

Optimalisasi Strategi Pengendalian Akar Pohon untuk Mencegah Kerusakan Perkerasan di Banda Aceh

Ria Purnama¹, Sahlan Zuliansyah², Sri Batara², Nurfajri Arisaputri⁴

¹Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

^{2,3}Peneliti Independen, Indonesia

⁴Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Indonesia

Email: ria.purnama@usk.ac.id, sahlan.zuliansyah@gmail.com, sribatara@usk.ac.id

Abstract. *Damage to urban infrastructure such as roads, sidewalks, and drainage systems caused by tree root growth has become a significant challenge in the development of infrastructure and green open spaces in developing cities like Banda Aceh. This study aims to identify urban infrastructure damage related to tree roots, as well as strategies for tree planting and maintenance, particularly related to root control, that can address these issues. The employed methods include field observations and documentation at few urban locations experiencing pavement damage, as well as literature review and analysis of proven root management practices that consistently and comprehensively solve these problems. Field observations revealed that aggressive tree root growth resulting from improper planting and maintenance techniques, coupled with a lack of root control strategies, is a major cause of pavement damage in urban areas of Banda Aceh. Based on studies of tree root control practices in developed cities worldwide, several solutions were identified that could be adapted, including selecting non-invasive plant species, implementing appropriate watering and planting distances, and utilizing root mitigation technologies such as tree pits, tree trenches, root barriers, and structural soils.*

Keywords: *Urban vegetation, pavement damage, tree roots, Banda Aceh*

Abstrak. *Kerusakan infrastruktur perkotaan seperti jalan, trotoar, dan drainase akibat pertumbuhan akar pohon menjadi tantangan besar dalam pembangunan infrastruktur dan ruang terbuka hijau di kota yang sedang berkembang seperti Banda Aceh. Studi ini dilakukan untuk mengidentifikasi kerusakan infrastruktur perkotaan terkait akar pohon, serta strategi penanaman dan perawatan pohon, terutama terkait pengendalian akar, yang dapat menyelesaikan persoalan tersebut. Metode yang digunakan meliputi observasi dan dokumentasi lapangan di beberapa titik kota yang mengalami kerusakan perkerasan, serta studi dan analisis literatur terhadap praktik manajemen akar yang terbukti mampu menyelesaikan permasalahan tersebut secara konsisten dan komprehensif. Hasil pengamatan lapangan menunjukkan bahwa pertumbuhan akar pohon yang agresif akibat teknik penanaman dan perawatan pohon yang belum tepat serta minimnya strategi pengendalian akar menjadi penyebab utama kerusakan perkerasan di kawasan urban Banda Aceh. Berdasarkan studi terhadap praktik pengendalian akar pohon pada kota-kota maju di dunia, ditemukan beberapa solusi yang dapat diadaptasi, meliputi pemilihan tanaman non-invasif, penggunaan teknik penyiraman dan jarak tanam yang tepat, serta penggunaan teknologi mitigasi akar seperti tree pit, tree trench, root barrier, dan structural soil.*

Kata Kunci: *Vegetasi kota, kerusakan perkerasan, akar pohon, Banda Aceh*

Received : 2025-03-04 | Published : 2024-06-30 | DOI [10.22373/jial.v2i2](https://doi.org/10.22373/jial.v2i2) | Page: 19 – 33

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Pertumbuhan kota-kota di Indonesia, termasuk Banda Aceh, telah mendorong peningkatan ruang terbuka hijau (RTH) sebagai bagian dari strategi pembangunan berkelanjutan. Penanaman pohon di kawasan perkotaan tidak hanya berfungsi sebagai elemen estetika, tetapi juga berperan penting dalam meningkatkan kualitas udara, mengurangi efek pulau panas perkotaan (*urban heat island* – UHI), serta menciptakan kenyamanan termal bagi masyarakat (Nowak dkk., 2006; Bowler dkk., 2010; Dimoudi & Nikolopoulou, 2003; Meutia dkk., 2023). Namun demikian, praktik penanaman vegetasi ini sering kali belum disertai dengan perencanaan teknis yang memadai, terutama terkait dampak akar pohon terhadap infrastruktur perkerasan seperti trotoar, jalan, dan sistem drainase.

Di Banda Aceh, kerusakan perkerasan akibat penetrasi akar pohon merupakan masalah yang umum dijumpai. Permasalahan tersebut dapat dilihat di beberapa kawasan, termasuk di sekitar Blang Padang, Taman Sari, dan kampus Universitas Syiah Kuala, di mana pertumbuhan akar pohon yang tidak terkendali, mengakibatkan kerusakan pada permukaan jalan dan trotoar, hingga merusak jaringan drainase. Beberapa hal yang dapat diidentifikasi sebagai penyebab bagi permasalahan ini mencakup pemilihan jenis tanaman yang kurang tepat, teknik penanaman yang belum optimal, serta absennya sistem *root management* (pengendalian akar). Permasalahan ini tidak hanya mengurangi nilai estetika kota, tetapi juga membahayakan keselamatan pengguna jalan dan meningkatkan biaya pemeliharaan infrastruktur.

1.2. Tujuan

Penelitian ini bertujuan mengkaji kondisi penanaman pohon di kawasan perkotaan Banda Aceh dan menganalisis dampaknya terhadap kerusakan infrastruktur. Selain itu, penelitian menelaah praktik internasional dalam manajemen vegetasi perkotaan yang dapat diadaptasi sesuai dengan karakteristik lingkungan dan kapasitas lokal. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan strategi penanaman yang mendukung keberlanjutan vegetasi sekaligus meningkatkan ketahanan infrastruktur di kawasan urban.

Secara eksplisit, beberapa pertanyaan penelitian yang diajukan adalah sebagai berikut:

- Bagaimana kondisi penanaman pohon di Banda Aceh dan dampaknya terhadap kerusakan infrastruktur perkotaan?
- Faktor apa saja yang berkontribusi terhadap kerusakan infrastruktur akibat pertumbuhan akar pohon?
- Praktik mitigasi dan manajemen vegetasi seperti apa yang telah diterapkan secara internasional dan dapat diadaptasi di Banda Aceh?

1.3. Tinjauan Pustaka

Dalam konteks Banda Aceh sebagai sebuah kota yang sedang berkembang, strategi penanaman vegetasi harus dioptimalkan untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan ekologi dan keberlanjutan infrastruktur. Beberapa kota maju di dunia telah mengembangkan pendekatan teknis yang komprehensif dalam mengatasi kerusakan infrastruktur akibat pertumbuhan akar pohon. Kota-kota seperti New York (Amerika Serikat) dan London (Inggris) telah menerapkan teknologi seperti *tree pit* (lubang tanam pohon dengan desain khusus), *root barrier* (penghalang akar), *structural soil* (media tanam yang mendukung pertumbuhan akar tanpa merusak permukaan), *tree trench* (parit akar yang memperluas ruang tumbuh akar), serta sistem drainase terpadu yang dapat mengelola air secara efisien (Rahman et al., 2017; James et al., 2014; Coutts et al., 2013).

Terlepas dari perbedaan kondisi iklim, sosial dan ekonomi di antara kota-kota maju yang menjadi sumber rujukan dan Banda Aceh yang saat ini masih berstatus kota berkembang, hasil studi ini diharapkan mampu memberi gambaran dan inspirasi perihal teknologi dan pendekatan yang telah terbukti efektif, baik secara teknis dan manajerial. Dengan catatan, adaptasi solusi tersebut tetap perlu

mempertimbangkan karakteristik lingkungan tropis, kapasitas kelembagaan, serta aspek sosial-ekonomi lokal agar sesuai dan berkelanjutan (Vogt et al., 2015; Livesley et al., 2016).

2. Metodologi

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif, dengan studi kasus di Banda Aceh, demi mencapai tujuan penelitian berupa identifikasi dan analisis terhadap kerusakan perkerasan yang disebabkan oleh pertumbuhan akar pohon di kawasan urban sebuah kota yang sedang berkembang, serta strategi mitigasi yang telah diterapkan secara menyeluruh dan berkesinambungan pada kota-kota maju di dunia yang dapat diadaptasi dan terapkan secara berkelanjutan.

Terkait identifikasi dampak akar pohon terhadap kerusakan infrastruktur urban di Banda Aceh, pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan dan dokumentasi visual. Di sisi lain, telaah pustaka dilakukan untuk mempelajari praktik manajemen vegetasi urban dari kota-kota maju seperti New York, Los Angeles, London, Berlin, serta Singapura. Pemilihan kota-kota ini didasarkan pada ketersediaan dokumentasi dan studi ilmiah, yang mengindikasikan bahwa penerapan teknologi manajemen akar pohon telah diterapkan secara sistematis, komprehensif dan konsisten pada kawasan tersebut.

2.2. Lokasi Penelitian

Penelitian ini mengambil tiga lokasi studi kasus di Banda Aceh berdasarkan tiga kriteria utama, yaitu: (1) tingginya akses publik sebagai representasi kawasan perkotaan yang aktif digunakan masyarakat, (2) terdapat pohon yang relatif tinggi sehingga memungkinkan dampak akar pohon terhadap infrastruktur terlihat jelas, dan (3) terdapat kerusakan perkerasan akibat penetrasi akar pohon yang dapat diidentifikasi dengan jelas.

Adapun tiga lokasi yang dimaksud meliputi:

1. **Kawasan Blang Padang:** merupakan Ruang Terbuka Hijau (RTH) berukuran paling besar di Banda Aceh, sekitar 8 Hektar, berada di pusat Kota Banda Aceh. Taman kota ini didominasi oleh lapangan rumput. Di dalamnya terdapat fasilitas olahraga, kuliner, dan ibadah. Blang Padang dikelilingi jalan dengan jalur pedestrian yang dilengkapi pepohonan sebagai vegetasi peneduh.
2. **Kawasan Taman Sari:** merupakan Ruang Terbuka Hijau (RTH) yang langsung berbatasan dengan Balai Kota Banda Aceh. Meskipun tidak seluas Blang Padang, Taman Sari juga cukup populer dan sering digunakan untuk menggelar berbagai event. Di dalamnya terdapat berbagai fasilitas untuk rekreasi, olahraga, hiburan, bermain anak, dan sebagainya. Taman ini juga dikelilingi jalan yang dilengkapi pepohonan sebagai vegetasi peneduh.
3. **Kawasan Kampus Universitas Syiah Kuala:** merupakan kawasan kampus terluas dan tertua di Banda Aceh, dilengkapi berbagai fasilitas pendidikan, ruang terbuka hijau, olah raga, ibadah, kesehatan, dan lain sebagainya, yang dihubungkan oleh jaringan jalan dengan peneduh berupa pohon-pohon besar seperti Trembesi, Cemara, dan Angsana.

2.3. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan dua teknik pengumpulan data utama, yaitu (1) observasi lapangan untuk memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai kerusakan infrastruktur perkotaan akibat pertumbuhan akar pohon di Banda Aceh, dan (2) studi literatur untuk mengetahui strategi yang telah diterapkan dan berhasil dalam menyelesaikan persoalan terkait kerusakan infrastruktur perkotaan akibat pertumbuhan akar pohon di beberapa kota maju.

(1) Observasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan secara kualitatif pada tiga kawasan perkotaan yang dipilih, yaitu Blang Padang, Taman Sari, dan Kampus Universitas Syiah Kuala. Observasi ini bertujuan untuk

mengidentifikasi kondisi perkerasan yang terdampak oleh pertumbuhan akar pohon. Beberapa aspek yang diamati meliputi:

- **Jenis pohon dominan** yang tumbuh di sepanjang jalur pedestrian dan sekitar perkerasan jalan.
- **Pola pertumbuhan akar** (misalnya: apakah akar dominan berada di permukaan, menembus lapisan aspal, atau merusak drainase).
- **Kerusakan perkerasan** yang dapat diamati secara visual, seperti keretakan, material yang terangkat, atau permukaan yang tidak rata.
- **Fungsi kawasan** (misalnya taman rekreasi, jalur pedestrian, area kampus) serta aktivitas masyarakat yang menggunakan ruang publik tersebut (misalnya olahraga, rekreasi, atau kegiatan sosial).

Aspek-aspek tersebut diamati untuk mendapatkan pemahaman yang lebih dalam mengenai hubungan antara vegetasi perkotaan dan kerusakan infrastruktur. Dokumentasi visual (foto) juga dilakukan untuk mendukung temuan observasi.

(2) Studi Literatur

Selain observasi lapangan, penelitian ini juga melakukan kajian literatur terhadap studi internasional mengenai strategi mitigasi akar pohon yang telah diterapkan secara efektif di beberapa kota maju. Beberapa teknologi yang dikaji meliputi penggunaan *tree pit* (lubang tanam pohon) (Rahman et al., 2017), *root barrier* (penghalang akar) (Rahman et al., 2013), *structural soil* (media tanam struktural) (Grabosky & Bassuk, 1995), *tree trench* (parit akar pohon) (Smiley, 2008), serta sistem drainase terpadu (Gilman, 1990). Kajian literatur ini bertujuan untuk memperoleh pembelajaran yang dapat diadaptasi secara kontekstual pada kondisi Banda Aceh.

2.4. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari observasi lapangan dan studi literatur kemudian dianalisis secara deskriptif. Teknik analisis yang digunakan adalah sebagai berikut:

(1) Analisis Kualitatif

Data hasil observasi berupa dokumentasi visual terhadap kerusakan infrastruktur jalan dianalisis secara kualitatif guna mengidentifikasi faktor-faktor penyebab serta implikasi dari pertumbuhan akar pohon yang tidak terkendali di kawasan perkotaan.

(2) Analisis Komparatif

Penelitian ini kemudian membandingkan teknik mitigasi akar yang diterapkan di kota-kota di Amerika dan Eropa dengan kondisi di Banda Aceh. Perbandingan ini akan dilakukan dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti jenis pohon, kondisi tanah, dan infrastruktur yang ada. Teknik mitigasi yang terbukti efektif di kota-kota tersebut akan diadaptasi dan diterapkan dalam konteks Banda Aceh.

2.4. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari observasi lapangan dan studi literatur dianalisis secara deskriptif. Teknik analisis yang digunakan meliputi:

(1) Analisis Kualitatif

Observasi lapangan dan dokumentasi visual berupa foto dilakukan pada tiga kawasan utama di Banda Aceh, yaitu Blang Padang, Taman Sari, dan Kampus Universitas Syiah Kuala, untuk merekam kondisi kerusakan infrastruktur akibat pertumbuhan akar pohon. Pendekatan ini dianggap memadai mengingat kerusakan yang diamati merupakan proses jangka panjang yang tidak berubah secara signifikan dalam waktu singkat (Creswell, 2014; Merriam & Tisdell, 2015).

(2) Analisis Komparatif

Perbandingan dilakukan untuk memahami kesesuaian terkait upaya mengadaptasi teknologi mitigasi akar pohon yang telah diterapkan di kota-kota maju yang menjadi rujukan dengan kondisi di Banda Aceh. Teknik mitigasi yang terbukti efektif akan dievaluasi terkait kemungkinannya untuk adaptasi di konteks lokal (Yin, 2018; Rahman et al., 2017). Perbandingan ini mempertimbangkan faktor-faktor seperti ketersediaan teknologi, keterampilan tenaga kerja, serta dana.

3. Hasil & Pembahasan

3.1. Identifikasi Kerusakan Perkerasan Akibat Akar Pohon di Banda Aceh

Penanaman pohon di perkotaan sering menghadapi masalah terkait dengan pertumbuhan akar yang merusak perkerasan jalan, trotoar, dan fasilitas publik lainnya. Pertumbuhan akar pohon yang tidak terkendali dapat mengangkat perkerasan, menyebabkan retakan, dan meningkatkan biaya pemeliharaan infrastruktur. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Perry dan Coe (2016), akar pohon jenis tertentu dapat tumbuh dengan agresif, terutama saat mencari air dan nutrisi, sehingga menyebabkan kerusakan pada permukaan beton atau aspal. Pohon dari genus *Ficus* dan *Pterocarpus*, dengan sistem akar yang kuat dan invasif, diidentifikasi sebagai salah satu penyebab umum kerusakan trotoar di area perkotaan (Perry & Coe, 2016).

Berdasarkan observasi lapangan yang dilakukan di beberapa kawasan perkotaan di Banda Aceh, ditemukan bahwa pertumbuhan akar yang invasif telah mengakibatkan kerusakan perkerasan jalan dan trotoar. Hal ini menjadi masalah signifikan, terutama di kawasan Taman Sari dan Kampus Universitas Syiah Kuala, yang tidak hanya mengganggu lalu-lintas kendaraan dan pejalan kaki, tetapi juga, di beberapa kasus, merusak sistem drainase.

Sementara itu, permukaan perkerasan pada kawasan Blang Padang saat ini terlihat dalam kondisi relatif baik. Namun demikian, hal ini bukan karena keberhasilan manajemen akar pohon, melainkan karena pemerintah kota telah menambah lapisan perkerasan baru di atas perkerasan lama yang sudah rusak. Lapisan tambahan ini membuat permukaan trotoar menjadi lebih tebal, sehingga akar pohon yang sebelumnya merusak perkerasan kini tertutup. Dengan demikian, potensi kerusakan di masa mendatang masih tetap ada, karena akar pohon tetap aktif tumbuh di bawah lapisan tersebut.



Gambar 1. Kondisi perkerasan di kawasan Taman Sari



Gambar 2. Kondisi perkerasan di kawasan Kampus Universitas Syiah Kuala



Gambar 3. Kondisi perkerasan di kawasan Blang Padang

3.2. Identifikasi Penyebab Pertumbuhan Akar Pohon yang Invasif di Banda Aceh

(1) Pemilihan Jenis Pohon

Hasil observasi lapangan pada tiga kawasan yang dipilih, yaitu Blang Padang, Taman Sari dan Kampus Universitas Syiah Kuala, ditemukan bahwa jenis pohon yang dominan dijumpai terdiri dari *Samanea saman* (Trembesi), *Casuarina equisetifolia* (Cemara), *Ficus benjamina* (Beringin), dan *Pterocarpus indicus* (Angsana). Pemilihan jenis pohon tersebut sesuai dengan fungsi kawasan yang mewadahi banyak aktivitas *outdoor* bagi publik setempat, seperti rekreasi, olahraga, hiburan, maupun sebagai jalur transportasi. Bentuk batangnya yang tinggi, ditunjang oleh bentangan kanopi yang cukup lebar, serta daun-daun yang rapat dan lebat, membuat pohon-pohon ini ideal dalam memberi peneduhan. Namun di sisi lain, praktik penanaman dan perawatan yang diterapkan saat ini mendorong pertumbuhan akar yang ekspansif dari pohon-pohon tersebut, yang berakibat pada rusaknya perkerasan di sekitarnya.

(2) Jarak Antar Pohon dan Vegetasi Lainnya

Penanaman pohon yang terlalu dekat satu sama lain dapat memicu kompetisi antar pohon untuk memperoleh air dan nutrisi. Terlebih, apabila di sekitar pohon ditumbuhi jenis vegetasi berakal dangkal seperti rerumputan dan semak yang berpotensi menyerap air di permukaan sebelum berhasil masuk ke dalam tanah, hal ini akan mendorong pertumbuhan akar pohon yang lebih invasif dan agresif secara horizontal di permukaan tanah, alih-alih secara vertikal ke dalam tanah.

(3) Metode Penyiraman

Salah satu faktor yang juga dapat berkontribusi terhadap tidak ter kendalinya pertumbuhan akar pohon adalah metode penyiraman yang masih bersifat konvensional di sejumlah kawasan, yakni dengan menggunakan truk sebagai pengangkut air dan selang untuk menyirami tanamannya. Praktik ini diidentifikasi sebagai penyebab kecenderungan akar pohon tumbuh ke arah permukaan tanah dalam upaya mencari air dan nutrisi yang tergenang di atas permukaan tanah. Meskipun pada beberapa median jalan di Banda Aceh sudah terpasang instalasi penyiraman berupa pipa berdiameter kecil dan nozel yang berfungsi menyalurkan air dan menyirami tanaman langsung pada bagian akarnya, namun sistem ini tampak belum berfungsi secara efektif, sehingga proses penyiraman manual dengan truk masih tetap dilakukan.



Gambar 4. Metode penyiraman tanaman menggunakan truk (kiri); Instalasi pipa untuk penyiraman tanaman sudah tersedia di beberapa titik (kanan)

(4) Pengendalian Akar

Strategi pengendalian akar pohon yang diterapkan di Banda Aceh agar tidak masuk ke area yang tidak diinginkan masih sebatas penggunaan kanstin atau dinding pembatas. Hal ini belum memperlihatkan hasil yang optimal, terbukti dari temuan kerusakan infrastruktur seperti dijelaskan sebelumnya. Strategi lain yang diterapkan terkait akar pohon lebih dititik beratkan pada pencegahan penyakit dan untuk mengatasi kekeringan.

3.3. Teknik Pengendalian Akar Pohon di Beberapa Kota Maju

Secara alami, pohon berupaya, bahkan berkompetisi, untuk mendapatkan air dan nutrisi yang cukup demi mendukung pertumbuhan dan kelangsungan hidupnya. Untuk itu, akar pohon sebagai bagian dari pohon yang berfungsi mencari dan mengonsumsi air dan nutrisi tersebut, akan mengeksploitasi zona yang kaya nutrisi dan kelembapan pada media tumbuhnya (Zhang et al., 2020; Ho et al., 2018).

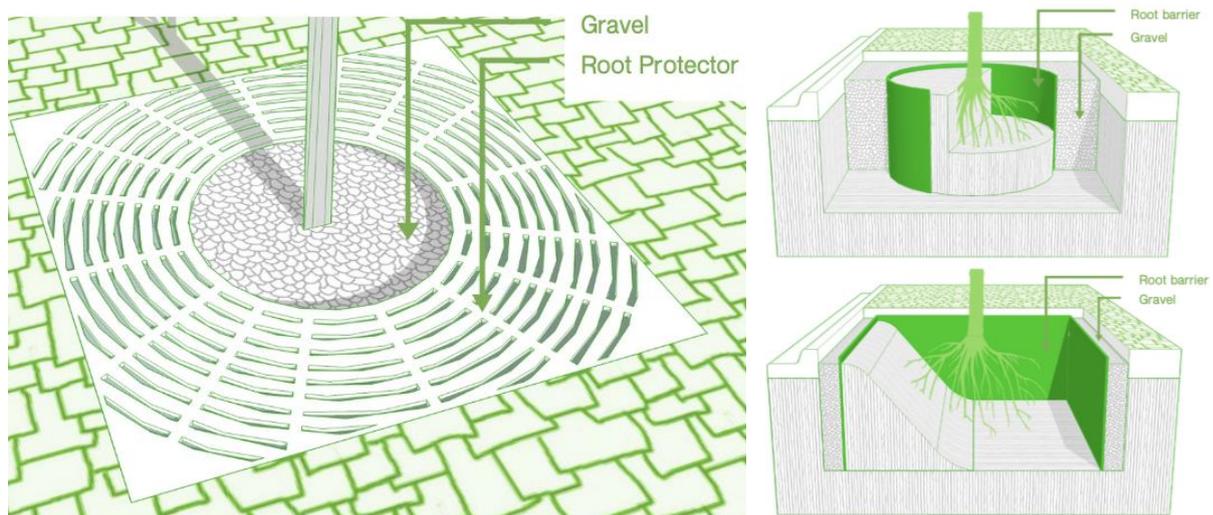
Di kawasan perkotaan dengan tanah sempit, struktur padat, dan pasokan air serta nutrisi yang terbatas, akar dapat tumbuh secara ekspansif, baik secara horizontal maupun vertikal, sebagai strategi adaptasi untuk memaksimalkan pengambilan sumber daya (Herbst et al., 2019; Zhang et al., 2020; Goh & Ahmad, 2025). Untuk menghindari kerusakan yang mungkin terjadi akibat pertumbuhan akar pohon tersebut terhadap infrastruktur yang ada di sekitarnya, beberapa teknik telah diterapkan di kota-kota maju, sembari memastikan pertumbuhan yang optimal bagi pohon-pohon di kawasan urban.

(1) *Tree Pit* (Lubang untuk Menanam Pohon)

Beberapa negara di Eropa, seperti Jerman dan Belanda, telah menerapkan kebijakan penanaman pohon yang berkelanjutan dengan memperhatikan pengelolaan akar. Sebagai contoh, di Berlin, penerapan sistem *tree pits* (lubang tempat menanam pohon) yang dilengkapi dengan *root barriers* (penghalang akar) dan media tanam yang cukup dalam telah mengurangi kerusakan pada perkerasan jalan (Sachs, 2017). *Tree pit* ini menjadi *free zone* (zona bebas) yang memperhitungkan ukuran batang dan akar pohon saat dewasa. Umumnya, zona ini dilengkapi oleh *root protector* (pelindung akar) berupa lempengan berongga, biasanya terbuat dari besi, yang memungkinkan sirkulasi air dan udara.

(2) *Root Barrier* (Penghalang Akar)

Beberapa kota di Eropa dan Amerika Serikat telah mengembangkan teknik untuk mengelola pertumbuhan akar agar tidak merusak infrastruktur perkotaan. Salah satu teknik yang paling banyak digunakan adalah *root barrier* (penghalang akar), yang berfungsi mengarahkan akar pohon agar tidak tumbuh ke arah yang dapat merusak perkerasan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Gilbert et al. (2018), penggunaan *root barrier* telah terbukti efektif dalam mencegah kerusakan trotoar dan jalan yang disebabkan oleh akar pohon. Studi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *root barrier* berbahan plastik atau logam, yang dipasang secara vertikal di sekitar pohon, berhasil mengalihkan akar ke arah yang lebih aman. Sebuah studi yang dilakukan oleh Sachs (2017) menunjukkan bahwa dengan mengadopsi teknik ini, banyak kota Eropa berhasil mengurangi kerusakan pada perkerasan jalan yang disebabkan oleh akar pohon.



Gambar 5. Kombinasi *tree pit*, *root barrier* dan *structural soil* untuk pengendalian akar yang optimal
(Sumber: Zuliansyah, 2018)

(3) *Structural Soil* (Media Tanam Struktural)

Konsep *structural soil* (media tanam struktural) yang dikembangkan oleh Cornell University telah diadopsi oleh banyak kota untuk mendukung pertumbuhan akar pohon tanpa merusak perkerasan. *Structural soil* merupakan campuran antara tanah, batu pecah, dan bahan organik yang memberikan ruang untuk akar pohon tumbuh, tetapi cukup kuat untuk menopang perkerasan di atasnya. Menurut Clark et al. (2019), penggunaan *structural soil* di kota-kota seperti New York dan Portland telah mengurangi insiden kerusakan perkerasan akibat akar pohon, sehingga memungkinkan pohon tumbuh lebih sehat dan kuat.

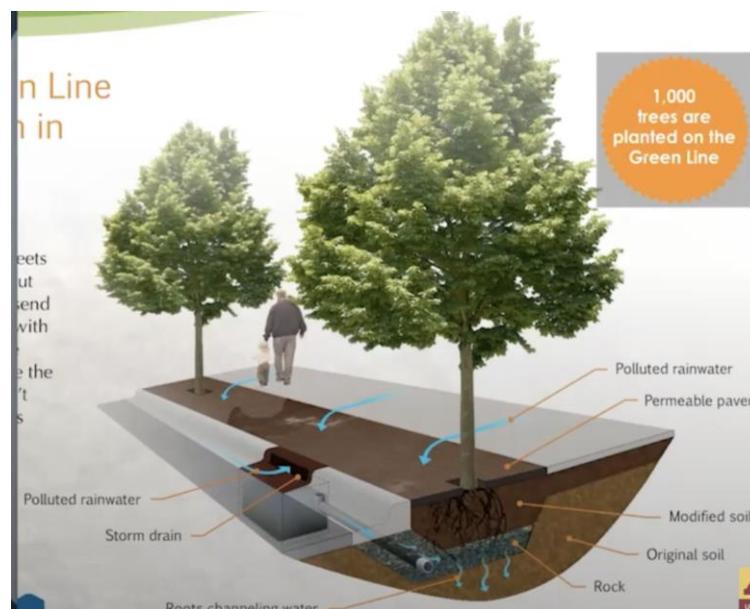
Sebuah studi kasus di Rotterdam juga menunjukkan keberhasilan dalam menggunakan kombinasi *structural soil* (media tanam struktural) dan sistem drainase yang efisien untuk meningkatkan ketahanan pohon terhadap gangguan akar pada area perkotaan yang padat (Smith, 2020).

(4) *Tree Trench* (Parit Pohon)

Di Portland, Oregon, Amerika Serikat, implementasi *tree trenches* (parit pohon), i.e. saluran tanam yang diperkuat dengan bahan-bahan struktural, telah terbukti efektif untuk memungkinkan akar pohon tumbuh tanpa merusak trotoar. *Tree trench* (parit pohon) memungkinkan akar pohon tumbuh lebih dalam dan luas dengan mengintegrasikan ruang untuk akar yang diperkuat dengan bahan struktural yang justru mendukung perkerasan jalan. Hal ini dikonfirmasi melalui penelitian oleh Jones et al. (2021) yang menyimpulkan bahwa penggunaan *tree trenches* (parit pohon) ini tidak hanya mengurangi kerusakan perkerasan tetapi juga meningkatkan daya dukung tanah dan kualitas lingkungan perkotaan.

Berdasarkan posisinya, terdapat tiga tipe dasar dari *system tree trenches*, yaitu:

- Di bawah perkerasan
- Di bawah grill saluran air
- Pada permukaan media tanam



Gambar 6. Sistem *tree trench* (parit pohon)

(Sumber: Urban & Community Forestry at the University of Minnesota, 2022)

3.4. Metode Irigasi dan Penyiraman Pohon di Beberapa Kota Maju

Metode penyiraman atau irigasi sangat berkaitan erat dengan pola pertumbuhan akar pohon. Hal ini terkait dengan usaha yang dilakukan pohon untuk mencari sumber air dan nutrisi bagi

pertumbuhannya. Apabila sistem penyiraman atau irigasi membuat air tergenang pada permukaan tanah, hal ini akan memicu pertumbuhan akar pohon pada permukaan tanah, dan mengakibatkan kerusakan pada infrastruktur perkotaan di sekitarnya. Oleh sebab itu, sistem irigasi atau penyiraman yang baik harus mampu mendistribusikan air pada zona akar di bawah permukaan tanah, sehingga pertumbuhan akar pohon pun tetap terkonsentrasi pada bagian dalam tanah.

(1) Deep Root Watering (Penyiraman Akar Dalam)

Metode ini menyalurkan air langsung ke zona akar yang dalam, sehingga akar tumbuh lebih dalam dan lebih tahan terhadap kekeringan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa meskipun hanya sebagian kecil akar halus tumbuh di bawah 1 meter, hingga 38,6% air dapat diserap dari zona ini saat musim kering berlangsung (Tumber-Dávila et al., 2023).

(2) Drip Irrigation (Irigasi Tetes)

Penggunaan drip irrigation (irigasi tetes) dengan strategi defisit air antara 50-75% dari kebutuhan terbukti mampu menjaga produktivitas pohon sambil menghemat air, terutama pada pohon berbuah (Yan et al., 2024).

(3) Soaker Hose (Selang Penyiram)

Peletakan soaker hose (selang penyiram) yang diletakkan di bawah mulsa mampu mendistribusikan air secara merata dan mengurangi penguapan pada permukaan. Teknik ini cocok diterapkan pada lanskap dan taman yang ditumbuhi banyak pepohonan (Water.unl.edu, 2023).

(4) Tree Watering Bags (Kantung Penyiram Pohon)

Meskipun beberapa studi menunjukkan bahwa kantung penyiram tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap pertumbuhan dibanding penyiraman biasa, alat ini efektif dalam menjaga kelembaban tanah dan mencegah limpasan (DeepRoot, 2023).

3.5. Adaptasi Strategi Pengendalian Akar Pohon di Kota Maju untuk Konteks Banda Aceh

Praktik-praktik pengelolaan akar pohon yang diterapkan di beberapa kota maju yang telah dibahas memberikan wawasan yang sangat berharga dalam menanggulangi kerusakan infrastruktur akibat pertumbuhan akar pohon di perkotaan. Namun, implementasi strategi ini di Banda Aceh memerlukan adaptasi dengan mempertimbangkan konteks lokal, baik dari sisi iklim tropis, jenis vegetasi, ketersediaan material, tenaga kerja, hingga regulasi yang berlaku.

Dr. Thomas (2018) menekankan pentingnya pemilihan jenis pohon yang sesuai dengan kondisi iklim setempat, serta penerapan sistem manajemen akar yang mendukung pertumbuhan pohon tanpa mengorbankan infrastruktur. Namun, di Indonesia, termasuk Banda Aceh, hingga saat ini belum terdapat regulasi atau standar nasional (SNI) yang secara spesifik mengatur tentang manajemen akar pohon di kawasan perkotaan, terutama terkait penerapan teknologi seperti *root barrier*, *structural soil*, dan *tree pit*, serta sistem irigasi yang mampu mencegah pertumbuhan akar secara invasif dan destruktif terhadap infrastruktur urban di sekitarnya.

Hal ini menunjukkan bahwa isu manajemen akar pohon belum menjadi prioritas kebijakan, atau bahkan belum sepenuhnya dipahami oleh pemerintah setempat maupun masyarakat secara umum. Banda Aceh sebagai kota yang sedang berkembang masih memerlukan perencanaan lebih matang terkait pengelolaan ruang hijau perkotaan.

(1) Pemilihan Jenis & Jarak Penanaman Pohon yang Tepat

Menemukan jenis pohon yang sepenuhnya sesuai untuk kawasan urban tidaklah mudah, karena pada dasarnya pohon merupakan organisme yang menyesuaikan diri dengan kondisi lingkungannya,

termasuk di antaranya terkait kompetisi untuk memperoleh nutrisi dan air, yang tentu berdampak pada pola pertumbuhan akarnya.

Secara umum, jenis pohon dengan pertumbuhan akar yang agresif seperti *Ficus* dan *Pterocarpus* sebaiknya dihindari, sebaliknya, perlu dilakukan pemilihan jenis pohon yang memiliki akar yang tidak invasif. Studi regional di Singapura merekomendasikan pemilihan pohon tropis yang adaptif dan tidak agresif terhadap infrastruktur, seperti *Tabebuia rosea* dan *Dillenia suffruticosa*, serta penggunaan *root barrier* untuk mengendalikan pertumbuhan akar (NParks, 2017). Praktik serupa juga diterapkan di Amerika dan Eropa, di mana jenis pohon yang dipilih memiliki sistem perakaran yang dalam dan tidak invasif, seperti *Quercus spp.* atau *Tilia spp.* (ISA, 2018; USDA, 2020).

Sebagai gambaran umum, perlu diperhatikan bahwa jenis pohon yang tumbuh lebih cepat umumnya memiliki sistem akar yang lebih invasif, tidak terlalu toleran terhadap kekeringan, dan memiliki sistem dahan yang lebih ringkih. Dalam jangka pendek, jenis pohon yang tumbuh lebih cepat tampak lebih menguntungkan karena memperlihatkan hasil lebih cepat. Namun dalam jangka panjang, hal ini berpotensi menimbulkan masalah, seperti pertumbuhan akar yang merusak infrastruktur, kebutuhan penyiraman yang lebih intensif, serta timbulnya permasalahan sampah dan risiko kecelakaan akibat banyaknya dahan dan ranting yang patah. Di sisi lain, jenis pohon yang lebih kuat dengan sistem akar yang kurang invasif cenderung membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mulai memperlihatkan hasil. Oleh karena itu, diperlukan strategi jitu yang mengombinasikan kedua jenis pohon tersebut, untuk memperoleh hasil terbaik.

Selanjutnya, jarak penanaman pohon penting untuk diperhatikan karena berdampak pada perilaku perkembangan akar pohon yang merespons kompetisi terhadap air dan nutrisi yang timbul akibat jarak tanam pohon tidak sesuai. Merujuk pada studi oleh Yulisma S. dan Aulia D. N. (2019), berikut rekomendasi jarak antar pohon sesuai ukuran tingginya:

- Pohon besar (tinggi >15 m): jarak tanam 12-18 meter.
- Pohon sedang (tinggi 10-15 m): jarak antar pohon 8-12 meter.
- Pohon kecil (tinggi <10 m): jarak antar pohon 6-8 meter.

(2) Penggunaan Teknologi Pengendalian Akar

Berbagai strategi pengendalian akar pohon di beberapa kota maju yang telah dibahas sebelumnya dapat menjadi acuan dalam pengelolaan pepohonan di Banda Aceh. Namun, adaptasi strategi ini harus mempertimbangkan kondisi lokal terkait ketersediaan bahan, teknologi, sumber daya manusia, serta konteks sosial ekonomi dan regulasi yang ada. Analisis terhadap komponen teknis dari setiap strategi internasional menunjukkan bahwa sebagian besar teknologi pengendalian akar sebenarnya bisa diadaptasi di Banda Aceh dengan memanfaatkan material lokal yang relatif tersedia, serta keahlian teknis dasar yang dapat diperoleh melalui pelatihan.

Tabel berikut merangkum fungsi utama dari teknologi pengendalian akar yang telah diterapkan di beberapa kota maju dan potensi adaptasinya di Banda Aceh:

Tabel 1. Potensi adaptasi sistem manajemen akar di Banda Aceh
(Sumber: Sachs, 2017; Gilbert et al., 2018; Clark et al., 2019; NParks, 2017)

Komponen	Fungsi Utama	Teknologi Internasional	Adaptasi di Banda Aceh
<i>Tree Pit</i>	Area tanam yang memperhitungkan ruang akar	Media tanam dalam, <i>root protector</i> , <i>gravel</i> sebagai drainase	Media tanam tanah dicampur kompos, pelindung akar bambu/plastik, kerikil sebagai drainase
<i>Root Barrier</i>	Mengarahkan akar agar tidak merusak perkerasan	Pelindung akar logam/plastik, gravel	Pelindung akar bambu/plastik daur ulang, kerikil

Structural Soil	Memperkuat tanah sekaligus memberi ruang akar	Batu pecah, campuran tanah, bahan organik	Batu pecah lokal atau limbah konstruksi, campuran tanah, kompos organik
Tree Trench	Ruang akar luas & dalam, mendukung perkerasan	Saluran tanam berbahan struktural, drainase terintegrasi	Saluran tanam sederhana berbahan batu atau beton lokal

Analisis pada tabel di atas menunjukkan bahwa secara material dan teknologi, Banda Aceh sebenarnya tidak menghadapi kendala berarti untuk menerapkan sebagian besar strategi pengendalian akar yang telah terbukti efektif di kota-kota maju. Material khusus seperti *root barrier* dan *structural soil* komersial mungkin masih mahal dan jarang tersedia secara luas di Banda Aceh, namun inovasi menggunakan material lokal seperti bambu dan limbah organik tetap dapat dilakukan untuk menghemat biaya tanpa mengorbankan fungsi teknis.

Tantangan utama justru terletak pada ketersediaan pengetahuan teknis serta Sumber Daya Manusia (SDM) yang mumpuni, koordinasi antar instansi pemerintah, dan kebijakan, regulasi atau standar yang belum ada. Untuk itu, agar adaptasi strategi ini dapat berjalan efektif, Banda Aceh perlu menempuh beberapa langkah prioritas:

- Penyusunan pedoman teknis atau regulasi oleh pemerintah setempat yang mengatur standar jarak tanam, pemilihan jenis pohon, serta penggunaan teknologi pengendalian akar.
- Pelatihan tenaga kerja teknis dalam hal pemasangan teknologi pengendalian akar.
- Kolaborasi lintas sektor antara dinas-dinas terkait agar program Ruang Terbuka Hijau (RTH) perkotaan terintegrasi dengan infrastruktur.
- Penelitian lebih lanjut mengenai efektivitas adaptasi material lokal.

Dengan demikian, adaptasi strategi internasional bukanlah hal yang mustahil. Justru Banda Aceh dapat memanfaatkan teknologi pengendalian akar dengan mengoptimalkan potensi lokal, sehingga upaya mitigasi kerusakan infrastruktur akibat akar pohon dapat terwujud secara efektif, efisien, dan berkelanjutan. Terkait pelaksanaannya, implementasi teknologi dan manajemen akar pohon sebaiknya diprioritaskan pada penanaman pohon baru, agar dapat mencegah kerusakan sejak awal dan membangun standar pengelolaan vegetasi perkotaan. Sementara itu, penanganan pohon yang sudah ada (*existing*) dapat dilakukan secara bertahap, dengan mengutamakan area kritis, serta menggunakan teknologi yang adaptif dan metode pengendalian akar yang sesuai dengan kondisi pohon dan lingkungan di sekitarnya.

(3) Penggunaan Metode Penyiraman Tanaman yang Tepat

Selain implementasi teknologi pengendalian akar, sistem penyiraman atau irigasi juga sangat penting untuk diperhatikan. Strategi irigasi yang perlu diterapkan adalah yang mampu mendistribusikan air langsung pada zona akar pohon, sehingga mencegah timbulnya kebutuhan untuk akar melakukan pertumbuhan atau ekspansi ke arah yang tidak diharapkan seperti permukaan tanah dan perkerasan di sekitarnya. Sesuai studi literatur, beberapa metode atau sistem irigasi yang direkomendasikan adalah *deep root watering* (penyiraman akar dalam), *drip irrigation* (irigasi tetes), *soaker hose* (selang penyiram), dan *tree watering bag* (kantung penyiram pohon).

4. Kesimpulan & Saran

4.1. Kesimpulan

Penelitian ini mengidentifikasi bahwa kerusakan perkerasan di Banda Aceh antara lain disebabkan oleh pertumbuhan akar pohon yang invasif dari jenis *Pterocarpus indicus*, *Samanea saman*, dan lain-lain, yang memang sudah umum ditanam di sekitar ruang terbuka publik di Banda Aceh sehubungan dengan karakteristiknya yang ideal dalam memberi peneduhan. Pencegahan masalah ini tidak cukup hanya dengan pemilihan jenis pohon yang dirasa lebih cocok dengan lingkungan perkotaan,

seperti *Tabebuia rosea* dan *Dillenia suffruticosa*, tetapi juga membutuhkan penerapan manajemen akar pohon yang terpadu dan konsisten, yang meliputi penggunaan teknologi mitigasi akar seperti *root barrier*, *structural soil*, *tree pit*, dan *tree trench*, serta pengaturan jarak tanam dan pengelolaan irigasi yang tepat.

Di sisi lain, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, antara lain kurangnya partisipasi aktif dari pemangku kepentingan seperti pemerintah setempat dan masyarakat, serta minimnya data kuantitatif terperinci mengenai tingkat kerusakan perkerasan. Oleh karena itu, hasil penelitian ini merupakan langkah awal yang perlu dilanjutkan dengan penelitian lanjutan dan implementasi yang lebih komprehensif.

4.2. Saran

Berdasarkan temuan penelitian, berikut beberapa saran yang dapat mendukung pengendalian kerusakan perkerasan akibat akar pohon di Banda Aceh:

(1) Pengembangan Kebijakan Penanaman Pohon Berkelanjutan.

Pemerintah Kota Banda Aceh hendaknya merumuskan dan mengimplementasikan kebijakan penanaman pohon yang mempertimbangkan aspek ekologis sekaligus keberlanjutan infrastruktur. Kebijakan ini perlu memuat pedoman pemilihan jenis pohon yang tidak invasif, penerapan teknologi pengendalian akar, serta tata cara pemeliharaan dan pengelolaan pohon yang sistematis.

(2) Pelatihan dan Peningkatan Kapasitas SDM.

Pelatihan teknis bagi petugas taman kota, dinas terkait, dan pengelola Ruang Terbuka Hijau (RTH) sangat penting agar mereka memahami prinsip-prinsip manajemen akar pohon dan teknologi mitigasi yang tersedia. Hal ini akan meningkatkan kualitas pelaksanaan dan pengawasan di lapangan.

(3) Penelitian Lanjutan dan Pemantauan Berkala.

Diperlukan penelitian lebih mendalam untuk menilai efektivitas teknologi mitigasi akar dalam konteks lokal Banda Aceh, termasuk studi kuantitatif dampak kerusakan. Selain itu, pemantauan rutin terhadap kondisi perkerasan dan pertumbuhan akar pohon harus dilakukan untuk memastikan keberhasilan dan adaptasi strategi yang tepat.

(4) Sosialisasi dan Keterlibatan Masyarakat.

Edukasi kepada masyarakat tentang pentingnya pemilihan pohon yang tepat dan perawatan pohon dapat meningkatkan dukungan publik terhadap program pengelolaan pohon kota. Keterlibatan masyarakat dalam pelaporan kerusakan dan perawatan pohon juga dapat mempercepat deteksi dan penanganan masalah.

Referensi

- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155.
- Clark, M., Jones, T., & Evans, S. (2019). Structural Soil for Urban Trees: Innovations in Design. *Journal of Urban Horticulture*, 8(2), 123–135.
- Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2013). Characteristics influencing the cooling capacity of urban landscapes: A case study of Melbourne, Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3), 334–341.
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). Sage Publications.
- DeepRoot Green Infrastructure. (2023). Tree watering bags: Are they worth using? <https://www.deeproot.com/blog/blog-entries/tree-watering-bags-are-they-worth-using>
- Dimoudi, A., & Nikolopoulou, M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69–76.

- Fredrick, C., Ekeke, B. A., Omokhua, G. E., & Alex, A. (2021). Assessment of the effect of cutting length on sprout and growth of *Pterocarpus santalinoides* L'Hérit. ex DC. *Journal of Applied Life Sciences International*, 24(9), 1–9.
- Gilbert, A., Brown, R., & White, D. (2018). Root Barrier Technology for Urban Tree Management. *Arboriculture and Urban Forestry*, 44(3), 145–159.
- Gilman, E. F. (1990). Tree root growth and development. *Journal of Arboriculture*, 16(8), 203-207.
- Goh, E. G., & Ahmad, M. F. (2025). *Soil compaction and root growth: A review*. Soil and Tillage Research.
- Grabosky, J., & Bassuk, N. (1995). A new urban tree soil to safely increase rooting volume. *Journal of Arboriculture*, 21(4), 187–201.
- Herbst, M., Lenz, J., & Clark, J. R. (2019). *Contemporary concepts of root system architecture of urban trees*. *Arboriculture & Urban Forestry*, 36(4), 149–?
- Ho, M. D., McCannon, B. C., & Lynch, J. P. (2018). Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: Current perspectives. *New Phytologist*.
- ISA. (2018). *Best management practices: Managing trees during construction*. International Society of Arboriculture.
- James, J., Hartley, M., & O'Sullivan, K. (2014). Managing urban tree root damage to pavements: A review of current practices. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13(3), 659–670.
- Kumar, R., Ganesh, S., Chithiraichelvan, R., Upreti, K. K., & Sulladmath, V. V. (2014). Effect of spacing and pruning on growth, yield and quality of cv. Deanna fig (*Ficus carica* L.). *Journal of Horticultural Science*, 9(2), 115–119.
- Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The urban forest and ecosystem services: Impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 119–124.
- Merriam, S. B., & Tisdell, E. J. (2015). *Qualitative research: A guide to design and implementation* (4th ed.). Jossey-Bass.
- Meutia, Z. D., Trimafika, S., & Darnas, Y. (2024). Capability Of Green Open Space Vegetation Reducing Carbon Emissions In The Transportation Sector (Xase Study Of The Simpang jam Area In Banda Aceh City). *Indonesian Journal of Environmental Sustainability*, 2(1), 52-58.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3-4), 115–123.
- NParks. (2017). *Street tree management guidelines*. National Parks Board Singapore.
- Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2017). Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in confined and unconfined soil volumes. *Building and Environment*, 114, 118–128.
- Rahman, M. A., Stringer, P., & Ennos, A. R. (2013). Effect of pit design on growth and root architecture of urban trees in the establishment phase. *Arboriculture & Urban Forestry*, 39(6), 291–299.
- Rahman, M. M., Roberts, J., & Thomas, N. (2017). Root management technologies for urban trees: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 23, 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.02.007>
- Rahman, M., Huxley, A., & Ennos, A. R. (2017). Tree root barriers: effects on root growth and infrastructure damage. *Trees*, 31(6), 1973–1984.
- Sachs, T. (2017). Green Infrastructure in European Cities: Case Studies of Sustainable Urban Tree Planting. *Landscape and Urban Planning*, 160, 45–58.
- Smiley, E. T. (2008). Root barriers: Specifications and applications. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(1), 56-59.
- Smith, R. (2020). Effective Tree Planting Strategies in Dense Urban Areas: A Review of European Practices. *Urban Ecology*, 5(1), 12–22.
- Thomas, D. (2018). Tropical Urban Tree Planting: Challenges and Solutions for Tropical Cities. *Environmental Science and Policy*, 90, 101–110.
- Tumber-Dávila, S. J., Trugman, A. T., Anderegg, W. R. L., McDowell, N. G., & Asner, G. P. (2023). Deep root water uptake contributes significantly to tree drought resilience. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1275464. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1275464>

- University of Nebraska–Lincoln. (2023). Efficient and effective tree watering. Water.unl.edu. <https://water.unl.edu/article/lawns-gardens-landscapes/efficient-and-effective-tree-watering>
- USDA. (2020). *Urban tree guide*. United States Department of Agriculture.
- Vogt, J., et al. (2015). Tree root management in urban environments: A review of methods and technologies. *Environmental Management*, 56(2), 324–337.
- WaterLyst. (2023). Sprinkler irrigation efficiency methods. <https://waterlyst.com/articles/sprinkler-irrigation-efficiency-methods>
- Yan, M., He, X., Wang, Y., & Yang, C. (2024). Response of apple trees to regulated deficit drip irrigation in arid regions. *Agricultural Water Management*, 292, 108095. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108095>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Sage Publications.
- Yulisma, S., & Aulia, D. N. (2019). Kriteria vegetasi untuk RTH jalur jalan dan jalur pejalan kaki. *Jurnal Ilmiah*, 5(2), 45–58.
- Zhang, C., Stratópoulos, L. M. F., Xu, C., Pretzsch, H., & Rötzer, T. (2020). Development of fine root biomass of two contrasting urban tree cultivars in response to drought stress. *Forests*, 11(1), 108. <https://doi.org/10.3390/f11010108>
- Zuliansyah, S. (2018). Potential analysis on strategy and impact of vegetative measures for high urban temperature mitigation in Banda Aceh, Indonesia (Master's Thesis, HafenCity University Hamburg, Resource Efficiency in Architecture and Planning).