dengan studi pada tanaman tomat oleh Ghorbani et al. (2022), meskipun tingkat regulasinya berbeda. Respons genetik ini juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kelembaban udara dan variasi genetik tanaman.

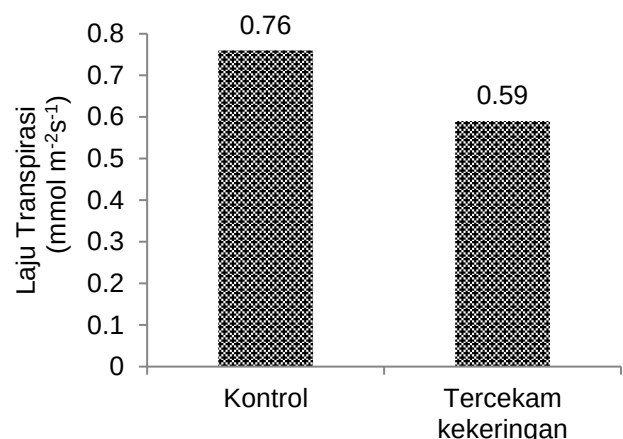
Penutupan stomata merupakan respon awal tanaman dalam menghadapi stres kekeringan. Hormon ABA yang dihasilkan terutama oleh akar menjadi sinyal utama yang ditranslokasikan ke daun melalui sistem vaskuler tanaman. ABA bekerja bersama hormon lain seperti sitokinin dan asam jasmonat untuk mengatur penutupan stomata, mengurangi laju transpirasi, dan menjaga tekanan turgor agar tanaman dapat bertahan dalam kondisi lingkungan yang kering (Wu et al., 2022). Selain itu, ABA juga berperan dalam meningkatkan kemampuan antioksidan akar, memperkuat ketahanan tanaman terhadap stres (Bulgakov et al., 2019). Penurunan konduktansi stomata bukan hanya strategi konservasi air, tetapi juga mempengaruhi proses fisiologis lainnya, termasuk fotosintesis. Menurut Dewi et al. (2019), pengurangan bukaan stomata menurunkan kehilangan air, namun secara bersamaan menghambat difusi CO_2 ke dalam daun, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi fotosintesis. Temuan ini sejalan dengan studi Cahyo et al. (2020) pada tanaman karet klon GT1 dan 600, yang juga menunjukkan penurunan konduktansi stomata saat menghadapi cekaman kekeringan, menunjukkan bahwa efek ini bersifat umum pada berbagai spesies tanaman.

Laju Transpirasi

Transpirasi merupakan proses pelepasan air dalam bentuk uap dari jaringan tumbuhan ke atmosfer melalui stomata. Proses ini berperan penting dalam menjaga keseimbangan air tanaman dan membantu transportasi

nutrisi dari akar ke daun. Hasil analisis sidik ragam penelitian ini menunjukkan bahwa perlakuan cekaman kekeringan tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap laju transpirasi pada tanaman pasak bumi. Rata-rata laju transpirasi tanaman yang tidak mengalami cekaman tercatat sebesar $0,76 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, sedangkan pada kondisi tercekam kekeringan menurun menjadi $0,59 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Gambar 3). Ini menunjukkan penurunan sebesar 22,37%, meskipun penurunan tersebut tidak signifikan secara statistik, tetapi mencerminkan aktivasi mekanisme adaptasi multi-level dari regulasi stomatal hingga perubahan anatomi dan ekspresi genetik yang bertujuan menjaga keseimbangan air selama periode kekeringan.

Penurunan laju transpirasi ini berkorelasi langsung dengan penurunan konduktansi stomata, mengindikasikan bahwa tanaman menerapkan strategi adaptif untuk meminimalkan kehilangan air melalui jalur stomatal. Mekanisme ini merupakan bagian dari sistem konservasi air terintegrasi yang diaktifkan saat tanaman mengalami defisit air. Farrell et al. (2022) menjelaskan bahwa defisit air di tanah merangsang akumulasi hormon asam absisat (ABA) di akar, yang kemudian diangkut menuju daun melalui jaringan xilem. ABA memicu penutupan stomata, yang secara langsung menurunkan laju transpirasi.



Gambar 3. Rata-rata laju transpirasi bibit pasak bumi pada kondisi kontrol dan tercekam kekeringan.

Respons tanaman terhadap cekaman kekeringan sangat bervariasi antar spesies. Misalnya, tanaman Sambiloto (*Andrographis paniculata*) menunjukkan penurunan laju transpirasi hingga 58,7% (Winarto et al., 2023), sedangkan *Meniran* (*Phyllanthus niruri*) mengalami penurunan sebesar 45,3% (Sari et al., 2022). Perbedaan ini dikaitkan dengan variasi anatomi daun, seperti ketebalan kutikula, kerapatan trikoma, dan keberadaan lapisan lilin epidermis. Struktur-struktur tersebut bertindak sebagai penghalang tambahan terhadap kehilangan air dan meningkatkan efisiensi retensi air (Husna et al., 2022).

Di tingkat seluler dan molekuler, respons terhadap kekeringan melibatkan modifikasi struktur permukaan daun, terutama pada kutikula dan lapisan lilin. Cekaman kekeringan menginduksi peningkatan ekspresi gen-gen yang terlibat dalam biosintesis senyawa hidrofobik seperti *CER1* dan *KCS6*, yang berperan dalam pembentukan lapisan lilin kutikula. Pola ekspresi ini juga

ditemukan pada tanaman jarak pagar oleh Ghorbani et al. (2022), meskipun dengan tingkat akumulasi lilin yang berbeda. Adaptasi ini menciptakan permukaan daun yang lebih tahan terhadap kehilangan air, meningkatkan efisiensi konservasi air non-stomatal. Faktor eksternal seperti kelembaban udara, intensitas cahaya, dan faktor genetik juga memengaruhi dinamika transpirasi di bawah stres kekeringan.

Laju Fotosintesis

Fotosintesis merupakan proses vital dalam pertumbuhan dan produktivitas tanaman, yang sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, termasuk ketersediaan air. Berdasarkan hasil analisis sidik ragam, perlakuan cekaman kekeringan tidak memberikan perbedaan yang signifikan terhadap laju fotosintesis tanaman pasak bumi. Pada kondisi tanpa cekaman, laju fotosintesis mencapai $30,01 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sementara pada kondisi cekaman kekeringan menurun menjadi $28,88 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Gambar 4). Penurunan sebesar 3,78% ini, meskipun ringan, menunjukkan adanya respons fisiologis tanaman terhadap stres air, terutama melalui mekanisme regulasi stomata.

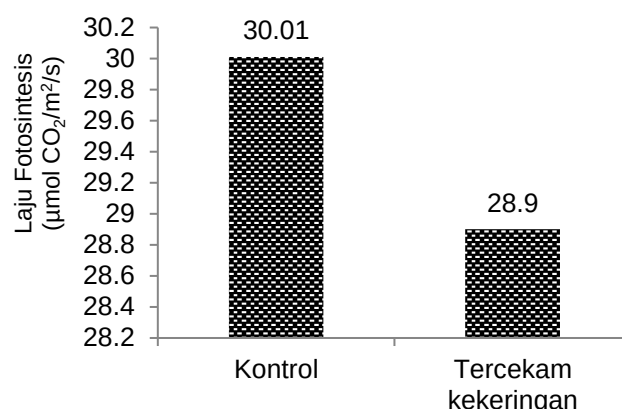
Penurunan laju fotosintesis tersebut diduga erat kaitannya dengan penutupan stomata, mengingat stomata berfungsi sebagai jalur utama masuknya CO_2 ke dalam daun. Penutupan stomata membatasi difusi CO_2 ke dalam kloroplas, sehingga menghambat proses karboksilasi pada reaksi gelap fotosintesis. Sopandie (2014) menjelaskan bahwa cekaman kekeringan menurunkan pertumbuhan dan aktivitas fotosintetik melalui mekanisme penutupan stomata dan gangguan metabolik. Hal ini diperkuat oleh Anggraini et al. (2015) yang melaporkan penurunan fotosintesis sebesar 51,13% pada tanaman *Black locust* yang mengalami defisit air hingga kapasitas lapang 30–40%.

Respons fotosintetik terhadap cekaman kekeringan dapat dijelaskan melalui dua jalur utama: mekanisme stomatal dan non-stomatal. Mekanisme stomatal melibatkan penutupan stomata yang membatasi pasokan CO_2 , sedangkan mekanisme non-stomatal mencakup penurunan kandungan klorofil, gangguan aktivitas enzim fotosintesis, dan stres oksidatif akibat peningkatan spesies oksigen reaktif (Meher et al., 2018; Chen et al., 2016). Defisiensi air juga menghambat penyerapan unsur hara dari tanah, mengakibatkan kekurangan mineral esensial dalam daun yang turut berkontribusi terhadap penurunan efisiensi fotosintesis. Penurunan laju fotosintesis sebesar 3,78% pada pasak bumi merepresentasikan bentuk pembatasan stomata (*stomatal limitation*) yang umum terjadi pada stres kekeringan ringan hingga sedang. Flexas et al. (2016) menjelaskan bahwa peningkatan hormon asam absisat (ABA) akibat defisit air memicu penutupan stomata, yang menghambat difusi CO_2 ke kloroplas. Chaves et al. (2016) menambahkan bahwa penurunan konduktansi stomata sebesar 10% dapat menyebabkan penurunan fotosintesis sebesar 4–6% karena terbatasnya CO_2 yang tersedia untuk reaksi karboksilasi.

Respons tanaman terhadap cekaman kekeringan sangat bervariasi antar spesies. Sebagai perbandingan, tanaman *Sambilo* (*Andrographis paniculata*) mengalami penurunan laju fotosintesis hingga 45,3% (Winarto et al., 2023), sedangkan pada *Tempuyung* (*Sonchus arvensis*), penurunan tercatat sebesar 28,9%

(Purnamaningsih et al., 2023). Yang et al. (2020) menunjukkan bahwa perbedaan ini dipengaruhi oleh efisiensi regenerasi ribulosa-1,5-bisfosfat (RuBP) dan kapasitas enzim Rubisco dalam karboksilasi CO_2 . Spesies dengan kemampuan mempertahankan aktivitas enzim Rubisco aktivase dan sedoheptulosa-1,7-bisfosfatase yang tinggi cenderung mengalami penurunan yang lebih moderat (Farooq et al., 2022).

Di tingkat molekuler dan biokimia, stres kekeringan dapat mengganggu struktur dan fungsi protein fotosintetik di membran tilakoid. Kalaji et al. (2017) melaporkan bahwa kekeringan menghambat efisiensi Photosystem II (PSII), yang tercermin dalam penurunan parameter Fv/Fm. Kerusakan protein D1 pada PSII juga diamati pada tanaman ginseng dalam kondisi kekeringan berat (Ghorbani et al., 2022). Respons ini dipengaruhi pula oleh kapasitas antioksidan dan efisiensi penggunaan air intrinsik (WUEi) tanaman.

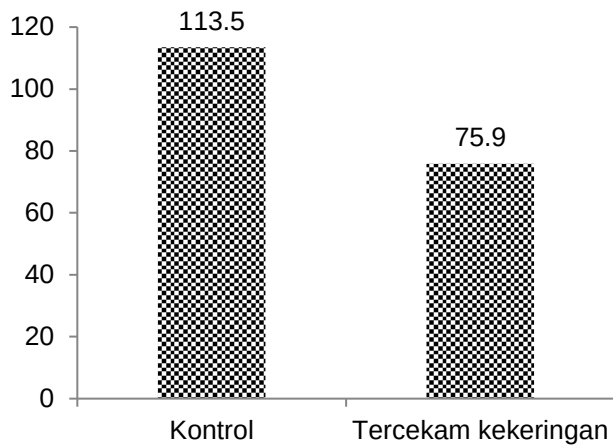


Gambar 4. Rata-rata laju fotosintesis bibit pasak bumi pada kondisi kontrol dan tercekam kekeringan.

Efisiensi Penggunaan Air

Efisiensi penggunaan air (Water Use Efficiency/WUE) didefinisikan sebagai rasio antara laju fotosintesis terhadap laju transpirasi tanaman, yang mencerminkan seberapa efektif tanaman memanfaatkan air untuk menghasilkan biomassa karbon (Anggraini et al., 2015). Parameter ini menjadi indikator penting dalam menilai ketahanan tanaman terhadap kondisi kekeringan. Berdasarkan hasil analisis sidik ragam, tidak ditemukan perbedaan signifikan antara nilai WUE tanaman pasak bumi pada kondisi kontrol dan yang mengalami cekaman kekeringan. Nilai rata-rata WUE pada kondisi normal adalah $113,50 \mu\text{mol CO}_2$, sementara pada kondisi tercekam kekeringan turun menjadi $75,90 \mu\text{mol CO}_2$ (Gambar 5), yang mengalami penurunan sebesar 33,13%.

Penurunan WUE sebesar 33,13% pada pasak bumi sejalan dengan temuan Anggraini et al. (2015) yang mencatat penurunan efisiensi penggunaan air pada tanaman *Black Locust* ketika penyiraman dibatasi hingga 30–40% kapasitas lapang. Namun, hasil ini kontras dengan studi Hapsari et al. (2020) yang melaporkan peningkatan WUE sebesar 60% dan 45% pada bibit manggis yang diberi perlakuan polietilen glikol (PEG) 10% dan 15%. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh variasi jenis tanaman, metode pemberian cekaman, dan strategi fisiologis yang digunakan masing-masing spesies untuk bertahan di bawah tekanan lingkungan.



Gambar 5. Rata-rata efisiensi penggunaan air bibit pasak bumi pada kondisi kontrol dan tercekam kekeringan.

Pembukaan dan penutupan stomata, serta karakteristik sistem perakaran, merupakan dua faktor utama yang mempengaruhi WUE tanaman saat mengalami kekeringan. Tanaman dengan nilai WUE tinggi umumnya menunjukkan kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap defisit air. Dalam studi ini, pasak bumi menunjukkan nilai WUE yang tidak berbeda nyata dengan kontrol, meskipun terjadi penurunan cukup besar. Tátrai et al. (2016) juga mengamati pola serupa, di mana WUE tidak mengalami perubahan signifikan meskipun tanaman diberi perlakuan PEG 2% dan 4%, yang kemungkinan disebabkan oleh inhibisi parsial terhadap proses fiksasi CO₂ dan karboksilasi RuBP. Temuan ini mencerminkan respons fisiologis yang kompleks dan melibatkan berbagai komponen metabolik.

Menariknya, penurunan transpirasi sebesar 22,37% pada pasak bumi tidak disertai dengan penurunan laju fotosintesis yang sebanding, yaitu hanya 3,78%. Ketidakseimbangan ini menunjukkan adanya disosiasi antara pengurangan kehilangan air dan penurunan produksi karbon. Chaves et al. (2016) menyatakan bahwa fenomena semacam ini umum dijumpai pada tanaman berkayu, yang memiliki mekanisme pembatasan non-stomatal seperti kemampuan mempertahankan aktivitas enzim Rubisco dan regenerasi RuBP dalam kondisi stres. Namun, penurunan WUE yang mencapai 33,13% menunjukkan inefisiensi dalam mengubah air menjadi biomassa, yang menurut Farooq et al. (2022) dapat dikaitkan dengan tingginya beban metabolik dalam produksi senyawa pertahanan seperti kuasinoid. Jika dibandingkan dengan tanaman obat lain, respons fisiologis pasak bumi tergolong intermediate. Misalnya, tanaman *Sambiloto* (*Andrographis paniculata*) mengalami penurunan fotosintesis hingga 45,3% (Winarto et al., 2023), sedangkan *Tempuyung* (*Sonchus arvensis*) menunjukkan penurunan WUE sebesar 41,7% (Purnamaningsih et al., 2023). Di sisi lain, tanaman berkayu tropis seperti *Gaharu* hanya mengalami penurunan fotosintesis sebesar 2,1% pada cekaman serupa (Hertanto et al., 2024).

Penurunan efisiensi penggunaan air sebesar 33,13% pada tanaman pasak bumi mencerminkan

adanya kompromi antara konservasi air dan produktivitas karbon. Meskipun penurunan WUE tergolong besar, kemampuan tanaman ini dalam mempertahankan fotosintesis, mengatur stomata, dan menjaga stabilitas fisiologis lainnya menunjukkan bahwa pasak bumi memiliki respons adaptif yang cukup tangguh meski belum seefisien spesies berkayu tropis dengan ketahanan kekeringan tinggi.

KESIMPULAN

Perlakuan cekaman kekeringan pada bibit tanaman pasak bumi selama 2 hari menyebabkan penurunan laju fotosintesis (3,78%), kandungan klorofil (5,81%), konduktansi stomata (10,34%), laju transpirasi (18,73%), dan efisiensi penggunaan air (33,13%) dibandingkan dengan tanaman kontrol. Hasil penelitian ini menjadi dasar penting untuk pengembangan strategi budidaya dan pemuliaan tanaman tahan cekaman kekeringan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraini, N., Faridah, E., & Indrioko, S. (2015). Pengaruh Cekaman Kekeringan terhadap Perilaku Fisiologis dan Pertumbuhan Bibit Black Locust (*Robinia pseudoacacia*). *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 9(1), 40-56. <https://doi.org/10.22146/jik.10183>
- Baccari, S., Elloumi, O., Chaari-Rkhis, A., Fenollosa, E., Morales, M., Drira, N., Ben Abdallah, F., Fki, L., & Munné-Bosch, S. (2020). Linking Leaf Water Potential, Photosynthesis and Chlorophyll Loss With Mechanisms of Photo- and Antioxidant Protection in Juvenile Olive Trees Subjected to Severe Drought. *Frontiers in Plant Science*, 11, 614144.
- Cahyo, A. N., Murti, R. H., & Putra, E. T. S. (2020). Dampak Kekeringan Terhadap Proses Fisiologis, Pertumbuhan, dan Hasil Tanaman Karet (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.). *Warta Perkaretan*, 39(1), 57-72. <https://doi.org/10.22302/ppk.wp.v39i1.664>
- Chaves, M. M., Costa, J. M., & Saibo, N. J. M. (2016). Recent advances in photosynthesis under drought and salinity. *Advances in Botanical Research*, 57, 49-104. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2015.09.001>
- Chen, Y.-E., Liu, W.-J., Su, Y.-Q., Cui, J.-M., Zhang, Z.-W., Yuan, M., Zhang, H.-Y., & Yuan, S. (2016). Different response of photosystem II to short and long-term drought stress in *Arabidopsis thaliana*. *Physiologia Plantarum*, 158(2), 225-235. <https://doi.org/10.1111/ppl.12438>
- Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E. (2023). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 615(7951), 85-90. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05756-8>
- Dalal, V. K., & Tripathy, B. C. (2018). Water-stress induced downsizing of light-harvesting antenna complex protects developing rice seedlings from photo-oxidative damage. *Scientific Reports*, 8(1), 5955. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14419-4>

- Dewi, S. M., Yuwariah, Y., Qosim, W. A., & Ruswandi, D. (2019). Pengaruh cekaman kekeringan terhadap hasil dan sensitivitas tiga genotip jawawut. *Kultivasi*, 18(3), Article 3. <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v18i3.19636>
- Farooq, M., Hussain, M., Ul-Allah, S., & Siddique, K. H. M. (2022). Physiological and agronomic approaches for improving water-use efficiency in crop plants. *Agricultural Water Management*, 219, 106-123. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106123>
- Farrell, C., Szota, C., & Arndt, S. K. (2022). Stomatal responses to drought stress in woody plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 844-859. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.826312>
- Flexas, J. (2016). Genetic improvement of leaf photosynthesis and intrinsic water use efficiency in C3 plants: Why so much little success? *Plant Science*, 251, 155-161. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.05.002>
- García-Caparrós, P., Romero, M. J., Llanderal, A., Cermeño, P., Lao, M. T., & Segura, M. L. (2019). Effects of Drought Stress on Biomass, Essential Oil Content, Nutritional Parameters, and Costs of Production in Six Lamiaceae Species. *Water*, 11(3), 573. <https://doi.org/10.3390/w11030573>
- Ghorbani, A., Razavi, S. M., Ghasemi Omran, V. O., & Pirdashti, H. (2022). Drought stress modulates secondary metabolites in medicinal plants. *South African Journal of Botany*, 151, 949-959. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.11.016>
- Hamida, R., & Dewi, K. (2015). Efektivitas Mikoriza Vesikular Arbuskular dan 5-aminolevulinic Acid terhadap Pertumbuhan Jagung Varietas Lokal Madura pada Cekaman Kekeringan. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 34(1), 61-67. <https://doi.org/10.21082/jpntp.v34n1.2015.p61-67>
- Hapsari, D. P., Poerwanto, R., Sopandie, D., Santosa, E., & Matra, D. D. (2020). Morphophysiological Changes of Mangosteen Seedling (*Garcinia mangostana* L.) on Polyethylene Glycol (PEG) Application. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 11(1), 1-12. <https://doi.org/10.29244/jhi.11.1.1-12>
- Hertanto, D. M., Primiana, U., & Siregar, I. Z. (2024). Comparative drought tolerance of tropical medicinal trees: Physiological and growth responses. *Journal of Tropical Forest Science*, 36(1), 78-95.
- Husna, N. E., Siregar, L. A. M., & Situmorang, R. F. (2022). Physiological adaptation mechanisms of medicinal plants under drought stress: A comprehensive review. *Biodiversitas*, 23(5), 2347-2357.
- Hussain, M. S., Fareed, S., Ansari, S., Rahman, M. A., Ahmad, I. Z., & Saeed, M. (2019). Current approaches toward production of secondary plant metabolites. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 11(2), 88-99. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_218_18
- Ismail, N. A., & Jahan, M. S. (2019). Drought stress and its impact on medicinal plants. In M. Ozturk & R. Hakeem (Eds.), *Plant and Human Health*, Volume 2 (pp. 323-345). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03344-6_14
- Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Łukasik, I., Goltsev, V., & Ladle, R. J. (2017). Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants. *Photosynthesis Research*, 136(3), 329-343. <https://doi.org/10.1007/s11120-017-0467-7>
- Li, Y., He, N., Hou, J., Xu, L., Liu, C., Zhang, J., Wang, Q., Zhang, X., & Wu, X. (2018). Factors Influencing Leaf Chlorophyll Content in Natural Forests at the Biome Scale. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, 64. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00064>
- Meher, Shivakrishna, P., Ashok Reddy, K., & Manohar Rao, D. (2018). Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(2), 285-289. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.04.008>
- Muhammad, I., Shalmani, A., Ali, M., Yang, Q.-H., Ahmad, H., & Li, F. B. (2021). Mechanisms Regulating the Dynamics of Photosynthesis Under Abiotic Stresses. *Frontiers in Plant Science*, 11, 2310. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.615942>
- Nemeskéri, E., & Helyes, L. (2019). Physiological Responses of Selected Vegetable Crop Species to Water Stress. *Agronomy*, 9(8), 447. <https://doi.org/10.3390/agronomy9080447>
- Purnamaningsih, R., Sari, D. N., & Kusumaningrum, D. (2023). Enhancement of bioactive compounds in *Sonchus arvensis* L. through controlled drought stress application. *Journal of Tropical Medicinal Plants*, 24(2), 89-101.
- Rosmaina, R., Parjanto, P., Sobir, S., & Yunus, A. (2019). Screening of *Capsicum annuum* L Genotypes for Drought Tolerance Based on Drought Tolerance Indices. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*, 51(3), 205-224.
- Rosmaina, R., & Zulfahmi, Z. (2013). Genetic Diversity of *Eurycoma longifolia* Jack Based on Random Amplified Polymorphic DNA Marker. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 19(2), 138-144. <https://doi.org/10.7226/jtfm.19.2.138>
- Rosmaina, Sobir, Parjanto, & Yunus, A. (2018). Selection Criterias Development for Chilli Pepper Under Different Field Water Capacity at Vegetative Stage. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24(1), 80-90.
- Sapeta, H., Costa, J. M., Lourenço, T., Maroco, J., van der Linde, P., & Oliveira, M. M. (2013). Drought stress response in *Jatropha curcas*: Growth and physiology. *Environmental and Experimental Botany*, 85, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.08.012>
- Sari, D. R., Wahyuni, S., & Fitmawati. (2022). Osmolyte accumulation and antioxidant defense mechanism in *Phyllanthus niruri* under drought stress. *Asian*

- Journal of Plant Sciences, 21(4), 345-356.
- Sopandie, D. (2014). FISILOGI ADAPTASI TANAMAN terhadap Cekaman Abiotik pada Agroekosistem Tropika. PT Penerbit IPB Press. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/81229>
- Subantoro, R. (2014). Pengaruh Cekaman Kekeringan Terhadap Respon Fisiologis Perkecambahan Benih Kacang Tanah (*Arachis hypogaea* L). MEDIAGRO: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian, 10(2), 32–44. <https://doi.org/10.31942/mediagro.v10i2.1587>
- Tátrai, Z. A., Sanoubar, R., Pluhár, Z., Mancarella, S., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2016). Morphological and Physiological Plant Responses to Drought Stress in *Thymus citriodorus*. International Journal of Agronomy, 2016, e4165750. <https://doi.org/10.1155/2016/4165750>
- Tran, T. V. A., Malainer, C., Schwager, S., Hung, T., Atanasov, A. G., & Heiss, E. H. (2021). The pharmacological properties of *Eurycoma longifolia* Jack. Molecules, 26(21), 6490. <https://doi.org/10.3390/molecules26216490>
- Thu, H. E., Hussain, Z., Mohamed, I. N., & Shuid, A. N. (2018). Recent Advances in Antibacterial, Antiprotozoal and Antifungal Trends of *Eurycoma longifolia*: A Review of Therapeutic Implications and Future Prospects. Current Drug Targets, 19(14), 1657–1671. <https://doi.org/10.2174/1389450119666180219123815>
- Winarto, B., Santosa, E., & Nurzaman, M. (2023). Stomatal behavior and photosynthetic performance of *Andrographis paniculata* under different drought stress levels. Journal of Agronomy and Crop Science, 209(2), 145-158.
- Wu, J., Wang, J., Hui, W., Zhao, F., Wang, P., Su, C., & Gong, W. (2022). Physiology of Plant Responses to Water Stress and Related Genes: A Review. Forests, 13(2), 324.. <https://doi.org/10.3390/f13020324>
- Yang, L., Wen, K. S., Ruan, X., Zhao, Y. X., Wei, F., & Wang, Q. (2020). Response of plant secondary metabolites to environmental factors. Molecules, 25(23), 5686. <https://doi.org/10.3390/molecules25235686>
- Zulfahmi. (2015). Keragaman Pasak Bumi di Hutan Larangan Adat Rumbio. CV. ASA RIAU. Pekanbaru.