



PERAN ARSITEKTUR AKAR DALAM ADAPTASI SORGUM TERHADAP CEKAMAN KEKERINGAN (Review)

Putri A. Mandasari^{1*}, Sinar Suryawati², Bagus Arrasyid³, Eko Murniyanto⁴

^{1,2}Department of Agriculture Science and Technology, Universitas Trunojoyo Madura, Indonesia

³Faculty of Agriculture, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Indonesia

⁴Faculty of Agriculture, Universitas Tribuwana Tunggaladewi, Indonesia

Email: andini.mandasari@trunojoyo.ac.id

Abstract

Sorghum is a drought-tolerant cereal crop and a strategic component of food security in semi-arid regions. Its adaptation to water deficit is largely determined by root system architecture (RSA), which includes root depth, lateral distribution, and interactions with microorganisms. An adaptive RSA allows sorghum to access water reserves, enhance nutrient uptake, and maintain growth and grain yield under drought. Root physiological mechanisms, such as osmolyte accumulation and antioxidant systems, support cellular homeostasis, while hormonal regulation (abscisic acid) and the transcription factor SbNAC9 coordinate gene expression for root development and stress defense. The synergy among these morphological, physiological, and molecular responses enables sorghum to sustain metabolism during prolonged water deficits. This review synthesizes existing literature on the role of RSA in sorghum's drought adaptation, highlighting the connections between root structure, physiological responses, and molecular pathways. These insights provide a valuable framework for root-based breeding strategies aimed at enhancing drought tolerance. Ultimately, RSA acts as a central hub, integrating various adaptations to support crop resilience and productivity under arid conditions.

Keywords: Angle Root, Cereal Crop, Deeper Root, Root Morphology, Root Physiology

Abstrak

Sorghum adalah tanaman serealia yang toleran kekeringan dan merupakan komponen strategis ketahanan pangan di wilayah sub-optimal. Adaptasinya terhadap defisit air sangat ditentukan oleh arsitektur sistem perakaran (RSA), termasuk kedalaman akar, distribusi lateral, sudut pertumbuhan, dan interaksi dengan mikroorganisme sekitar perakaran. RSA yang adaptif memungkinkan sorgum mengakses cadangan air di seluruh lapisan tanah, meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi, serta mempertahankan pertumbuhan vegetatif dan hasil panen biji di bawah kondisi kekeringan. Mekanisme fisiologis akar, seperti akumulasi osmolit (prolin dan gula terlarut), regulasi spesies oksigen reaktif (ROS), dan aktivasi sistem antioksidan, mendukung homeostasis seluler saat mengalami cekaman air. Regulasi hormonal oleh asam absisat (ABA), giberelin, dan etilen menyeimbangkan pertumbuhan akar primer dan lateral, sementara faktor transkripsi SbNAC9 mengoordinasikan ekspresi gen yang terkait dengan perkembangan akar, akumulasi osmolit, dan pertahanan terhadap cekaman oksidatif. Sinergi antara respons morfologi, fisiologi, dan molekuler ini memungkinkan sorgum untuk mempertahankan metabolisme dan fotosintesis selama defisit air yang berkepanjangan. Tinjauan ini mensintesis literatur terkini mengenai peran RSA dalam adaptasi sorgum terhadap kekeringan, menyoroti hubungan antara struktur akar, respons fisiologis, dan jalur molekuler. Wawasan yang

disajikan memberikan kerangka kerja komprehensif untuk strategi pemuliaan berbasis akar dan teknik budidaya presisi yang bertujuan meningkatkan toleransi kekeringan. Dengan demikian, RSA tidak hanya berfungsi sebagai organ penyerapan air dan nutrisi, tetapi juga sebagai pusat utama yang mengintegrasikan adaptasi morfologi, fisiologi, dan molekuler, sehingga mendukung ketahanan dan produktivitas tanaman di bawah kondisi kering.

Kata Kunci: Sudut Akar, Tanaman Serealia, Akar Lebih Dalam, Morfologi Akar, Fisiologi Akar

1. Pendahuluan

Ketahanan pangan global saat ini menghadapi tantangan serius akibat perubahan iklim ekstrim dan pertumbuhan populasi yang pesat. Perubahan pola curah hujan dan meningkatnya frekuensi kekeringan akibat perubahan iklim telah menjadi ancaman sistemik terhadap produksi pangan, terutama di wilayah-wilayah yang bergantung pada sektor pertanian sebagai sumber utama penghidupan (Mirzabaev et al., 2023). Kekeringan merupakan salah satu cekaman abiotik utama yang membatasi produktivitas tanaman pangan, khususnya di negara berkembang (Savari et al., 2024). Oleh karena itu, strategi adaptasi yang bertujuan untuk meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman kekeringan menjadi sangat krusial. Pendekatan adaptif ini mencakup pemanfaatan sumber daya genetik, pemuliaan varietas tahan cekaman, serta penguatan pemahaman terhadap karakter morfologi dan fisiologi tanaman yang berkontribusi terhadap ketahanan, termasuk arsitektur sistem perakaran yang memainkan peran sentral dalam efisiensi penyerapan air dan kelangsungan hidup tanaman di lingkungan kering (Pixley et al., 2023).

Sistem perakaran dapat menggambarkan bagaimana kemampuan tanaman tumbuh dan berkembang di bawah lingkungan tercekam. Struktur dan pola pertumbuhan akar seperti kedalaman dan distribusinya menentukan sejauh mana tanaman mampu menjangkau dan menyerap air dari lapisan tanah yang lebih dalam (Kalra et al., 2024). Pemahaman terhadap arsitektur sistem perakaran (*root system architecture*/RSA) membuka peluang besar untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan produktivitas tanaman serealia (Maqbool et al., 2022). Arsitektur sistem perakaran yang optimal terbukti berperan penting dalam meningkatkan efisiensi penyerapan air dan nutrisi, sehingga memperkuat ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan (Zhang et al., 2025). Oleh karena itu, karakteristik sistem perakaran menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan varietas tanaman yang lebih efisien dalam memanfaatkan sumber daya, terutama di bawah kondisi cekaman abiotik seperti kekeringan. Salah satu tanaman yang relevan dengan konteks ini adalah sorgum yang diketahui memiliki sistem perakaran adaptif terhadap kondisi kering sehingga potensial dikaji lebih lanjut sebagai representasi tanaman toleran kekeringan.

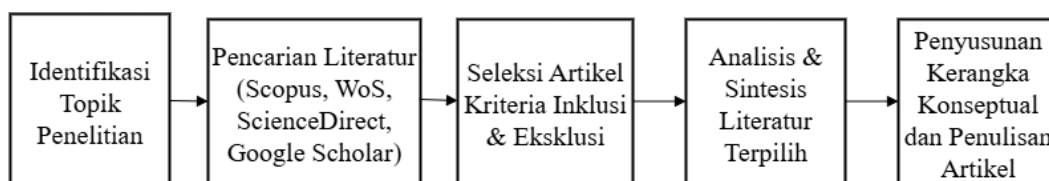
Sorgum (*Sorghum bicolor* L.) merupakan salah satu tanaman pangan utama di wilayah semi-arid yang dikenal memiliki toleransi tinggi terhadap berbagai cekaman abiotik seperti suhu tinggi, defisiensi hara dan kekeringan (Ali et al., 2025; Djanaguiraman et al., 2024; Mandasari et al., 2020). Keunggulan ini menjadikan sorgum sebagai komoditas strategis dalam menghadapi tantangan perubahan dan ketidakstabilan iklim. Variasi genetik antar genotipe sorgum mencerminkan keberagaman mekanisme adaptasi

terhadap cekaman kekeringan. Hasil analisis arsitektur akar menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam konfigurasi sistem perakaran. Kondisi ini mengindikasikan bahwa setiap genotipe mengembangkan strategi struktural sendiri dalam menghadapi stres air (Demissie et al., 2023). Meskipun demikian kekeringan yang berulang dapat menurunkan produktivitasnya secara signifikan. Sejalan dengan itu, eksplorasi gen-gen dan karakter akar yang berperan dalam adaptasi terhadap cekaman kekeringan dipandang penting untuk meningkatkan performa dan keberlanjutan produksi sorgum di lahan kering.

Peran akar dalam toleransi kekeringan pada tanaman serealia telah banyak diteliti. Namun, tinjauan sistematis yang secara spesifik membahas arsitektur akar (RSA) sorgum dan kontribusinya terhadap adaptasi kekeringan masih terbatas. Tinjauan ini bertujuan untuk mensintesis dan menganalisis secara mendalam mekanisme morfologi, fisiologi, dan genetik yang mendasari adaptasi RSA sorgum, serta implikasinya bagi program pemuliaan dan praktik agronomi yang lebih efisien. Hasil tinjauan ini diharapkan dapat menjadi referensi komprehensif bagi para peneliti dan pemulia tanaman dalam merancang strategi peningkatan ketahanan sorgum terhadap cekaman kekeringan, yang pada akhirnya dapat memperkuat ketahanan pangan di wilayah sub-optimal.

2. Bahan dan Metode

Artikel ini disusun melalui kajian literatur dengan menelusuri publikasi internasional dan nasional yang relevan dari database seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, serta Google Scholar. Literatur yang dianalisis mencakup rentang tahun 2013–2025, dengan fokus pada arsitektur sistem perakaran, respon fisiologis dan molekuler sorgum terhadap cekaman kekeringan, serta implikasinya bagi strategi pemuliaan dan budidaya. Sintesis dilakukan dengan menyeleksi artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi, kemudian mengintegrasikan temuan utama untuk membangun kerangka konseptual mengenai peran arsitektur sistem perakaran dalam adaptasi sorgum terhadap cekaman kekeringan.



Gambar 1. Metode kajian literatur

3. Hasil dan Pembahasan

Arsitektur Sistem Perakaran (RSA) dan Pentingnya dalam Adaptasi Tanaman

Arsitektur sistem perakaran (Root System Architecture/RSA) merupakan susunan atau struktur akar yang memungkinkan tanaman memperoleh unsur hara dari tanah secara efisien, terutama ketika terjadi keterbatasan dalam ketersediaannya (Reich, 2017). Pola ini mencakup distribusi, arah pertumbuhan, serta interaksi setiap bagian akar dengan lingkungan tumbuhnya (Maqbool et al., 2022). RSA secara langsung mempengaruhi kemampuan tanaman dalam mengakses sumber daya tanah, baik berupa kelembaban maupun nutrisi esensial. Sistem perakaran yang berkembang secara optimal terbukti

berperan penting dalam meningkatkan pemanfaatan sumber daya, sehingga memperkuat toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan. Selain itu, variasi genetik antar tanaman dalam RSA dapat dimanfaatkan untuk menentukan tipe akar yang adaptif terhadap kondisi spesifik lahan. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai RSA tidak hanya penting bagi fisiologis tanaman, tetapi juga membuka peluang besar bagi strategi pemuliaan dan teknologi budidaya presisi untuk meningkatkan produktivitas pada kondisi cekaman abiotik.

RSA dianggap sebagai salah satu strategi adaptif paling krusial bagi tanaman dalam menghadapi cekaman kekeringan karena menentukan seberapa efisien akar mampu menyerap kelembaban pada kedalaman lapisan tanah olah. Beberapa komponen utama RSA diketahui berperan penting dalam mempertahankan kelangsungan hidup tanaman pada kondisi air terbatas. Menurut (Ye et al., 2018), sistem perakaran yang tumbuh lebih dalam dengan percabangan lebih banyak terbukti menguntungkan, karena konfigurasi tersebut memperluas jangkauan akar dalam memperoleh sumber daya tanah, baik air maupun unsur hara sehingga mendukung kemampuan tanaman beradaptasi pada lingkungan kekeringan. Penelitian pada jagung yang dilakukan oleh Feng et al., (2022) menunjukkan bahwa aktivasi gen tertentu dapat menstimulasi pertumbuhan akar vertikal yang lebih dalam, yang pada gilirannya meningkatkan ketahanan tanaman terhadap defisit air secara signifikan. Selain itu, kepadatan akar lateral di lapisan tanah atas juga berkontribusi besar terhadap strategi adaptasi. Distribusi akar yang rapat di permukaan memungkinkan tanaman memanfaatkan curah hujan secara cepat dan efisien sebelum hilang kembali melalui evaporasi (Lynch, 2019). Dengan demikian, baik akar dalam maupun lateral, keduanya memiliki peran yang saling mendukung dalam memastikan tanaman tetap memperoleh suplai air secara berkelanjutan pada kondisi kekeringan.

Menurut Zhang et al., (2025), pemahaman mendalam mengenai arsitektur sistem perakaran memberikan kerangka konseptual yang penting untuk menjelaskan bagaimana tanaman mengoptimalkan adaptasi terhadap cekaman lingkungan. Arsitektur sistem perakaran tidak hanya mengatur pola eksplorasi tanah, tetapi juga mempengaruhi efisiensi penggunaan air melalui variasi kedalaman, sudut pertumbuhan, dan distribusi akar lateral. Kerangka teoritis ini menjadi pijakan bagi strategi pemuliaan maupun penerapan teknologi budidaya presisi, sehingga karakteristik perakaran dapat dijadikan target penting dalam menghasilkan tanaman yang lebih toleran terhadap keterbatasan air.

Morfologi Arsitektur Akar Sorgum di Bawah Cekaman Kekeringan

Arsitektur sistem perakaran merupakan faktor fundamental yang menentukan kemampuan sorgum menghadapi cekaman kekeringan. Selain berperan dalam penyerapan air dan unsur hara, RSA juga menjaga stabilitas tanaman, mendukung efisiensi fotosintesis, serta meningkatkan ketahanan fisiologis terhadap stres abiotik (Meister et al., 2014). Struktur perakaran yang adaptif memungkinkan tanaman menyesuaikan distribusi akar secara dinamis sesuai ketersediaan air pada berbagai lapisan tanah. Hal ini memperluas jangkauan penyerapan sekaligus mengoptimalkan interaksi dengan mikroorganisme rhizosfer yang membantu penyediaan nutrisi. Salah satunya adalah peran arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) yang komunitasnya dapat berubah sesuai ketersediaan air dan terbukti meningkatkan serapan fosfor pada sorgum di bawah kondisi kering (Frew, 2023).

RSA juga berkontribusi pada distribusi biomassa tanaman dan efisiensi penggunaan air (water use efficiency), yang menjadi kunci untuk mempertahankan produktivitas di wilayah semi-arid. Dengan demikian, kajian RSA tidak hanya penting dalam fisiologi tanaman, tetapi juga memiliki implikasi besar bagi pemuliaan varietas sorgum yang lebih toleran kekeringan dan berdaya hasil stabil di lahan kering atau sub-optimal.

Secara umum, sistem perakaran tanaman terdiri atas akar primer, akar lateral, akar adventif, serta rambut akar. Akar primer berfungsi sebagai titik awal perkembangan sistem perakaran dan menentukan kedalaman akar, sehingga berperan penting dalam strategi tanaman untuk mengakses cadangan air di lapisan tanah yang lebih dalam sekaligus menjaga kestabilan tanaman. Akar lateral, yang jumlahnya paling dominan dalam keseluruhan sistem perakaran, memperluas area penyerapan air dan hara melalui peningkatan luas permukaan, sehingga mendukung efisiensi nutrisi tanaman di kondisi kering. Tingkat percabangan dan panjang akar lateral menjadi indikator utama efektivitas sistem perakaran dalam mendukung penyerapan air dan nutrisi (Yu et al., 2016; De Bauw et al., 2020). Fungsi sistem perakaran sangat dipengaruhi oleh interaksi dinamis dengan lingkungan tumbuh, termasuk ketersediaan air, tekstur tanah, dan kehadiran mikroorganisme, sehingga keseluruhan arsitektur akar memegang peran penting dalam adaptasi tanaman terhadap cekaman kekeringan (Freschet et al., 2021; Ranjan et al., 2022). Sementara itu, akar adventif yang tumbuh dari ruas batang memiliki dua bentuk utama, yaitu akar pangkal batang (crown root) dan akar penyangga (brace root). Akar pangkal batang berkembang dari ruas bawah dekat permukaan tanah dan berperan penting dalam penyerapan air serta hara, sedangkan akar penyangga tumbuh dari ruas batang bagian atas lalu masuk ke tanah, memberikan tambahan penopang mekanis sekaligus mendukung suplai air dan hara pada fase pertumbuhan lanjut. Efektivitas sifat akar tertentu, seperti rambut akar yang memperluas bidang serapan air, juga sangat dipengaruhi oleh keseluruhan arsitektur sistem perakaran (Rongsawat et al., 2021) Steffens & Rasmussen, 2016).

Pada sorgum, arsitektur sistem perakaran (root system architecture/RSA) menampilkan kombinasi sistem akar serabut khas monokotil dengan kemampuan penetrasi yang dalam. Kedalaman akar menjadi strategi utama dalam menghadapi cekaman kekeringan, karena memungkinkan tanaman menjangkau cadangan air di lapisan tanah bawah yang tidak terjangkau oleh akar dangkal. Chen et al., (2020) melaporkan bahwa akar yang berkembang di bawah kedalaman 30 cm berperan penting dalam mempertahankan aktivitas fotosintesis, akumulasi biomassa, dan hasil panen ketika lapisan permukaan mengalami defisit air. Sementara itu, akar lateral yang bercabang dari akar primer berfungsi memperluas area penyerapan melalui peningkatan luas permukaan kontak dengan tanah. Jumlah, panjang, serta tingkat percabangan akar lateral menjadi indikator utama efektivitas sistem perakaran dalam mendukung penyerapan air dan hara, terutama di lapisan tanah menengah yang masih menyimpan kelembaban pada kondisi kering (Yu et al., 2016). Dengan demikian, strategi kombinasi antara kedalaman akar yang kuat dan distribusi lateral yang luas merupakan dasar bagi ketahanan sorgum terhadap cekaman kekeringan. Namun, efektivitas strategi ini tidak hanya ditentukan oleh jumlah dan panjang akar, melainkan juga oleh arah pertumbuhannya. Sudut perakaran menjadi faktor penentu distribusi spasial akar, yang secara langsung mempengaruhi akses tanaman terhadap

cadangan air pada kedalaman berbeda dan kemampuan memanfaatkan kelembaban tanah yang bersifat sementara di lapisan atas.

Sudut perakaran juga merupakan komponen penting yang menentukan arah pertumbuhan akar. Akar dengan sudut curam mendorong penetrasi lebih dalam untuk mengakses cadangan air di lapisan bawah tanah, sedangkan akar dengan sudut mendatar lebih efektif dalam memanfaatkan curah hujan sesaat yang tersimpan di lapisan tanah dangkal (Lynch, 2019). Variasi genetik pada sifat ini telah dilaporkan signifikan, terutama dalam sudut akar, panjang akar, dan diameter akar halus yang berkontribusi langsung terhadap produktivitas sorgum pada kondisi kering (Demissie et al., 2023). Secara khusus, akar dengan diameter kecil, panjang spesifik akar tinggi, dan densitas panjang akar besar di lapisan tanah dalam terbukti mendukung keberlanjutan pertumbuhan pada cekaman air (Comas et al., 2013). Bukti empiris lebih lanjut menunjukkan bahwa genotipe sorgum dengan sudut akar sempit atau curam mampu menembus lapisan tanah lebih dalam sehingga meningkatkan akses terhadap cadangan air, yang pada akhirnya menghasilkan produktivitas biji lebih tinggi di bawah cekaman kekeringan (Tamir et al., 2021). Kombinasi strategi kedalaman, panjang lateral, sudut perakaran, dan karakter akar halus ini membentuk suatu arsitektur akar yang adaptif, sehingga sorgum mampu menyeimbangkan eksplorasi air di lapisan tanah dangkal dan dalam. Dengan demikian, pemahaman morfologi RSA sorgum memperlihatkan bahwa tanaman ini memiliki fleksibilitas adaptasi struktural yang penting untuk mempertahankan pertumbuhan dan hasil pada kondisi kering.

Respon Fisiologis dan Molekuler RSA Sorgum terhadap Kekeringan

Arsitektur sistem perakaran (RSA) sorgum tidak hanya penting dari sisi morfologi, tetapi juga memiliki peran yang sangat krusial dari perspektif fisiologis. Secara fisiologis, akar berfungsi sebagai organ utama untuk mendeteksi dan merespons stres kekeringan, bertindak sebagai sensor awal kondisi lingkungan tanah dan sekaligus sebagai mediator adaptasi tanaman. Dalam menghadapi defisit air, akar mampu menyesuaikan pertumbuhan dan arah elongasi, memperkuat diferensiasi sel pada zona pertumbuhan, serta menyesuaikan aktivitas metabolisme untuk mempertahankan efisiensi penyerapan air dan nutrisi. Selain itu, akar dapat mengatur aktivitas transportasi ion dan osmolit di dalam sel untuk menjaga homeostasis, meningkatkan kemampuan akumulasi prolin, gula terlarut, dan senyawa osmotik lain yang membantu mempertahankan turgor sel serta stabilitas volume jaringan. Kemampuan adaptif ini tidak hanya mencegah kerusakan jaringan akibat dehidrasi, tetapi juga memastikan bahwa akar tetap mampu mendukung fungsi fisiologis organ atas, termasuk transportasi air dan unsur hara, sehingga fotosintesis dan metabolisme tanaman dapat terus berlangsung meski kondisi kekeringan. Dengan demikian, akar berperan ganda: sebagai organ pengambilan sumber daya dan sebagai pusat koordinasi fisiologis yang menjaga kelangsungan hidup, pertumbuhan, dan kesiapan tanaman dalam menghadapi kondisi kekeringan yang berkepanjangan.

Mekanisme fisiologis yang mendasari respon RSA sorgum terhadap kekeringan melibatkan berbagai proses yang saling terkait dan saling mendukung, yang memungkinkan akar mempertahankan fungsi penyerapan air dan nutrisi sekaligus melindungi jaringan dari kerusakan akibat stres. Pertama, akar mampu mengatur tekanan

osmotik melalui akumulasi senyawa osmolit, seperti prolin dan gula terlarut, yang berfungsi mempertahankan turgor sel, stabilitas volume jaringan, serta integritas membran dan organel, sehingga metabolisme seluler dapat terus berjalan meski tanaman mengalami defisit air. Kedua, akar mengendalikan produksi spesies oksigen reaktif (ROS), yang jika berlebihan dapat menyebabkan stres oksidatif, kerusakan membran, degradasi protein, dan gangguan fungsi seluler. Pengendalian ROS ini membantu menjaga homeostasis seluler dan mencegah kerusakan jaringan akar yang kritis bagi penyerapan air. Ketiga, sistem antioksidan diaktifkan, termasuk enzim-enzim seperti superoksida dismutase, peroksidase, dan polifenol oksidase, yang bekerja secara sinergis untuk menetralkan radikal bebas dan melindungi jaringan akar dari kerusakan oksidatif, sekaligus mendukung kontinuitas proses metabolisme dan pertumbuhan akar. Interaksi kompleks antara akumulasi osmolite, pengendalian ROS, dan aktivasi sistem antioksidan ini memastikan bahwa akar sorgum tetap mampu berfungsi optimal dalam kondisi kekeringan, mempertahankan kelangsungan fisiologisnya, dan memfasilitasi transportasi air serta nutrisi ke bagian udara tanaman, sehingga pertumbuhan vegetatif dan kemampuan reproduktif tetap terjaga (Li et al., 2020).

Respons fisiologis akar yang kompleks ini pada akhirnya mendukung kelancaran metabolisme tanaman secara keseluruhan. Dengan akar yang tetap aktif dan terlindungi, transportasi air dan nutrisi ke bagian udara tanaman tetap berlangsung secara efisien, sehingga fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif dapat terus berlangsung meski kondisi tanah kering. Selain itu, adaptasi fisiologis ini memungkinkan sorgum untuk menunda atau mengurangi efek merugikan kekeringan pada organ generatif, sehingga peluang bertahan hidup dan produktivitas biji tetap terjaga. Dengan demikian, akar tidak hanya berperan sebagai organ penyerapan, tetapi juga sebagai organ sensorik dan eksekutor adaptasi terhadap stres lingkungan, membentuk dasar penting bagi pemahaman arsitektur sistem perakaran sorgum pada kondisi lahan kering.

Selain mekanisme fisiologis yang bersifat seluler, regulasi hormonal juga memainkan peran sentral dalam menyesuaikan arsitektur sistem perakaran (RSA) sorgum pada kondisi kekeringan. Tanaman mengarahkan pertumbuhan akar primer ke lapisan tanah yang lebih dalam untuk memperoleh cadangan air, sementara percabangan lateral dikurangi agar distribusi energi lebih efisien; proses ini dikendalikan oleh dinamika hormonal, terutama asam absisat (ABA) yang mengatur elongasi akar dan distribusi auksin pada zona pertumbuhan, memediasi diferensiasi sel, dan mengkoordinasikan respon metabolik seluler terhadap defisit air (Aslam et al., 2022). Pada sorgum, interaksi kompleks antara ABA, giberelin, dan etilen menentukan keseimbangan antara pertumbuhan akar primer yang menembus kedalaman tanah dan percabangan lateral yang memperluas area eksplorasi. ABA mendorong elongasi akar primer ke lapisan tanah lebih dalam, memungkinkan tanaman mengakses cadangan air yang tidak tersedia di permukaan, sementara giberelin dan etilen mengatur pertumbuhan lateral; giberelin merangsang perpanjangan lateral jika diperlukan, sedangkan etilen menahan pertumbuhan lateral agar energi tanaman tetap difokuskan pada penetrasi akar primer. Sinergi hormonal ini tidak hanya mengarahkan pertumbuhan fisik akar, tetapi juga mempengaruhi efisiensi metabolisme seluler, termasuk pengaturan tekanan osmotik melalui akumulasi osmolit, kontrol produksi spesies oksigen reaktif (ROS), dan aktivasi sistem antioksidan, sehingga akar mampu mempertahankan turgor, stabilitas volume sel, dan fungsi metabolik meski

mengalami defisit air. Distribusi energi yang seimbang antara akar primer dan lateral memastikan penyerapan air dari berbagai lapisan tanah optimal tanpa mengorbankan metabolisme atau kapasitas penyerapan nutrisi. Dengan demikian, akar sorgum mampu mempertahankan aktivitas fisiologisnya secara berkelanjutan, melindungi sel terhadap stres oksidatif, dan mengoptimalkan transportasi air serta nutrisi ke bagian udara tanaman, sehingga pertumbuhan vegetatif dan generatif tetap terjaga, meningkatkan peluang bertahan hidup, dan menjaga produktivitas meski menghadapi defisit air yang berkepanjangan (Wang et al., 2025).

Secara molekuler, respon arsitektur sistem perakaran sorgum terhadap kekeringan dikendalikan oleh ekspresi gen dan faktor transkripsi yang mengatur pembentukan, pertumbuhan, dan diferensiasi akar. Salah satu faktor transkripsi kunci adalah SbNAC9, yaitu protein regulator yang mengenali urutan DNA spesifik pada promotor gen target dan mengaktifkan atau menekan ekspresi gen-gen tersebut. Gen-gen yang dikendalikan oleh SbNAC9 meliputi gen yang terkait dengan pertumbuhan akar primer, pembentukan akar lateral, akumulasi osmolit, dan mekanisme pertahanan terhadap stres oksidatif. Dengan demikian, SbNAC9 bertindak sebagai “saklar molekuler” yang menyalakan jalur fisiologis dan struktural akar untuk menghadapi defisit air. Overekspresi SbNAC9 telah terbukti meningkatkan panjang akar primer, jumlah akar lateral, dan kapasitas eksplorasi tanah secara keseluruhan, sehingga memperkuat adaptasi terhadap kekeringan. Sebaliknya, penekanan atau down regulasi ekspresi SbNAC9 menyebabkan penurunan vigor perakaran, ditandai oleh berkurangnya panjang dan jumlah akar, menurunnya kemampuan akar menembus horizon tanah yang lebih dalam, serta berkurangnya kapasitas penyerapan air. Kondisi ini membuat tanaman lebih rentan terhadap kekurangan air karena sistem perakarannya menjadi kurang efisien dalam mengeksplorasi cadangan air di lapisan tanah bawah (Jin et al., 2023).

4. Simpulan

Arsitektur akar sorgum berperan sentral dalam adaptasi terhadap kekeringan melalui kombinasi mekanisme morfologi, fisiologi, dan molekuler. Kedalaman akar, distribusi lateral, sudut perakaran, dan interaksi dengan mikroorganisme rhizosfer meningkatkan efisiensi penyerapan air dan nutrisi. Regulasi hormonal (ABA, giberelin, etilen) mengoptimalkan pertumbuhan akar primer dan lateral, sedangkan faktor transkripsi seperti SbNAC9 mengoordinasikan ekspresi gen terkait pertumbuhan akar, akumulasi osmolit, dan pertahanan stres oksidatif. Sinergi mekanisme ini memungkinkan sorgum mempertahankan pertumbuhan vegetatif, fotosintesis, dan produktivitas biji pada kondisi kekeringan. Pemahaman terpadu mengenai RSA ini menyediakan landasan strategis untuk program pemuliaan dan pengembangan varietas sorgum tahan kekeringan.

5. Referensi

- Ali, A. E. E., Sharp, R. E., Greeley, L., Peck, S. C., Tabb, D. L., & Ludidi, N. (2025). Proteomic dataset of sorghum leaf and root responses to single and combined drought and heat stress. *Scientific Data*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04369-2>
- Aslam, M. M., Waseem, M., Jakada, B. H., Okal, E. J., Lei, Z., Sohaib, H., Saqib, A., Yuan, W., Xu, W., & Zhang, Q. (2022). *Mechanisms of Abscisic Acid-Mediated Drought Stress Responses in Plants*. <https://doi.org/10.3390/10.3390/ijms23031084>

- Chen, X., Wu, Q., Gao, Y., Zhang, J., Wang, Y., Zhang, R., Zhou, Y., Xiao, M., Xu, W., & Huang, R. (2020). The role of deep roots in sorghum yield production under drought conditions. *Agronomy*, *10*(4). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10040611>
- Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 4, Issue NOV). Frontiers Research Foundation. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- De Bauw, P., Mai, T. H., Schnepf, A., Merckx, R., Smolders, E., & Vanderborgh, J. (2020). A functional-structural model of upland rice root systems reveals the importance of laterals and growing root tips for phosphate uptake from wet and dry soils. *Annals of Botany*, *126*(4), 789–806. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa120>
- Demissie, H. S., Mindaye, T. T., Teklu, D. N., & Kebede, F. G. (2023). Root system architecture analysis of sorghum genotypes and its effect on drought adaptation. *Rhizosphere*, *27*. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100772>
- Djanaguiraman, M., Gowsiga, S., Govindaraj, M., Habyarimana, E., Senthil, A., Thavaprakash, N., Jeyakumar, P., Kokilavani, J., & Chellammal, C. (2024). Impact of root architecture and transpiration rate on drought tolerance in stay-green sorghum. *Crop Science*, *64*(5), 2612–2629. <https://doi.org/10.1002/csc2.21108>
- Feng, X., Jia, L., Cai, Y., Guan, H., Zheng, D., Zhang, W., Xiong, H., Zhou, H., Wen, Y., Hu, Y., Zhang, X., Wang, Q., Wu, F., Xu, J., & Lu, Y. (2022). ABA-inducible DEEPER ROOTING 1 improves adaptation of maize to water deficiency. *Plant Biotechnology Journal*, *20*(11), 2077–2088. <https://doi.org/10.1111/pbi.13889>
- Freschet, G. T., Pagès, L., Iversen, C. M., Comas, L. H., Rewald, B., Roumet, C., Klimešová, J., Zadworny, M., Poorter, H., Postma, J. A., Adams, T. S., Bagniewska-Zadworna, A., Bengough, A. G., Blancaflor, E. B., Brunner, I., Cornelissen, J. H. C., Garnier, E., Gessler, A., Hobbie, S. E., ... McCormack, M. L. (2021). A starting guide to root ecology: strengthening ecological concepts and standardising root classification, sampling, processing and trait measurements. In *New Phytologist* (Vol. 232, Issue 3, pp. 973–1122). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/nph.17572>
- Frew, A. (2023). Water availability alters the community structure of arbuscular mycorrhizal fungi and determines plant mycorrhizal benefit. *Plants People Planet*, *5*(5), 683–689. <https://doi.org/10.1002/ppp3.10372>
- Jin, X., Zheng, Y., Wang, J., Chen, W., Yang, Z., Chen, Y., Yang, Y., Lu, G., & Sun, B. (2023). SbNAC9 Improves Drought Tolerance by Enhancing Scavenging Ability of Reactive Oxygen Species and Activating Stress-Responsive Genes of Sorghum. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(3). <https://doi.org/10.3390/ijms24032401>
- Kalra, A., Goel, S., & Elias, A. A. (2024). Understanding role of roots in plant response to drought: Way forward to climate-resilient crops. In *Plant Genome* (Vol. 17, Issue 1). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20395>
- Li, H., Li, Y., Ke, Q., Kwak, S. S., Zhang, S., & Deng, X. (2020). Physiological and differential proteomic analyses of imitative drought stress response in sorghum bicolor root at the seedling stage. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(23), 1–28. <https://doi.org/10.3390/ijms21239174>
- Lynch, J. P. (2019). Root phenotypes for improved nutrient capture: an underexploited opportunity for global agriculture. In *New Phytologist* (Vol. 223, Issue 2, pp. 548–564). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.15738>
- Maqbool, S., Hassan, M. A., Xia, X., York, L. M., Rasheed, A., & He, Z. (2022). Root system architecture in cereals: progress, challenges and perspective. In *Plant Journal* (Vol. 110, Issue 1, pp. 23–42). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/tbj.15669>
- Meister, R., Rajani, M. S., Ruzicka, D., & Schachtman, D. P. (2014). Challenges of modifying root traits in crops for agriculture. In *Trends in Plant Science* (Vol. 19, Issue 12, pp. 779–788). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.08.005>
- Mirzabaev, A., Bezner Kerr, R., Hasegawa, T., Pradhan, P., Wreford, A., Cristina Tirado von der Pahlen, M., & Gurney-Smith, H. (2023). Severe climate change risks to food security and nutrition. *Climate Risk Management*, *39*. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100473>
- Pixley, K. V., Cairns, J. E., Lopez-Ridaura, S., Ojiewo, C. O., Dawud, M. A., Drabo, I., Mindaye, T., Nebie, B., Asea, G., Das, B., Daudi, H., Desmae, H., Batieno, B. J., Boukar, O., Mukankusi, C. T. M.,

- Nkalubo, S. T., Hearne, S. J., Dhugga, K. S., Gandhi, H., ... Zepeda-Villarreal, E. A. (2023). Redesigning crop varieties to win the race between climate change and food security. In *Molecular Plant* (Vol. 16, Issue 10, pp. 1590–1611). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.09.003>
- Putri Andini Mandasari, Wirnas, D., Trikoesoemaningtyas, & Sopandie, D. (2020). Perbedaan Tanggapan Morfologi Akar Galur Inbrida Sorgum pada Kondisi P Rendah. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 48(1), 30–36. <https://doi.org/10.24831/jai.v48i1.29894>
- Ranjan, A., Sinha, R., Singla-Pareek, S. L., Pareek, A., & Singh, A. K. (2022). Shaping the root system architecture in plants for adaptation to drought stress. *Physiologia Plantarum*, 174(2). <https://doi.org/10.1111/ppl.13651>
- Reich, M. (2017). The significance of nutrient interactions for crop yield and nutrient use efficiency. In *Plant Macronutrient Use Efficiency: Molecular and Genomic Perspectives in Crop Plants* (pp. 65–82). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811308-0.00004-1>
- Rongsawat, T., Peltier, J. B., Boyer, J. C., Véry, A. A., & Sentenac, H. (2021). Looking for Root Hairs to Overcome Poor Soils. In *Trends in Plant Science* (Vol. 26, Issue 1, pp. 83–94). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.09.001>
- Savari, M., Eskandari Damaneh, H., & Eskandari Damaneh, H. (2024). Managing the effects of drought through the use of risk reduction strategy in the agricultural sector of Iran. *Climate Risk Management*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100619>
- Steffens, B., & Rasmussen, A. (2016). The physiology of adventitious roots. *Plant Physiology*, 170(2), 603–617. <https://doi.org/10.1104/pp.15.01360>
- Tamir, H. D., Menamo, T. M., & Mindaye, T. T. (2021). *Root system architecture traits diversity and association with grain yield for drought adapted sorghum genotypes*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-617280/v1>
- Wang, M., Ahmad, I., Hussien Ibrahim, M., Qin, B., Zhu, H., Zhu, G., & Zhou, G. (2025). Differential Responses of Two Sorghum Genotypes to Drought Stress at Seedling Stage Revealed by Integrated Physiological and Transcriptional Analysis. *Agriculture*, 15(16), 1780. <https://doi.org/10.3390/agriculture15161780>
- Ye, H., Roorkiwal, M., Valliyodan, B., Zhou, L., Chen, P., Varshney, R. K., & Nguyen, H. T. (2018). Genetic diversity of root system architecture in response to drought stress in grain legumes. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 69, Issue 13, pp. 3267–3277). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/jxb/ery082>
- Yu, P., Gutjahr, C., Li, C., & Hochholdinger, F. (2016). Genetic Control of Lateral Root Formation in Cereals. In *Trends in Plant Science* (Vol. 21, Issue 11, pp. 951–961). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.07.011>
- Zhang, Y., Wu, X., Wang, X., Dai, M., & Peng, Y. (2025). Crop root system architecture in drought response. In *Journal of Genetics and Genomics* (Vol. 52, Issue 1, pp. 4–13). Institute of Genetics and Developmental Biology. <https://doi.org/10.1016/j.jgg.2024.05.001>