

ANALISIS KOMPARATIF DAMPAK KEANEKARAGAMAN HERBIVORA DAN SIFAT AKAR TANAMAN TERHADAP EKOSISTEM TUNDRA ARKTIK DAN SUB-ARKTIK

Qurrota A'yunin Qorina

Universitas Sebelas Maret, Indonesia

Email : qurrotaayuningq@student.uns.ac.id

Abstrak

Ekosistem tundra, baik di wilayah Arktik maupun sub-Arktik, dipengaruhi oleh faktor biotik seperti keanekaragaman herbivora dan sifat akar tanaman. Jurnal *Herbivore Diversity Effects on Arctic Tundra Ecosystems: A Systematic Review* menekankan pengaruh keanekaragaman herbivora terhadap fungsi ekosistem, seperti suhu tanah dan vegetasi. Sebaliknya, jurnal *Root Traits and Soil Micro-Organisms as Drivers of Plant Soil Feedbacks within the Sub-Arctic Tundra Meadow* fokus pada hubungan sifat akar, mikroorganisme tanah, dan umpan balik tanah-tumbuhan. Penelitian ini membandingkan hasil dari kedua jurnal untuk memahami peran herbivora dan sifat akar tanaman dalam membentuk dinamika ekosistem tundra. Keanekaragaman herbivora berkontribusi pada pengurangan biomassa tanaman tetapi meningkatkan suhu tanah. Di sisi lain, sifat akar yang lebih acquisitive terkait dengan PSF yang negatif. Kedua pendekatan menunjukkan bahwa interaksi antarspesies, baik pada tingkat herbivora maupun akar tanaman, memengaruhi keseimbangan ekologis tundra. Studi ini menggarisbawahi pentingnya mempertimbangkan berbagai komponen ekosistem dalam konservasi tundra.

Kata kunci: keanekaragaman herbivora, sifat akar tanaman, dinamika ekosistem tundra

Abstract

*Tundra ecosystems, both in the Arctic and sub-Arctic regions, are influenced by biotic factors such as herbivore diversity and plant root properties. The journal *Herbivore Diversity Effects on Arctic Tundra Ecosystems: A Systematic Review* emphasizes the influence of herbivore diversity on ecosystem function, such as soil temperature and vegetation. In contrast, the journal *Root Traits and Soil Micro-Organisms as Drivers of Plant Soil Feedbacks within the Sub-Arctic Tundra Meadow* focuses on the relationship of root traits, soil microorganisms, and soil-plant feedback. This study compares the results of the two journals to understand the role of herbivores and the properties of plant roots in shaping the dynamics of the tundra ecosystem. Herbivore diversity contributes to the reduction of plant biomass but increases soil temperature. On the other hand, the more acquisitive nature of the root is associated with negative PSF. Both approaches suggest that interactions between species, both at the herbivore and plant root levels, affect the ecological balance of the tundra. This study underscores the importance of considering the various ecosystem components in tundra conservation.*

Keywords: herbivore diversity, plant root properties, tundra ecosystem dynamics

*Correspondence Author: Qurrota A'yunin Qorina
Email: qurrotaayuningq@student.uns.ac.id



PENDAHULUAN

Ekosistem tundra Arktik dan sub-Arktik merupakan salah satu lingkungan paling ekstrem di dunia, ditandai oleh suhu yang sangat rendah, musim pertumbuhan yang singkat, dan tanah yang sering kali tertutup oleh permafrost. Permafrost adalah lapisan tanah yang membeku secara permanen, menciptakan kondisi yang tidak ramah bagi pertumbuhan banyak organisme. Sebagai akibatnya, tundra memiliki tingkat biodiversitas yang relatif rendah jika dibandingkan dengan ekosistem lain seperti hutan hujan tropis atau savana, (Azevedo et al., 2021). Namun demikian, tundra memainkan peran yang sangat penting dalam siklus karbon global karena kemampuannya untuk menyimpan sejumlah besar karbon di dalam tanah. Tanah tundra yang membeku berfungsi sebagai gudang karbon yang

efektif. Proses pembusukan organik yang lambat di wilayah ini mengakibatkan akumulasi bahan organik yang besar. Dengan demikian, ekosistem tundra memiliki pengaruh signifikan terhadap keseimbangan karbon atmosfer, (Mauclet et al., 2021).

Namun, kondisi ini juga menjadikan tundra sangat rentan terhadap perubahan lingkungan, terutama dalam konteks perubahan iklim yang sedang berlangsung. Salah satu dampak utama perubahan iklim terhadap tundra adalah pergeseran komposisi dan distribusi vegetasi, yang sering kali disebut sebagai "greening of the Arctic." Pemanasan global menyebabkan permafrost mencair, memberikan peluang bagi vegetasi baru untuk tumbuh di wilayah yang sebelumnya tidak mendukung kehidupan tanaman. Tanaman berkayu, seperti semak, mulai menggantikan vegetasi tundra tradisional, yang biasanya terdiri dari lumut, lichen, dan rumput, (Garnello et al., 2021). Perubahan ini bukan hanya hasil dari kenaikan suhu, tetapi juga dipengaruhi oleh kelembapan tanah serta faktor biotik lainnya, seperti aktivitas herbivora dan interaksi antara tanaman dan tanah. Herbivora, seperti rusa kutub (reindeer) dan lemming, memainkan peran penting dalam dinamika ekosistem tundra. Melalui pola makan mereka, hewan-hewan ini memengaruhi struktur dan komposisi vegetasi. Konsumsi tanaman tertentu oleh herbivora dapat mengurangi dominasi spesies tertentu dan memungkinkan spesies lain untuk tumbuh, sehingga menciptakan variasi dalam komunitas tumbuhan. Selain itu, distribusi kotoran herbivora meningkatkan kesuburan tanah di wilayah tertentu, memengaruhi siklus nutrisi, dan mendukung pertumbuhan tanaman., (Spitzer et al., 2023).

Dengan demikian, herbivora menjadi salah satu pengendali utama yang menjaga keseimbangan ekologis di tundra. Faktor lain yang memengaruhi ekosistem tundra adalah sifat akar tanaman. Akar memainkan peran penting dalam umpan balik tanah-tumbuhan (plant-soil feedback atau PSF), yaitu mekanisme di mana tanaman memengaruhi sifat tanah, yang pada gilirannya memengaruhi pertumbuhan tanaman lainnya. Dalam tundra, akar tanaman biasanya lebih pendek dibandingkan dengan ekosistem lain, namun memiliki biomassa yang signifikan. Interaksi akar dengan mikroorganisme tanah, seperti jamur mikoriza dan bakteri, juga berperan penting dalam penyediaan nutrisi bagi tanaman, (Hobbie et al., 2021). Faktor-faktor ini menciptakan hubungan dinamis antara tanaman dan tanah, yang menentukan komposisi komunitas tumbuhan tundra. Meskipun ekosistem tundra memiliki mekanisme adaptasi yang kompleks terhadap lingkungan ekstrem, tekanan yang diakibatkan oleh aktivitas manusia dan perubahan iklim semakin memperburuk kondisi ekosistem ini. Pemanasan global tidak hanya mencairkan permafrost tetapi juga meningkatkan emisi karbon yang sebelumnya terperangkap di dalam tanah. Emisi ini dapat mempercepat perubahan iklim global, menciptakan siklus umpan balik negatif yang sulit dikendalikan, (Männistö et al., 2024).

Selain itu, eksploitasi sumber daya alam di wilayah Arktik, seperti pengeboran minyak dan gas, meningkatkan risiko gangguan terhadap habitat tundra. Aktivitas manusia juga mengancam spesies yang hidup di wilayah ini, baik melalui hilangnya habitat maupun melalui polusi, (Smith et al., 2020). Ancaman ini memperburuk kerentanan ekosistem tundra, yang sudah menghadapi tekanan dari faktor lingkungan alami. Pergeseran vegetasi di tundra juga memiliki dampak global. Sebagai contoh, peningkatan tutupan semak di tundra dapat mengurangi albedo permukaan tanah, yaitu kemampuan permukaan untuk memantulkan radiasi matahari. Penurunan albedo ini menyebabkan penyerapan panas yang lebih besar, sehingga mempercepat pemanasan lokal dan global. Selain itu, perubahan komposisi vegetasi dapat mengubah interaksi antara ekosistem tundra dengan atmosfer, termasuk pola pelepasan gas rumah kaca seperti metana dan karbon dioksida, (Jonsson et al., n.d.)

Keanekaragaman herbivora memainkan peran penting dalam menentukan dinamika ekosistem tundra. Melalui preferensi makan, herbivora dapat mengontrol dominasi spesies tanaman tertentu, menciptakan heterogenitas dalam komunitas tumbuhan. Pola konsumsi ini memungkinkan spesies tanaman yang kurang dominan untuk bertahan dan tumbuh, meningkatkan keragaman hayati di wilayah yang dikenal dengan kondisi

lingkungan ekstrem. Selain itu, aktivitas herbivora memengaruhi parameter penting seperti suhu tanah, kelembapan, dan distribusi biomassa, baik di atas maupun di bawah permukaan tanah, (Post et al., 2023). Perubahan kecil pada faktor-faktor ini dapat membawa dampak besar terhadap fungsi ekosistem tundra, terutama terkait pelepasan dan penyimpanan karbon. Sebagai contoh, rusa kutub (reindeer) dan lemming, yang merupakan herbivora khas tundra, mendistribusikan kotoran mereka secara tidak merata, menciptakan variasi lokal dalam kesuburan tanah. Ini memengaruhi pola pertumbuhan tanaman dan distribusi biomassa. Lebih jauh, penggembalaan oleh herbivora dapat mengurangi tinggi vegetasi, memungkinkan lebih banyak radiasi matahari untuk mencapai tanah, yang berpotensi meningkatkan suhu tanah lokal, (Lindén et al., 2021).

Perubahan ini berdampak pada proses seperti pelepasan karbon dari permafrost yang mencair, yang merupakan masalah penting dalam konteks perubahan iklim global. Sementara itu, sifat akar tanaman juga menjadi komponen kunci yang sering kali diabaikan dalam studi ekosistem tundra. Akar tidak hanya bertindak sebagai organ penyerapan nutrisi dan air tetapi juga berperan sebagai mediator utama dalam interaksi antara tanaman dan mikroorganisme tanah. Akar tanaman tertentu memiliki kemampuan untuk mengeluarkan eksudat, senyawa kimia yang dapat merangsang aktivitas mikroorganisme tanah. Mikroorganisme ini, seperti bakteri dan jamur mikoriza, memainkan peran penting dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi. Interaksi antara akar dan mikroorganisme ini sering kali membentuk mekanisme umpan balik tanah-tumbuhan (plant-soil feedback atau PSF) yang kompleks, (Palacios et al., 2023). Umpan balik ini dapat bersifat positif, di mana tanaman mendukung keberlanjutan komunitas mereka sendiri, atau negatif, yang menghambat pertumbuhan spesies dominan untuk memberi ruang bagi spesies lain. Dampak jangka panjang dari mekanisme ini mencakup perubahan dalam struktur komunitas tumbuhan dan kemampuan ekosistem tundra untuk beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Secara keseluruhan, interaksi antara herbivora, sifat akar tanaman, dan proses tanah menciptakan dinamika yang kompleks dalam ekosistem tundra. Pemahaman mendalam mengenai hubungan ini sangat penting untuk merancang strategi konservasi yang efektif dalam menghadapi ancaman perubahan iklim dan aktivitas manusia, (Speed et al., 2021).

Meskipun telah banyak penelitian yang mengeksplorasi keanekaragaman herbivora dan sifat akar tanaman secara terpisah, studi yang mengkaji hubungan keduanya secara bersamaan dalam konteks ekosistem tundra masih sangat terbatas. Hal ini menciptakan kesenjangan pengetahuan yang signifikan, mengingat bahwa herbivora dan sifat akar tanaman sering kali berinteraksi secara kompleks untuk memengaruhi fungsi ekosistem. Sebagai contoh, keberadaan herbivora dapat mengubah sifat akar tanaman melalui seleksi tekanan (selection pressure), sementara sifat akar dapat memengaruhi pola distribusi herbivora melalui ketersediaan sumber daya makanan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif dampak keanekaragaman herbivora dan sifat akar tanaman terhadap ekosistem tundra Arktik dan sub-Arktik. Fokus utama adalah memahami bagaimana interaksi kedua faktor ini memengaruhi fungsi ekosistem, termasuk siklus nutrisi, penyimpanan karbon, dan dinamika komunitas tumbuhan. Untuk mencapai tujuan ini, analisis akan didasarkan pada sintesis dari dua jurnal ilmiah yang relevan, yang masing-masing mengeksplorasi peran keanekaragaman herbivora dan sifat akar tanaman dalam ekosistem tundra.

Studi pertama menyoroti pentingnya keanekaragaman herbivora dalam mengatur parameter ekosistem seperti suhu tanah, biomassa vegetasi, dan siklus karbon. Herbivora sering kali berfungsi sebagai "insinyur ekosistem" yang mengubah lanskap tundra melalui aktivitas makan, pergerakan, dan distribusi kotoran mereka. Sebagai contoh, aktivitas penggembalaan oleh rusa kutub dapat mengurangi dominasi spesies tumbuhan tertentu, sehingga memungkinkan spesies lain untuk berkembang. Hal ini tidak hanya meningkatkan heterogenitas dalam komunitas tumbuhan tetapi juga menciptakan efek berantai pada parameter lingkungan seperti albedo dan pencairan permafrost, (Spitzer et al., 2022).

Sebaliknya, studi kedua berfokus pada sifat akar tanaman dan bagaimana mereka memengaruhi umpan balik tanah-tumbuhan. Akar tanaman tundra sering kali memiliki adaptasi khusus untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang keras, seperti panjang akar yang pendek dan kemampuan untuk berinteraksi dengan mikroorganisme tanah. Interaksi ini dapat menghasilkan umpan balik positif yang mempercepat siklus nutrisi atau umpan balik negatif yang menghambat pertumbuhan spesies tertentu. Misalnya, akar tanaman yang mampu mengeluarkan senyawa kimia tertentu dapat menghambat pertumbuhan pesaing atau merangsang aktivitas mikroba yang bermanfaat, (Barbero-Palacios et al., 2024). Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan dampak keanekaragaman herbivora dan sifat akar tanaman berdasarkan hasil dari dua jurnal ilmiah. Fokus utama adalah memahami bagaimana interaksi tersebut memengaruhi fungsi dan dinamika ekosistem tundra.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan komparatif untuk menganalisis dua jurnal yang membahas ekosistem tundra dari perspektif yang berbeda. Kedua jurnal tersebut adalah "Herbivore Diversity Effects on Arctic Tundra Ecosystems: A Systematic Review" dan "Root Traits and Soil Micro-Organisms as Drivers of Plant–Soil Feedbacks within the Sub-Arctic Tundra Meadow". Pendekatan ini bertujuan untuk mengeksplorasi perbedaan dan persamaan antara kedua jurnal terkait metodologi, fokus penelitian, serta hasil dan implikasinya terhadap pemahaman tentang ekosistem tundra, (Hanik & Harsono, 2020).

Langkah pertama dalam metode ini adalah analisis sistematis terhadap metodologi yang digunakan dalam kedua jurnal. Jurnal pertama menggunakan metode systematic review, yang mengintegrasikan data dari 5.944 artikel terkait keanekaragaman herbivora di tundra Arktik. Artikel-artikel ini disaring melalui protokol ketat untuk mengevaluasi dampak herbivora terhadap fungsi ekosistem, dengan fokus pada tingkat keanekaragaman kelompok fungsional herbivora. Teknik analisis yang digunakan meliputi analisis sensitivitas, pengujian moderator, dan meta-regresi, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Sebaliknya, jurnal kedua menggunakan pendekatan empiris dengan eksperimen langsung untuk menganalisis hubungan antara sifat akar tanaman, mikroorganisme tanah, dan umpan balik tanaman–tanah (plant–soil feedback atau PSF). Penelitian ini mempelajari 18 spesies tanaman di tundra sub-Arktik, mengukur 11 sifat akar kimia dan morfologi, serta menganalisis komunitas mikroba menggunakan teknologi phospholipid fatty acids (PLFAs) dan sekuensing genetik. Analisis difokuskan pada kaitan sifat akar dengan PSF, spektrum ekonomi akar, dan peran ordo jamur tertentu, Barbero-Palacios, L., dkk (2024).

Selanjutnya, perbandingan dilakukan pada hasil utama kedua jurnal untuk mengevaluasi dampak keanekaragaman herbivora terhadap vegetasi dan fungsi ekosistem dibandingkan dengan pengaruh sifat akar dan mikroorganisme tanah terhadap PSF. Analisis ini membantu mengidentifikasi hubungan antar faktor biotik yang memengaruhi struktur dan dinamika ekosistem tundra. Dengan menggunakan metode komparasi ini, penelitian dapat memetakan peran herbivora, akar tanaman, dan mikroorganisme tanah dalam memengaruhi ekosistem tundra secara holistik. Hasil komparasi memberikan wawasan baru tentang keterkaitan antara tingkat trofik berbeda di tundra Arktik dan sub-Arktik, (Jayadianti et al., 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keanekaragaman Herbivora dan Dampaknya terhadap Ekosistem Tundra Arktik

Keanekaragaman herbivora memiliki dampak yang signifikan terhadap ekosistem tundra Arktik. Ekosistem tundra, yang khas dengan suhu rendah dan musim tanam pendek, merupakan habitat yang unik namun rentan terhadap perubahan lingkungan. Artikel "Herbivore Diversity Effects on Arctic Tundra Ecosystems: A Systematic Review"

menyoroti pentingnya keanekaragaman herbivora dalam mengatur struktur vegetasi, siklus nutrisi, dan dinamika ekosistem secara keseluruhan. Melalui tinjauan sistematis, artikel ini memberikan wawasan mendalam mengenai interaksi kompleks antara herbivora dan ekosistem tundra, yang sangat dipengaruhi oleh variabel kontekstual seperti jenis herbivora, lokasi geografis, serta durasi penelitian, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Dampak Keanekaragaman Herbivora terhadap Ekosistem

Peningkatan Suhu Tanah

Salah satu temuan utama dari penelitian ini adalah bahwa keanekaragaman herbivora berkontribusi pada peningkatan suhu tanah. Mekanisme ini terkait erat dengan aktivitas makan herbivora, yang mengurangi penutup vegetasi sehingga memperbesar paparan tanah terhadap sinar matahari. Akibatnya, suhu tanah meningkat, yang pada gilirannya mempercepat proses dekomposisi dan pelepasan nutrisi. Efek ini sangat penting dalam ekosistem tundra, di mana suhu tanah yang rendah sering kali menjadi faktor pembatas bagi aktivitas mikroba dan proses biogeokimia lainnya. Namun, peningkatan suhu tanah ini tidak selalu memiliki dampak positif. Dalam beberapa kasus, hal ini dapat mempercepat pelepasan karbon dari permafrost, yang merupakan salah satu ancaman terbesar bagi stabilitas iklim global. Oleh karena itu, pengaruh keanekaragaman herbivora terhadap suhu tanah harus dipahami dalam konteks interaksi yang lebih luas antara iklim, vegetasi, dan proses geokimia, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Penurunan Biomassa Tanaman

Keanekaragaman herbivora juga berdampak signifikan pada penurunan biomassa tanaman, terutama pada populasi rumput, tanaman berbunga kecil (forbs), dan serasah. Efek ini terjadi karena peningkatan aktivitas makan herbivora yang lebih beragam menciptakan tekanan lebih besar pada berbagai jenis tanaman. Penurunan biomassa tanaman ini memengaruhi struktur vegetasi tundra, mengubah komposisi spesies, dan berpotensi menurunkan keragaman spesies tanaman. Dampak ini menunjukkan pentingnya peran herbivora dalam mengatur dinamika populasi tanaman. Namun, variasi dampaknya sangat bergantung pada jenis herbivora yang terlibat, apakah vertebrata atau invertebrata. Herbivora vertebrata, seperti rusa kutub, cenderung memberikan tekanan makan yang lebih intensif pada tanaman berkayu dan tinggi, sementara herbivora invertebrata, seperti serangga pemakan daun, sering kali fokus pada tanaman herba dan rumput, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Variasi Lokal dan Konteks Geografis

Efek keanekaragaman herbivora terhadap ekosistem tundra tidak seragam di seluruh wilayah Arktik. Variasi lokal dalam dampak herbivora disebabkan oleh perbedaan kondisi geografis, seperti elevasi, jarak ke garis pohon, suhu musiman, dan presipitasi tahunan. Sebagai contoh, tundra di wilayah dengan suhu musim panas yang lebih tinggi cenderung menunjukkan respon ekosistem yang lebih cepat terhadap aktivitas herbivora dibandingkan tundra di wilayah yang lebih dingin. Konteks geografis ini juga menentukan jenis vegetasi yang mendominasi, yang pada gilirannya memengaruhi pola makan herbivora. Dalam beberapa kasus, peningkatan keanekaragaman herbivora dapat memperluas niche ekologis, memungkinkan mereka memanfaatkan sumber daya yang lebih beragam dan memengaruhi lebih banyak komponen ekosistem. Namun, variasi ini juga menimbulkan tantangan dalam generalisasi hasil penelitian, sehingga memerlukan pendekatan lintas skala temporal dan spasial untuk memahami pengaruh herbivora secara lebih komprehensif, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Herbivora dan Siklus Nutrisi Ekosistem Tundra

Herbivora memainkan peran penting dalam mempercepat siklus nutrisi di tundra Arktik. Dengan mengonsumsi biomassa tanaman, herbivora meningkatkan laju dekomposisi melalui pelepasan ekskreta yang kaya nutrisi. Peningkatan suhu tanah akibat aktivitas makan herbivora juga mempercepat penguraian serasah, sehingga mempercepat pelepasan nitrogen dan fosfor ke dalam tanah. Namun, efek ini tidak selalu linier. Keanekaragaman herbivora yang tinggi dapat menciptakan interaksi trofik yang kompleks,

seperti kompetisi antarspesies atau perubahan preferensi makanan, yang dapat mengubah pola distribusi nutrisi. Sebagai contoh, di wilayah di mana herbivora besar seperti rusa kutub mendominasi, pengurangan vegetasi berkayu dapat menyebabkan perubahan jangka panjang dalam struktur komunitas tumbuhan dan penyediaan nutrisi, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Heterogenitas dan Bias dalam Penelitian

Salah satu tantangan utama dalam memahami dampak keanekaragaman herbivora adalah adanya heterogenitas dalam data penelitian. Artikel ini mencatat bahwa variasi dalam durasi penelitian, perbedaan geografis, dan pendekatan analitis menjadi sumber utama heterogenitas. Bias publikasi, seperti small study effect di mana studi kecil cenderung melaporkan efek yang lebih besar, juga menjadi kendala dalam menafsirkan hasil secara akurat. Model meta-analisis multilevel yang digunakan dalam penelitian ini membantu mengidentifikasi pengaruh variabel-variabel ekologis utama seperti elevasi, perubahan suhu musiman, dan jarak ke garis pohon terhadap hasil penelitian. Analisis sensitivitas yang dilakukan menunjukkan bahwa hasil utama cukup stabil, meskipun ada data yang hilang atau bias dari beberapa studi, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Implikasi bagi Kebijakan Konservasi

Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting bagi kebijakan konservasi di wilayah Arktik. Keanekaragaman herbivora, meskipun memiliki dampak positif dalam mempercepat siklus nutrisi, juga dapat memperburuk ancaman perubahan iklim melalui pelepasan karbon dari permafrost. Oleh karena itu, strategi konservasi harus mempertimbangkan keseimbangan antara melindungi keanekaragaman herbivora dan memitigasi risiko iklim. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami mekanisme spesifik yang menghubungkan keanekaragaman herbivora dengan dinamika ekosistem tundra. Studi lintas skala temporal dan spasial sangat penting untuk mengisi kesenjangan pengetahuan, terutama di lokasi-lokasi yang kurang dipelajari. Selain itu, penggunaan metodologi standar dapat membantu mengurangi bias dan meningkatkan perbandingan hasil antar penelitian, Spitzer, C. M., dkk (2022).

Sifat Akar Tanaman

Sifat Akar Tanaman dan Kontribusinya terhadap Umpan Balik Tanaman-Tanah di Tundra Sub-Arktik

Akar tanaman memainkan peran penting dalam dinamika ekosistem tundra sub-arktik, terutama melalui mekanisme umpan balik tanaman-tanah (plant-soil feedback/PSF). Penelitian terkini menyoroti beberapa aspek sifat akar yang memengaruhi arah dan kekuatan PSF. Salah satu temuan utama adalah bahwa sifat akar tertentu, seperti kandungan bahan kering dan strategi ekonomi akar, secara signifikan memengaruhi interaksi dengan mikroorganisme tanah dan kontribusinya terhadap dinamika ekosistem, Barbero-Palacios, L., dkk (2024).

Spektrum Ekonomi Akar dan Implikasinya terhadap PSF

Spektrum ekonomi akar (root economic spectrum/RES) merupakan salah satu konsep kunci dalam memahami peran sifat akar terhadap PSF. Akar dengan strategi acquisitive, yang ditandai oleh kandungan nitrogen tinggi, percabangan akar yang banyak, dan kandungan bahan kering rendah, cenderung menghasilkan PSF negatif. Strategi ini memungkinkan tanaman untuk memperoleh sumber daya secara agresif, tetapi pada saat yang sama meningkatkan kerentanannya terhadap patogen dan parasit tanah. Sebaliknya, akar dengan strategi konservatif, yang memiliki kandungan bahan kering tinggi, lebih tahan terhadap serangan patogen dan cenderung mendukung PSF positif. Hal ini mencerminkan adaptasi tanaman terhadap kondisi lingkungan tundra yang ekstrem, di mana sumber daya terbatas dan tekanan biotik tinggi. Kandungan nitrogen yang tinggi pada akar, misalnya, telah ditemukan menjadi faktor penarik utama bagi patogen tanah. Penelitian menunjukkan bahwa spesies tanaman seperti *Arabis alpina*, yang memiliki kandungan nitrogen akar tertinggi, lebih rentan terhadap infeksi patogen seperti *Mucor piriformis* dan *Didymella exigua*. Infeksi ini berkontribusi pada PSF negatif dengan menghambat pertumbuhan

tanaman berikutnya. Di sisi lain, akar dengan kandungan bahan kering tinggi menunjukkan resistensi yang lebih baik terhadap patogen dan mendukung pertumbuhan komunitas tanaman yang lebih stabil, Barbero-Palacios, L., dkk (2024).

Peran Mikroorganisme Tanah dalam PSF

Komunitas mikroorganisme tanah, khususnya jamur, memainkan peran penting dalam menentukan arah PSF. Dua ordo jamur, yaitu Mucorales dan Pleosporales, ditemukan berkorelasi negatif dengan PSF. Jamur-jamur ini berperan sebagai patogen yang merugikan, mengurangi pertumbuhan tanaman melalui patogenisitasnya. Misalnya, *Mucor piriformis* dari ordo Mucorales dan *Didymella exigua* dari Pleosporales menunjukkan hubungan langsung dengan PSF negatif. Sebaliknya, fungi mikoriza arbuskula (AM fungi), yang umumnya dikenal bermanfaat bagi pertumbuhan tanaman, tidak menunjukkan pengaruh signifikan terhadap PSF di tundra sub-arktik. Hal ini mungkin disebabkan oleh kelimpahan fungi AM yang relatif rendah di wilayah ini dibandingkan dengan ekosistem lain seperti padang rumput sedang. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pengaruh mikroorganisme tanah terhadap PSF sering kali tergantung pada spesies tanaman individu. Misalnya, *A. alpina* yang memiliki kandungan nitrogen tinggi, menunjukkan PSF negatif yang kuat karena lebih rentan terhadap infeksi patogen tanah. Hal ini menyoroti pentingnya memahami hubungan spesifik antara sifat akar tanaman dan mikroorganisme tanah dalam memprediksi dinamika komunitas ekosistem, Barbero-Palacios, L., dkk (2024).

Kandungan Bahan Kering Akar sebagai Indikator Adaptasi

Kandungan bahan kering akar yang tinggi merupakan indikator penting dari strategi konservatif tanaman di tundra sub-arktik. Akar dengan kandungan bahan kering tinggi tidak hanya lebih tahan terhadap serangan patogen tetapi juga menunjukkan adaptasi terhadap lingkungan yang miskin nutrisi. Tanaman dengan sifat ini cenderung menghasilkan PSF positif, yang mendukung keberlanjutan komunitas tanaman di lingkungan ekstrem. Hal ini mencerminkan bagaimana sifat morfologi akar dapat berfungsi sebagai strategi adaptif untuk mengatasi tekanan lingkungan di tundra, Barbero-Palacios, L., dkk (2024).

Hubungan Spesifik dengan Mikroorganisme: Temuan dan Keterbatasan

Penelitian juga mengidentifikasi keterbatasan dalam hubungan antara sifat akar dan komunitas mikroorganisme tanah. Misalnya, biomarker fosfolipid asam lemak (PLFA), yang sering digunakan untuk mengukur rasio bakteri terhadap jamur, tidak menunjukkan hubungan signifikan dengan PSF. Hal ini menunjukkan bahwa peran spesies mikroba tertentu lebih penting dibandingkan dengan pengelompokan mikroba secara umum dalam memengaruhi PSF. Selain itu, efek fungi AM yang biasanya bermanfaat mungkin tergeser oleh pengaruh fungi lain yang lebih dominan di ekosistem tundra sub-arktik, Barbero-Palacios, L., dkk (2024).

Keanekaragaman Herbivora dan Sifat Akar: Perspektif Perbandingan

Penelitian juga membandingkan dampak keanekaragaman herbivora dengan sifat akar tanaman dalam ekosistem tundra. Meskipun keduanya memengaruhi PSF, skalanya berbeda. Keanekaragaman herbivora lebih berdampak pada tingkat makro, seperti biomassa vegetasi dan suhu tanah, sementara sifat akar bekerja pada tingkat mikro, yaitu melalui interaksi spesifik dengan mikroorganisme tanah. Peran herbivora dalam mengatur biomassa tanaman dapat memodulasi efek sifat akar pada komunitas mikroba tanah, menciptakan interaksi multi-trofik yang kompleks. Keanekaragaman herbivora juga cenderung menunjukkan efek yang lebih nyata di lokasi penelitian tertentu, di mana variasi komposisi spesies dan tekanan herbivori bervariasi. Sebaliknya, sifat akar tanaman memiliki pengaruh yang lebih universal di tundra sub-arktik, mencerminkan adaptasi yang lebih konsisten terhadap kondisi lingkungan, Barbero-Palacios, L., dkk (2024).

Implikasi untuk Konservasi dan Perubahan Iklim

Penelitian ini menyoroti pentingnya memahami interaksi multi-trofik antara tanaman, mikroorganisme tanah, dan herbivora untuk konservasi ekosistem tundra. Dengan meningkatnya tekanan dari perubahan iklim, seperti pemanasan suhu dan perubahan

komposisi komunitas mikroba tanah, efek PSF dapat memengaruhi dinamika komunitas tanaman secara signifikan. Spesies tanaman dengan PSF negatif yang kuat, seperti *A. alpina*, mungkin lebih rentan terhadap perubahan ini, yang dapat mengarah pada hilangnya keanekaragaman hayati. Penemuan ini juga menggarisbawahi kebutuhan untuk penelitian lebih lanjut dalam memahami hubungan kompleks antara sifat akar, komunitas mikroorganisme tanah, dan dampak lingkungan. Studi yang lebih mendalam tentang spesies tanaman lain, termasuk semak kerdil yang lebih umum di tundra, dapat memberikan wawasan tambahan tentang pola PSF yang lebih luas.

KESIMPULAN

Keanekaragaman herbivora dan sifat akar tanaman memainkan peran yang signifikan dalam memengaruhi dinamika ekosistem tundra Arktik dan sub-arktik. Herbivora yang beragam memberikan dampak terhadap suhu tanah, biomassa tanaman, siklus nutrisi, dan struktur vegetasi. Aktivitas herbivora meningkatkan suhu tanah melalui pengurangan tutupan vegetasi, yang mempercepat proses dekomposisi dan pelepasan nutrisi. Namun, efek ini juga dapat memperburuk pelepasan karbon dari permafrost, menambah ancaman terhadap perubahan iklim. Keanekaragaman herbivora juga menekan biomassa tanaman dan mengubah komposisi spesies, dengan variasi dampak bergantung pada jenis herbivora, lokasi geografis, dan kondisi ekosistem lokal.

Sifat akar tanaman menunjukkan pengaruh besar terhadap umpan balik tanaman-tanah (plant-soil feedback/PSF). Akar dengan strategi konservatif, seperti kandungan bahan kering tinggi, mendukung PSF positif dan menunjukkan adaptasi yang lebih baik terhadap tekanan biotik dan lingkungan miskin nutrisi. Sebaliknya, akar dengan kandungan nitrogen tinggi cenderung mendukung PSF negatif karena rentan terhadap infeksi patogen. Peran mikroorganisme tanah, seperti fungi patogen dan mikoriza, juga sangat menentukan arah PSF, meskipun pengaruh spesies mikroba tertentu lebih signifikan daripada kelompok mikroba secara umum. Interaksi antara keanekaragaman herbivora dan sifat akar tanaman menciptakan pola kompleks yang memengaruhi keberlanjutan ekosistem tundra. Penelitian ini menggarisbawahi perlunya pendekatan lintas skala temporal dan spasial untuk memahami hubungan ini secara komprehensif. Implikasi kebijakan konservasi juga penting untuk menyeimbangkan perlindungan keanekaragaman hayati dengan mitigasi dampak perubahan iklim, terutama melalui pengelolaan herbivora dan pelestarian vegetasi tundra.

REFERENSI

- Azevedo, O., Parker, T. C., Siewert, M. B., & Subke, J.-A. (2021). Predicting soil respiration from plant productivity (NDVI) in a sub-arctic tundra ecosystem. *Remote Sensing*, 13(13), 2571.
- Barbero-Palacios, L., Barrio, I. C., García Criado, M., Kater, I., Petit Bon, M., Kolari, T. H. M., Björkås, R., Trepel, J., Lundgren, E., & Björnsdóttir, K. (2024). Herbivore diversity effects on Arctic tundra ecosystems: a systematic review. *Environmental Evidence*, 13(1), 6.
- Garnello, A., Marchenko, S., Nicolsky, D., Romanovsky, V., Ledman, J., Celis, G., Schädel, C., Luo, Y., & Schuur, E. A. G. (2021). Projecting permafrost thaw of sub-arctic tundra with a thermodynamic model calibrated to site measurements. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 126(6), e2020JG006218.
- Hanik, N. R., & Harsono, S. (2020). Implementasi Model Pembelajaran Komparasi yang Diintegrasikan dengan Pendekatan Kolaboratif Ditinjau dari Kemampuan Analisis Mahasiswa. *Jurnal Komunikasi Pendidikan*, 4(2), 114–122.
- Hobbie, J., Shaver, G., Høye, T. T., & Bowden, J. (2021). Arctic Tundra. *Arctic Ecology*, 103–132.
- Jayadianti, H., Cahyadi, T. A., Amri, N. A., & Pitayandanu, M. F. (2020). Metode

- Komparasi Artificial Neural Network Pada Prediksi Curah Hujan-Literature Review. *Jurnal Tekno Insentif*, 14(2), 47–53.
- Jonsson, H., Blume-Werry, G., Wackett, A., Olofsson, J., Arvidsson, E., Sparrman, T., & Klaminder, J. (n.d.). Non-Native Earthworms Alter Carbon Sequestration in Sub-Arctic Tundra Ecosystems. Available at SSRN 4685397.
- Lindén, E., Gough, L., & Olofsson, J. (2021). Large and small herbivores have strong effects on tundra vegetation in Scandinavia and Alaska. *Ecology and Evolution*, 11(17), 12141–12152.
- Männistö, M. K., Ahonen, S. H. K., Ganzert, L., Tirola, M., Stark, S., & Häggblom, M. (2024). Bacterial and fungal communities in sub-Arctic tundra heaths are shaped by contrasting snow accumulation and nutrient availability. *FEMS Microbiology Ecology*, 100(4), fiae036.
- Mauclet, E., Agnan, Y., Hirst, C., Monhonval, A., Pereira, B., Vandeuren, A., Villani, M., Ledman, J., Taylor, M., & Jasinski, B. L. (2021). Changing sub-Arctic tundra vegetation upon permafrost degradation: impact on foliar mineral element cycling. *Biogeosciences Discussions*, 2021, 1–34.
- Palacios, L. B., Barrio, I. C., Axmacher, J. C., Bartra, L., Björnsdóttir, K., Björkås, R., Defourneaux, M., Criado, M. G., Gilg, O., & den Herder, M. (2023). What are the effects of herbivore diversity on tundra ecosystems? Icelandic Ecological Society Meeting 2023.
- Post, E., Kaarlejärvi, E., Macias-Fauria, M., Watts, D. A., Bøving, P. S., Cahoon, S. M. P., Higgins, R. C., John, C., Kerby, J. T., & Pedersen, C. (2023). Large herbivore diversity slows sea ice-associated decline in arctic tundra diversity. *Science*, 380(6651), 1282–1287.
- Smith, P. A., McKinnon, L., Meltofte, H., Lanctot, R. B., Fox, A. D., Leafloor, J. O., Soloviev, M., Franke, A., Falk, K., & Golovatin, M. (2020). Status and trends of tundra birds across the circumpolar Arctic. *Ambio*, 49, 732–748.
- Speed, J. D. M., Chimal-Ballesteros, J. A., Martin, M. D., Barrio, I. C., Vuorinen, K. E. M., & Soininen, E. M. (2021). Will borealization of Arctic tundra herbivore communities be driven by climate warming or vegetation change? *Global Change Biology*, 27(24), 6568–6577.
- Spitzer, C. M., Sundqvist, M. K., Wardle, D. A., Gundale, M. J., & Kardol, P. (2023). Root trait variation along a sub-arctic tundra elevational gradient. *Oikos*, 2023(1), e08903.
- Spitzer, C. M., Wardle, D. A., Lindahl, B. D., Sundqvist, M. K., Gundale, M. J., Fanin, N., & Kardol, P. (2022). Root traits and soil micro-organisms as drivers of plant–soil feedbacks within the sub-arctic tundra meadow. *Journal of Ecology*, 110(2), 466–478.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).