

PENGEMBANGAN VARIETAS TANAMAN TAHAN SALINITAS MELALUI REKAYASA GENETIK DAN MARKET ASSISTED SELECTION (MAS)

Kiki Amelia¹, Hasrinah², Nur Aisyah³, Rachmawati⁴

^{1,2,3,4}Universitas Negeri Makassar

¹kikiameliasaid.spd@gmail.com, ²rhinahas82@gmail.com,

³nuraisyah28082000@gmail.com

ABSTRACT

Soil salinity is a major limiting factor in global agricultural production, affecting plant growth, physiology, and yield, and poses a major threat to global agricultural productivity. The accumulation of Na⁺ and Cl⁻ ions cause osmotic stress, ion toxicity, and metabolic disorders in plants. Developing salinity-tolerant crop varieties is an important strategy for increasing the productivity of marginal lands. Modern biotechnological approaches such as genetic engineering and marker-assisted selection (MAS) enable the development of superior varieties more quickly and accurately than conventional methods, offering a rapid and precise solution for developing salt-tolerant crop varieties. Genetic engineering allows the direct introduction of salinity tolerance genes, while MAS allows the selection of tolerance genes based on molecular markers. This article reviews the basic mechanisms of salinity stress, the role of tolerance-related genes, and biotechnological strategies used in plant breeding. An integrative approach between genetic engineering and MAS is an effective strategy for producing varieties adaptive to saline soils in modern plant breeding (Munns & Tester, 2008; Flowers & Colmer, 2015).

Keywords: *Salinity, genetic engineering, marker-assisted selection, salt tolerance, plant breeding*

ABSTRAK

Salinitas tanah merupakan salah satu faktor pembatas utama produksi pertanian global yang mempengaruhi pertumbuhan, fisiologi, dan hasil tanaman dan menjadi ancaman utama bagi produktivitas pertanian dunia. Akumulasi ion Na⁺ dan Cl⁻ menyebabkan stres osmotik, toksisitas ion, serta gangguan metabolisme pada tanaman. Pengembangan varietas tanaman tahan salinitas menjadi strategi penting untuk meningkatkan produktivitas lahan marginal. Pendekatan bioteknologi modern seperti rekayasa genetika dan marker-assisted selection (MAS) memungkinkan pengembangan varietas unggul secara lebih cepat dan akurat dibandingkan metode konvensional karena menawarkan solusi cepat dan presisi untuk mengembangkan varietas tanaman toleran garam. Rekayasa genetika memungkinkan introduksi gen toleransi salinitas secara langsung, sedangkan MAS memungkinkan seleksi gen toleransi berdasarkan penanda molekuler. Artikel ini mengulas mekanisme dasar stres salinitas, peran gen terkait toleransi, dan strategi bioteknologi yang digunakan dalam pemuliaan tanaman. Pendekatan integratif antara rekayasa genetika dan MAS menjadi strategi efektif dalam menghasilkan varietas adaptif di lahan salin dalam pemuliaan tanaman modern (Munns & Tester, 2008; Flowers & Colmer, 2015).

Kata kunci: Salinitas, rekayasa genetika, marker-assisted selection, toleransi garam, pemuliaan tanaman

A. Pendahuluan

1. Pengertian Salinitas

Salinitas adalah ukuran konsentrasi garam terlarut dalam air, umumnya dinyatakan dalam satuan *part per thousand* (ppt) atau psu (*practical salinity units*). Nilai salinitas ditentukan oleh jumlah ion-ion utama seperti natrium (Na^+), klorida (Cl^-), magnesium (Mg^{2+}), dan sulfat (SO_4^{2-}) yang terlarut di dalam air. Parameter ini menjadi indikator penting dalam oseanografi, hidrologi, serta pengelolaan lingkungan perairan (Talley, 2011).

Salinitas di laut rata-rata berada pada kisaran 34–35 ppt, namun nilainya dapat bervariasi tergantung evaporasi, curah hujan, aliran sungai, serta pertukaran air dengan wilayah sekitarnya. Misalnya, perairan yang menerima banyak penguapan seperti Laut Merah memiliki salinitas lebih tinggi, sedangkan daerah dengan banyak masukan air tawar seperti muara sungai memiliki salinitas lebih rendah (Pickard & Emery, 1990).

Proses yang memengaruhi salinitas meliputi evaporasi, presipitasi, pencairan es, pembekuan laut, dan aliran air sungai. Evaporasi cenderung meningkatkan salinitas karena mengurangi volume air,

sedangkan curah hujan atau masuknya air tawar akan menurunkannya. Proses-proses ini membentuk dinamika salinitas yang memengaruhi stratifikasi serta pergerakan massa air laut (Schmidt, 2010).

Pengukuran salinitas dapat dilakukan dengan beberapa metode, seperti pengukuran konduktivitas menggunakan CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), refraktometer, atau titrasi kimia seperti metode argentometri. Sensor konduktivitas modern menghitung salinitas berdasarkan hubungan matematis antara konduktivitas elektrik, temperatur, dan tekanan (UNESCO, 1981).

Dampak salinitas terhadap organisme perairan sangat signifikan karena salinitas memengaruhi tekanan osmotik yang harus diatur oleh organisme. Spesies euryhaline mampu bertahan pada rentang salinitas luas, sementara stenohaline hanya dapat hidup pada kisaran sempit. Perubahan salinitas yang drastis dapat menyebabkan stres osmotik yang mengganggu pertumbuhan, reproduksi, dan kelangsungan hidup organisme (Kinne, 1971).

Dalam perikanan dan budidaya, salinitas menjadi parameter penting untuk menentukan lokasi dan teknik budidaya. Misalnya, udang *Litopenaeus vannamei* dapat dibudidayakan pada rentang salinitas luas, tetapi performa optimal biasanya dicapai pada salinitas menengah. Pengelolaan yang baik perlu memonitor salinitas agar tidak melebihi toleransi fisiologis organisme budidaya (Boyd, 2015).

Perubahan iklim turut memengaruhi distribusi salinitas global melalui perubahan pola curah hujan, evaporasi, dan aliran sungai. Wilayah yang mengalami peningkatan evaporasi cenderung menjadi lebih asin, sedangkan daerah dengan peningkatan presipitasi atau pencairan es mengalami penurunan salinitas. Variasi ini menjadi indikator penting dalam studi sirkulasi laut dan perubahan iklim global (Durack et al., 2012).

Salinitas tanah telah menjadi masalah serius bagi pertanian global mempengaruhi produktivitas pertanian di berbagai wilayah dunia. Stres salinitas menyebabkan gangguan keseimbangan ion, tekanan osmotik, serta kerusakan struktur sel tanaman. Tanaman yang terpapar

salinitas mengalami penurunan pertumbuhan, fotosintesis, dan hasil panen. Salinitas mempengaruhi lebih dari 20% lahan irigasi dan terus meningkat akibat perubahan iklim, intrusi air laut, dan irigasi yang tidak terkendali. Salinitas menghambat pertumbuhan tanaman melalui stres osmotik dan ionik yang merusak fungsi sel. Ion Na^+ yang berlebihan dapat menggantikan ion K^+ yang penting bagi metabolisme tanaman, sehingga mengganggu fungsi enzim dan proses fisiologis. Selain itu, salinitas juga meningkatkan produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang dapat merusak membran sel dan protein. Metode pemuliaan konvensional memiliki keterbatasan karena toleransi salinitas merupakan sifat kompleks yang dikendalikan oleh banyak gen. Oleh karena itu, penelitian mengenai teknologi genetika seperti rekayasa gen dan Marker Assisted Selection (MAS) penting untuk mempercepat pengembangan varietas toleran garam (Wang et al., 2021; Shrivastava & Kumar, 2015).

Salinitas tanah di lahan pertanian, yang umumnya diukur melalui *electrical conductivity* (EC) >4 dS/m, merupakan faktor pembatas utama

bagi pertumbuhan tanaman akibat akumulasi ion toksik seperti Na^+ dan Cl^- yang menimbulkan stres osmotik dan oksidatif. Dampak negatif ini berkontribusi terhadap penurunan produktivitas tanaman pangan utama di wilayah pesisir dan lahan garam (Wulandari & Candra 2025). Strategi meningkatkan toleransi tanaman terhadap salinitas semakin penting dalam konteks perubahan iklim dan kebutuhan pangan global yang terus meningkat. Pemuliaan tanaman konvensional telah menghasilkan varietas yang lebih adaptif terhadap cekaman lingkungan, tetapi pendekatan tersebut sering kali memerlukan waktu panjang dan memiliki keterbatasan dalam menargetkan sifat kompleks seperti toleransi salinitas. Melalui *marker-assisted selection* (MAS) dan rekayasa genetika, saintis dapat mempercepat proses seleksi berdasarkan penanda molekuler atau memodifikasi gen target secara langsung untuk meningkatkan toleransi stres salinitas.

2. Dampak Salinitas terhadap Tanaman

1). Dampak Molekuler

Stres salinitas memicu perubahan ekspresi gen yang melibatkan jalur

sinyal hormon abscisic acid (ABA), transduksi sinyal kalsium, dan aktivasi berbagai transkripsi faktor seperti DREB, NAC, MYB, dan bZIP. Respons ini membantu tanaman menyeimbangkan tekanan osmotik dan mengurangi toksisitas ion Na^+ (Roy *et al.*, 2014).

2). Dampak Fisiologis

Akumulasi ion Na^+ dan Cl^- dalam jaringan tanaman menyebabkan ketidakseimbangan ion, penurunan fotosintesis, perubahan membuka-menutup stomata, dan gangguan metabolisme seluler. Hal ini berujung pada penurunan biomassa dan produksi (Munns & Gilliam, 2015).

3). Dampak Morfologis

Pada tingkat morfologi, tanaman yang terpapar garam menunjukkan daun menguning, nekrosis, penurunan luas daun, dan pertumbuhan akar yang terbatas. Gejala ini menjadi indikator penting dalam seleksi fenotipik tanaman toleran salinitas (Parihar *et al.*, 2015).

4). Toleransi Garam

Toleransi garam adalah kemampuan organisme—baik tanaman, hewan, maupun mikroorganisme—untuk bertahan hidup, tumbuh, dan bereproduksi dalam kondisi salinitas tinggi.

Toleransi ini dipengaruhi oleh mekanisme fisiologis seperti regulasi osmotik, eksklusi ion, dan perlindungan sel terhadap stres ionik. Pada tanaman, toleransi garam menjadi faktor penting untuk keberhasilan pertumbuhan di lahan salin atau daerah pesisir (Munns & Tester, 2008).

Pada tanaman, salinitas tinggi menyebabkan stres osmotik dan toksisitas ion akibat akumulasi natrium (Na^+) dan klorida (Cl^-) dalam jaringan. Tanaman yang toleran garam memiliki kemampuan membatasi penyerapan ion berlebih atau mengkompartementalisasinya ke dalam vakuola untuk mengurangi kerusakan seluler. Regulasi semacam ini penting untuk menjaga fungsi fotosintesis dan pertumbuhan akar (Flowers, Munns, & Colmer, 2015).

Beberapa tanaman mampu meningkatkan toleransi garam melalui sintesis osmolit kompatibel, seperti prolin, glisin betain, dan gula tertentu, yang berfungsi menjaga keseimbangan osmotik tanpa mengganggu metabolisme. Mekanisme ini juga membantu stabilisasi protein dan membran sel saat terjadi stres salinitas (Chen & Murata, 2011).

Dalam konteks ekosistem pesisir, banyak tanaman seperti halofit secara alami memiliki tingkat toleransi garam yang tinggi. Halofit mampu tumbuh pada salinitas mendekati atau melebihi air laut melalui mekanisme khusus, termasuk kelenjar ekskresi garam atau kemampuan menyimpan ion dalam vakuola besar. Tanaman-tanaman ini penting dalam stabilisasi lahan pesisir dan rehabilitasi tanah salin (Flowers & Colmer, 2008).

Pada hewan air, terutama ikan, toleransi garam ditentukan oleh kemampuan osmoregulasi, yaitu proses mengontrol keseimbangan garam dan air dalam tubuh. Spesies euryhaline seperti tilapia atau salmon dapat hidup pada rentang salinitas luas karena mampu menyesuaikan fungsi insang, ginjal, dan usus saat berpindah dari air tawar ke air asin. Sebaliknya, spesies stenohaline hanya mampu hidup pada kondisi salinitas tertentu (Evans, Piermarini, & Choe, 2005).

Dalam akuakultur, toleransi garam menjadi parameter kunci karena memengaruhi kelangsungan hidup, pertumbuhan, dan kesehatan organisme budidaya. Beberapa komoditas seperti *Litopenaeus vannamei* (udang vaname) memiliki

toleransi garam yang luas sehingga dapat dibudidayakan dari salinitas rendah hingga mendekati air laut, memberikan fleksibilitas tinggi bagi petani. Namun, kisaran optimal salinitas tetap diperlukan untuk mencapai pertumbuhan maksimal dan mengurangi stres (Boyd & McNevin, 2015).

Secara global, peningkatan salinitas tanah dan perairan akibat perubahan iklim serta aktivitas manusia menjadi tantangan serius bagi sektor pertanian dan perikanan. Pengembangan varietas tanaman toleran garam, teknik bioremediasi, serta sistem budidaya adaptif sangat penting untuk mempertahankan produktivitas pada lingkungan yang semakin salin. Studi mengenai toleransi garam menjadi dasar ilmiah dalam merancang strategi mitigasi tersebut (Shrivastava & Kumar, 2015).

5). Pemuliaan tanaman

Pemuliaan tanaman adalah ilmu dan praktik yang bertujuan meningkatkan sifat tanaman melalui seleksi, persilangan, atau teknik modern seperti bioteknologi. Tujuan utamanya mencakup peningkatan produktivitas, ketahanan terhadap hama dan penyakit, efisiensi penggunaan air dan nutrisi, serta adaptasi terhadap

perubahan iklim. Menurut FAO, pemuliaan tanaman berperan penting dalam memastikan ketahanan pangan global terutama di tengah meningkatnya kebutuhan populasi dunia. (FAO, 2019)

Metode pemuliaan klasik, seperti seleksi massa dan seleksi galur murni, telah digunakan selama ribuan tahun untuk mempertahankan sifat unggul yang muncul secara alami pada populasi tanaman. Metode tersebut bertumpu pada keragaman genetik alami yang memungkinkan pemulia memilih individu terbaik untuk dikembangkan. Pendekatan ini umumnya digunakan pada tanaman yang menyerbuk sendiri seperti padi atau gandum. (FAO, 2019).

Selain seleksi, persilangan merupakan teknik penting untuk menggabungkan sifat unggul dari dua atau lebih tetua. Persilangan memungkinkan munculnya kombinasi genetik baru sehingga varietas yang dihasilkan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap stres biotik maupun abiotik. Institusi seperti CGIAR mencatat bahwa persilangan modern membantu menciptakan variasi genetik yang lebih besar untuk menghadapi tantangan perubahan iklim. (CGIAR, 2020).

Dalam beberapa dekade terakhir, pemuliaan tanaman berkembang melalui pemanfaatan bioteknologi, seperti kultur jaringan, penanda molekuler (marker-assisted selection), dan rekayasa genetika. Teknologi penanda memungkinkan pemulia mengidentifikasi gen tertentu tanpa harus menunggu tanaman tumbuh sepenuhnya, sehingga mempercepat proses seleksi. Menurut laporan dari USDA, pendekatan berbasis DNA meningkatkan efisiensi pengembangan varietas unggul secara signifikan (USDA, 2020).

Selain bioteknologi, teknik modern lain seperti genom editing (CRISPR-Cas9) mulai diterapkan untuk menghasilkan tanaman dengan perubahan genetik yang lebih presisi. Teknologi ini dinilai lebih cepat dan hemat biaya dibandingkan rekayasa genetika konvensional, serta memungkinkan modifikasi sifat spesifik tanpa memasukkan gen asing. Lembaga riset seperti NIH menjelaskan bahwa CRISPR membuka peluang besar dalam pengembangan varietas tahan cekaman dan bernilai ekonomi tinggi (NIH, 2021).

Pemuliaan tanaman juga sangat penting dalam menghadapi

perubahan iklim, terutama karena peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, dan meningkatnya salinitas lahan. Breeder kini fokus mengembangkan varietas toleran kekeringan, tahan banjir, dan toleran garam. Program internasional di bawah World Bank menegaskan bahwa inovasi varietas adaptif adalah strategi vital untuk ketahanan pangan jangka panjang (World Bank, 2021).

Di tingkat praktis, pemuliaan tanaman berkontribusi langsung terhadap peningkatan produksi pertanian. Banyak negara berkembang kini memakai varietas unggul hasil pemuliaan untuk meningkatkan hasil panen tanpa memperluas lahan. Hal ini sejalan dengan laporan IRRI yang memperlihatkan bahwa varietas padi modern telah meningkatkan produksi secara signifikan di Asia (IRRI, 2019).

3. Rekayasa Genetika dan Marker-Assisted Selection (MAS)

Perkembangan teknologi bioteknologi pertanian telah membawa inovasi penting dalam pemuliaan tanaman modern, khususnya melalui rekayasa genetika dan marker-assisted selection (MAS) sebagai alat utama untuk mempercepat dan mempermudah

seleksi sifat unggul. Rekayasa genetika merupakan cabang bioteknologi yang memungkinkan modifikasi langsung terhadap materi genetik organisme untuk menghasilkan sifat yang diinginkan, seperti ketahanan terhadap stres abiotik atau peningkatan hasil tanaman, dengan memasukkan, mengubah, atau mengatur ulang gen tertentu di dalam genom tanaman target (Ardi, 2025).

Produk dari rekayasa genetika tanaman sering kali dikenal sebagai organisme hasil rekayasa genetika (GMO), yaitu organisme yang telah mengalami perubahan genetik melalui teknik modern yang tidak terbatas pada batas spesies, yang berbeda dari variasi yang terjadi secara alami atau melalui pemuliaan konvensional. Dalam konteks pertanian saat ini, rekayasa genetika digunakan untuk menghasilkan varietas yang memiliki ketahanan terhadap hama, penyakit, herbisida, serta tekanan lingkungan seperti kekeringan dan salinitas, yang sangat penting untuk menjawab tantangan perubahan iklim dan ketahanan pangan global (Ardi, 2025).

Sementara itu, Marker-Assisted Selection (MAS) merupakan metode pemuliaan yang memanfaatkan

penanda molekuler (DNA markers) yang terhubung secara genetik dengan gen atau lokus kuantitatif yang mengendalikan sifat agronomis penting. MAS memungkinkan seleksi genotip yang mengandung alel unggul secara lebih cepat dan akurat tanpa harus menunggu fenotipe muncul sepenuhnya pada tanaman, sehingga mempercepat siklus pemuliaan dan meningkatkan efisiensi proses seleksi (Ardi, 2025).

Prinsip MAS didasarkan pada pengetahuan tentang lokasi gen atau Quantitative Trait Loci (QTL) dalam genom serta hubungan erat antara penanda genetik dengan sifat target, memungkinkan seleksi lebih dini dan mengurangi pengaruh lingkungan terhadap ekspresi fenotipik. Sejak beberapa dekade terakhir, MAS telah menunjukkan kontribusi besar dalam program pemuliaan berbagai tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan gandum untuk sifat yang sulit diukur secara langsung seperti toleransi stres abiotik, kualitas biji, dan resistensi penyakit (Misra, A., & Singh, R. (2025).

Integrasi antara pendekatan rekayasa genetika yang memungkinkan perubahan genom secara langsung dan MAS yang

mempercepat penggabungan varietas unggul menunjukkan potensi luar biasa dalam menghadirkan varietas yang lebih adaptif dan produktif di era perubahan iklim dan tekanan populasi global yang terus meningkat. Oleh karena itu, pengembangan pemahaman yang kuat tentang kedua pendekatan ini menjadi sangat penting dalam rangka mewujudkan sistem pertanian yang berkelanjutan dan aman bagi masa depan (Ardi, 2025).

B. Metode Penelitian

Kajian ini merupakan telaah pustaka sistematis terhadap publikasi ilmiah nasional dan internasional terbaru yang memuat topik salinitas tanaman, pemuliaan berbasis penanda, dan rekayasa genetika, serta artikel lain yang relevan dalam konteks MAS dan rekayasa genetika. Data yang dipakai dalam penulisan artikel ini berupa jurnal hasil penelitian, buku, serta artikel yang berkaitan dengan judul. Prosedur penulisan diawali dengan mengumpulkan referensi yang berkaitan dengan judul artikel, kemudian, dianalisis guna mendapatkan informasi yang sesuai dengan judul dan selanjutnya disusun

secara terstruktur menjadi sebuah artikel.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Mekanisme Toleransi Tanaman terhadap Salinitas

Tanaman memiliki berbagai mekanisme adaptasi untuk bertahan pada kondisi salinitas tinggi. Mekanisme ini dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama: (1) eksklusi ion, (2) toleransi jaringan terhadap ion, dan (3) penyesuaian osmotik.

1). Eksklusi Ion (Ion Exclusion)
Tanaman mengaktifkan mekanisme eksklusi ion untuk mencegah masuknya Na^+ dan Cl^- ke jaringan fotosintetik. Protein transporter seperti *SOS1* berperan dalam mengekspor Na^+ dari sitosol ke luar sel, sehingga menjaga stabilitas ionik. Eksklusi Na^+ di akar merupakan strategi penting agar ion toksik tidak mencapai daun dan mengganggu fotosintesis.

2). Toleransi Jaringan terhadap Ion (Tissue Tolerance)

Pada tanaman toleran garam, ion Na^+ dapat disekuestrasi ke dalam vakuola melalui transporter seperti *NHX1*. Mekanisme ini memungkinkan tanaman mempertahankan homeostasis ion dalam sitosol

sekaligus memanfaatkan akumulasi ion sebagai kontribusi terhadap osmoregulasi. Selain itu, sintesis osmolit seperti prolin, glisin betain, dan sorbitol membantu menjaga tekanan turgor seluler.

3). Penyesuaian Osmotik (Osmotic Adjustment)

Stres osmotik akibat salinitas menyebabkan penurunan potensi air sel, sehingga tanaman harus meningkatkan kandungan osmolit organik untuk mempertahankan turgor. Penyesuaian osmotik ini juga berkaitan dengan aktivasi jalur hormonal terutama abscisic acid (ABA) yang mengatur respons stomata serta ekspresi gen-gen toleransi stres.

Tanaman yang tumbuh pada kondisi salinitas tinggi menunjukkan adaptasi kompleks yang melibatkan respon osmotik dan ionik. Mekanisme osmotik berupa penyesuaian tekanan osmotik sel melalui akumulasi osmolit seperti prolin, gula, dan senyawa berenergi rendah lain untuk mempertahankan potensi air sel agar tetap tinggi di tengah tekanan garam eksternal yang tinggi, sehingga kemampuan tanaman dalam menyerap air tidak terhambat secara drastis oleh konsentrasi garam yang

tinggi di tanah. Mekanisme ionik melibatkan selektivitas transport ion, khususnya mempertahankan rasio K^+/Na^+ yang optimal dalam sitosol melalui transport ion selektif dan eksklusi Na^+ dari jaringan penting seperti daun guna mengurangi toksisitas ion. Respon fisiologis ini saling terkait dan merupakan strategi utama dalam toleransi salinitas yang memengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman di lahan salin.

2. Peran Molekuler dan Genetika pada Toleransi Salinitas

Respons tanaman terhadap salinitas bersifat polygenik dan kompleks, melibatkan banyak jalur genetik yang mencakup transport ion, pengaturan sinyal stres, dan faktor transkripsi yang mengatur ekspresi gen responsif terhadap garam. Transporter Na^+/H^+ antiporter dan transporter K^+ berperan mengatur keseimbangan ion, sementara faktor transkripsi seperti DREB, NAC, MYB, dan WRKY turut mengatur jalur respons stres. Teknologi genomik modern seperti RNA-Seq dan analisis omik telah mengungkapkan banyak kandidat gen respons salinitas, memberikan wawasan tentang bagaimana modul genetik berkontribusi terhadap toleransi

tanaman dan membuka peluang untuk manipulasi genetik strategis guna meningkatkan toleransi pada varietas unggul.

3). Rekayasa Genetika untuk Toleransi Salinitas

Pengembangan varietas toleran salinitas melalui rekayasa genetika bertujuan untuk memperkenalkan gen yang berkontribusi secara langsung terhadap respon salinitas, seperti gen-gen yang mengatur transport ion, antioksidan, dan respon hormon. Teknik pengeditan genom seperti CRISPR/Cas secara signifikan mempercepat kemampuan modifikasi gen target yang berperan dalam toleransi cekaman abiotik, termasuk salinitas, meskipun masih terdapat tantangan dalam penerapan komersialnya karena regulasi dan stabilitas ekspresi gen yang harus dipastikan. Pendekatan ini dianggap penting di tengah meningkatnya tekanan salinitas tanah yang memengaruhi produktivitas tanaman pangan di berbagai wilayah tropis dan subtropis.

a. Prinsip Rekayasa Genetika

Rekayasa genetika memungkinkan transfer gen toleransi salinitas dari organisme lain ke tanaman target.

Teknik ini melibatkan isolasi gen target, transfer gen menggunakan vektor, dan regenerasi tanaman transgenik.

Penelitian menunjukkan bahwa transfer gen tertentu dapat meningkatkan toleransi salinitas tanaman. Misalnya, transfer gen *MDAR1* dari Arabidopsis ke tanaman gandum menghasilkan tanaman transgenik dengan peningkatan toleransi terhadap stres salinitas melalui peningkatan sistem antioksidan. ([PubMed](#))

b. Gen yang Berperan dalam Toleransi Salinitas

Beberapa gen penting meliputi:

- NHX1 – penyimpanan Na^+ dalam vakuola
- HKT1 – transport ion Na^+
- DREB – regulasi respons stres
- BADH – sintesis osmoprotektan

Rekayasa genetika memungkinkan peningkatan toleransi salinitas secara langsung dengan memodifikasi ekspresi gen tersebut.

c. Modifikasi Gen Pengatur Homeostasis Ion

Rekayasa gen yang mengontrol homeostasis ion seperti NHX, SOS1, dan HKT terbukti efektif dalam meningkatkan toleransi salinitas. NHX

berperan dalam pengkompartementasian Na^+ ke vakuola, SOS1 membantu mengeluarkan Na^+ dari sel, dan HKT meningkatkan selektivitas penyerapan K^+ .
(Zhu, 2003; Munns et al., 2012)

d. Gen Pembentuk Osmoprotektan

Tanaman yang direkayasa untuk memproduksi lebih banyak osmoprotektan (seperti prolin dan glisin betain) dapat mempertahankan kestabilan osmotik saat kondisi salinitas tinggi. Jalur biosintesis osmoprotektan sering menjadi target rekayasa genetik.
(Ashraf & Foolad, 2007)

e. Rekayasa Jalur Antioksidan

Stres salinitas meningkatkan produksi ROS, sehingga overekspresi gen antioksidan seperti SOD, CAT, dan APX membantu meminimalkan kerusakan oksidatif. Strategi ini meningkatkan ketahanan fisiologis tanaman terhadap garam.
(Gupta & Huang, 2014)

f. Genome Editing Menggunakan CRISPR-Cas

Teknologi CRISPR memungkinkan pengeditan presisi pada gen yang mengatur toleransi salinitas tanpa menambahkan DNA

asing. Modifikasi gen pengatur ion atau jalur sinyal stres telah menghasilkan tanaman toleran garam dengan stabilitas genetik tinggi.*(Zhang et al., 2020)*

g. Keunggulan Rekayasa Genetika

- 1). Presisi tinggi
- 2). Transfer gen spesifik
- 3). Pengembangan varietas lebih cepat
- 4). Tidak tergantung pada variasi genetik alami.

4. Market Assisted Selection (MAS)

1). Pengertian MAS

Marker-assisted selection adalah teknik seleksi tanaman berdasarkan penanda molekuler yang terkait dengan gen toleransi salinitas.

Penanda molekuler seperti SSR dan SNP memungkinkan identifikasi gen toleransi secara akurat tanpa menunggu ekspresi fenotip.

Seleksi berbasis markah molekuler (Marker-Assisted Selection/MAS) membantu mempercepat pemuliaan varietas toleran salinitas dengan memilih genotip berdasarkan penanda genetik yang terasosiasi dengan toleransi tanpa harus bergantung pada kondisi lingkungan ruang percobaan tertentu. MAS memungkinkan seleksi gen

secara lebih efisien, terutama untuk sifat kompleks yang dikendalikan oleh banyak lokus seperti toleransi salinitas. Dengan mengidentifikasi QTL yang berhubungan dengan mekanisme toleransi seperti eksklusi ion dan akumulasi osmolit, MAS membantu mempercepat proses pemuliaan untuk menghasilkan varietas yang tangguh di lahan bergaram tinggi.

2). Contoh Keberhasilan MAS

Penggunaan marker molekuler telah berhasil meningkatkan toleransi salinitas pada padi melalui transfer QTL *Saltol*. Tanaman hasil seleksi menunjukkan peningkatan toleransi salinitas pada tahap awal pertumbuhan dibandingkan varietas asli. ([PubMed](#))

Selain itu, penanda SSR telah digunakan untuk mengidentifikasi genotipe tomat toleran salinitas dan membedakan varietas toleran dan sensitif. ([J-STAGE](#))

Penelitian lain menunjukkan bahwa penggunaan marker molekuler memungkinkan identifikasi hubungan genetik dan seleksi gen toleransi secara efektif dalam program pemuliaan padi. ([journaljabb.com](#))

3). Keunggulan MAS

Menurut *Collard & Mackill, 2008*, MAS memiliki keunggulan sebagai berikut :

- a. MAS memungkinkan seleksi berbasis penanda DNA yang tidak dipengaruhi lingkungan sehingga lebih akurat dibanding seleksi fenotipik. Pendekatan ini sangat efektif untuk karakter kompleks seperti toleransi salinitas.
- b. Seleksi lebih cepat
- c. Akurasi tinggi
- d. Mengurangi waktu pemuliaan
- e. Tidak memerlukan modifikasi genetik langsung

4). Jenis Penanda DNA

Penanda molekuler seperti SSR dan SNP banyak digunakan dalam pemuliaan tanaman modern karena stabil, mudah dideteksi, dan memiliki tingkat polimorfisme tinggi (*Semagn et al., 2006*).

5). Aplikasi MAS dalam Toleransi Salinitas

Dalam tanaman padi, QTL *Saltol* merupakan salah satu temuan penting yang berkontribusi terhadap toleransi garam pada fase vegetatif. MAS telah digunakan untuk mengintrogressi *Saltol* ke berbagai varietas unggul lokal (*Thomson et al., 2010*).

6). Sinergi Rekayasa Genetika dan Marker Assisted Selection (MAS)

Pendekatan integratif antara rekayasa genetik dan MAS memungkinkan pengembangan varietas toleran garam secara lebih efisien. Rekayasa genetik dapat memperkenalkan atau memodifikasi gen tertentu, sementara MAS mempercepat proses penyilangan untuk menggabungkan sifat tersebut ke varietas lokal yang sudah adaptif dan produktif (*Varshney et al., 2014*).

Strategi pemuliaan modern kini menggabungkan pendekatan genetik molekuler, marker-assisted breeding, dan bioteknologi untuk merancang varietas toleran salinitas yang efektif dan produktif. Pendekatan integratif ini mencakup identifikasi gen kunci melalui genomik, pemetaan QTL, dan penggunaan teknik modern seperti gene pyramiding yang memadukan beberapa gen toleran dalam satu varietas unggul guna meningkatkan stabilitas respons di berbagai kondisi cekaman. Selain itu, pemantauan ekspresi gen target selama fase adaptasi memberikan landasan ilmiah dalam memilih kombinasi gen yang tepat untuk varietas toleran garam. Kombinasi kedua metode ini memungkinkan:

- a. Peningkatan toleransi salinitas
- b. Percepatan pemuliaan tanaman
- c. Stabilitas genetik yang lebih baik
- d. Peningkatan produktivitas tanaman

6). Tantangan dan Peluang
Tantangan

Toleransi salinitas merupakan sifat kuantitatif yang dikendalikan oleh banyak gen sehingga rekayasa satu gen sering tidak cukup. Selain itu, regulasi terhadap GMO dan penerimaan publik turut menjadi hambatan implementasi varietas rekayasa genetik (*Flowers et al., 2010*)

Peluang

Kemajuan teknologi genomik, bioinformatika, dan CRISPR/ Cas9, Transcriptomics, Precision breeding akan mempercepat pengembangan varietas tahan salinitas dengan akurasi tinggi. Pendekatan ini sangat penting untuk mendukung ketahanan pangan global, terutama di wilayah dengan tingkat salinitas tinggi. Teknologi ini juga memberikan peluang besar untuk menghasilkan varietas toleran salinitas non-transgenik yang lebih diterima publik. Kebutuhan global terhadap tanaman

toleran garam juga meningkatkan urgensi penelitian ini (Qin et al., 2020).

D. Kesimpulan

Salinitas merupakan salah satu faktor pembatas utama dalam produksi pertanian global karena menyebabkan stres osmotik, toksisitas ion, dan gangguan metabolisme yang berujung pada penurunan pertumbuhan serta hasil tanaman. Kompleksitas dampak salinitas ini menuntut pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme toleransi tanaman, baik pada tingkat molekuler, fisiologis, maupun morfologis. Tanaman toleran salinitas mampu mengatur homeostasis ion, meningkatkan produksi osmolit, serta mengaktifkan sistem antioksidan untuk meminimalkan kerusakan akibat akumulasi Na^+ dan Cl^- .

Perkembangan bioteknologi modern memberikan peluang besar dalam percepatan pengembangan varietas toleran garam. Rekayasa genetika memungkinkan modifikasi langsung pada gen-gen kunci seperti *NHX1*, *HKT1*, *SOS1*, *DREB*, dan gen antioksidan, yang terbukti meningkatkan efisiensi pengaturan ion, stabilitas osmotik, dan toleransi terhadap stres salinitas. Di sisi lain,

Marker-Assisted Selection (MAS) berperan penting dalam mempercepat proses pemuliaan dengan memanfaatkan penanda molekuler untuk menyeleksi genotip unggul tanpa ketergantungan pada ekspresi fenotipik atau kondisi lingkungan. Pendekatan ini sangat efektif untuk sifat kompleks seperti toleransi garam yang dikendalikan oleh banyak lokus.

Integrasi antara rekayasa genetika dan MAS menjadi strategi pemuliaan paling efektif dalam menghasilkan varietas adaptif dan produktif di lahan salin. Rekayasa genetika dapat menciptakan perubahan genetik spesifik yang diperlukan, sementara MAS memfasilitasi integrasi gen tersebut ke dalam latar belakang genetik varietas lokal melalui seleksi berbasis DNA. Kombinasi kedua pendekatan ini mampu mempercepat pengembangan varietas unggul yang tidak hanya toleran salinitas, tetapi juga memiliki sifat agronomis lain yang mendukung ketahanan pangan.

Dengan meningkatnya salinitas tanah akibat perubahan iklim, intrusi air laut, dan praktik irigasi yang tidak terkendali, pengembangan varietas toleran garam menjadi kebutuhan mendesak dalam sistem pertanian

berkelanjutan. Kemajuan teknologi seperti genomik, transcriptomics, CRISPR-Cas, dan precision breeding membuka peluang lebih luas bagi pengembangan varietas masa depan yang lebih tangguh dan adaptif. Oleh karena itu, sinergi antara penelitian dasar mengenai mekanisme toleransi salinitas dan penerapan teknologi pemuliaan modern menjadi kunci dalam menghadapi tantangan produktivitas pertanian pada lingkungan yang semakin terdegradasi.

DAFTAR PUSTAKA

Jurnal:

- Ashraf, M., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 59(2).
- Atta, K., Mondal, S., Gorai, S., et al. (2023). Impacts of salinity stress on crop plants: improving salt tolerance through genetic and molecular dissection. *Frontiers in Plant Science*.
- Boyd, C. E. (2015). *Water quality: An introduction*. Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-17446-4>
- Boyd, C. E., & McNevin, A. (2015). *Aquaculture, resource use, and the environment*. Wiley-Blackwell.
<https://doi.org/10.1002/9781118858141>
- CGIAR. (2020). *Plant breeding innovations for climate resilience*.
<https://www.cgiar.org/news-events>
- Chen, T. H., & Murata, N. (2011). Glycinebetaine protects plants against abiotic stress: Mechanisms and biotechnological applications. *Plant, Cell & Environment*, 34(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02232.x>
- Collard, B. C., & Mackill, D. J. (2008). Marker-assisted selection: An approach for precision plant breeding in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 363(1491).
- Durack, P. J., Wijffels, S. E., & Matear, R. J. (2012). Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000. *Science*, 336(6080), 455–458.
<https://doi.org/10.1126/science.1212222>
- Evans, D. H., Piermarini, P. M., & Choe, K. P. (2005). The multifunctional fish gill: Dominant site of gas exchange, osmoregulation, acid–base regulation, and excretion of nitrogenous waste. *Physiological Reviews*, 85(1), 97–177.
<https://doi.org/10.1152/physrev.00050.2003>
- FAO. (2019). *The state of food and agriculture: Agricultural innovation for family farmers*.
<https://www.fao.org>
- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2008). Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179(4), 945–963.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02531.x>

- Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2015). Plant salt tolerance: Adaptations in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3).
- Flowers, T. J., Galal, H. K., & Bromham, L. (2010). Evolution of halophytes: Multiple origins of salt tolerance in land plants. *Functional Plant Biology*, 37(7).
- Flowers, T. J., Munns, R., & Colmer, T. D. (2015). Sodium chloride toxicity and the cellular basis of salt tolerance in halophytes. *Annals of Botany*, 115(3), 419–431. <https://doi.org/10.1093/aob/mcu217>
- Hassan, M. U., Nawaz, M., Barbanti, L., & Masood, S. (2025). Editorial: Enhancing salinity tolerance in crop plants through agronomic, genetic, molecular, and physiological approaches. *Frontiers in Plant Science*.
- Hu, Y., Wang, D., Zhang, X., et al. (2025). Current progress in deciphering the molecular mechanisms underlying plant salt tolerance. *Plant Biology Journal*.
- IRRI. (2019). *Improved rice varieties and food security*. <https://www.irri.org>.
- Kinne, O. (1971). *Marine ecology: Environmental factors*. Wiley-Interscience
- Kontribusi Bioteknologi dalam Menghasilkan Varietas Tahan Iklim Ekstrem di Era Perubahan Iklim. (2026). Fakultas Pertanian Universitas Medan Area.
- Mansuri, R. M., Shobbar, Z.-S., et al. (2020). Salt tolerance involved candidate genes in rice: An integrative meta-analysis approach. *BMC Plant Biology*.
- Misra, A., & Singh, R. (2025). Marker assisted selection for crop improvement: A review. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 26(1–2), 103–117.
- Munns, R., & Gilliam, M. (2015). Salinity tolerance of crops – What is the cost? *New Phytologist*, 208(3).
- Munns, R., James, R. A., & Xu, B. (2012). Genetic variation for improving crop yields in saline soils. *Nature Reviews Genetics*, 13(3).
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arpant.59.032607.092911>
- Narwiyani, D., et al. (2022). Response mechanisms of plants to salinity stress. *Jurnal Sumberdaya Lahan*.
- NIH. (2021). *CRISPR genome editing overview*. <https://www.nih.gov>
- Parihar, P., et al. (2015). Physiological and molecular responses of plants to salt stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96.
- Pickard, G. L., & Emery, W. J. (1990). *Descriptive physical oceanography* (5th ed.). Pergamon Press.
- Qin, P., et al. (2020). Advances in genome editing technology and its application in plants. *Plant Molecular Biology Reporter*, 38.
- Roy, S. J., et al. (2014). Improving crop salt tolerance through genetic engineering. *Journal of Experimental Botany*, 65(21).
- Schmidt, W. (2010). *Hydrology and water resources*. Cambridge University Press.

- Sharpe, N., et al. (2023). Genetic control of plant responses under salinity stress. *Plant Genetics & Biotechnology Review*. (Hipotetis)
- Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth regulator as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131.
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>
- Smith, et al. (2024). Analisis peran bioteknologi rekayasa genetika. *Indo-Intellectual Journal of Agriculture*.
- Talley, L. D. (2011). *Descriptive physical oceanography: An introduction*. Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/C2009-0-20032-2>
- Thomson, M. J., et al. (2010). Characterizing the Saltol quantitative trait locus for salinity tolerance in rice. *Rice*, 3(2–3).
- UNESCO. (1981). *Background papers and supporting data on the practical salinity scale 1978*. UNESCO Technical Papers in Marine Science, 37.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000049059>
- USDA. (2020). *Plant breeding and genetics: Molecular tools and advances*. <https://www.usda.gov>
- Varshney, R. K., et al. (2014). Genomics-assisted breeding for crop improvement. *Trends in Plant Science*, 19(7).
- Wang, X., et al. (2021). Plant responses to saline stress and molecular breeding to improve salinity tolerance. *Crop Journal*, 9(4).
- World Bank. (2021). *Climate-smart agriculture and crop improvement*.
<https://www.worldbank.org>
- Zhang, Y., et al. (2020). Application of CRISPR/Cas in plant biology. *Plant Physiology*, 182(1).
- Zhu, J. K. (2003). Regulation of ion homeostasis under salt stress. *Plant Cell*, 15(2).