

**RICE BREEDING FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE: A SYSTEMATIC
LITERATURE REVIEW ON FOOD SECURITY AND FARMER WELL-BEING
(RICE BREEDING FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE: A SYSTEMATIC
LITERATURE REVIEW ON)**

**Mochammad Hatta Setianto¹, Siti Fitriah², Eka Rizqi Amelia³, Nio Julung Sadewa⁴,
Moh. Yoga Khoirul Izzam⁵, Iqbal Sabili⁶, Harwanto⁷**
^{1,2,3,4,5,6,7} Politeknik pembangunan Pertanian malang

Email : slmdkmd1319@gmail.com, stfitriah26@gmail.com, ekarizqiamelia26@gmail.com,
niosadewa892004@gmail.com, yogakhoirulizzam@gmail.com, iqbalsabili04@gmail.com

Abstrak

Perubahan iklim menjadi ancaman serius bagi sistem pangan global, terutama produksi padi sebagai sumber pangan utama bagi lebih dari tiga miliar penduduk dunia. Banjir, kekeringan, dan suhu ekstrem menyebabkan penurunan produktivitas serta meningkatkan kerentanan petani kecil. Meskipun berbagai inovasi pemuliaan padi telah dikembangkan, kajian sebelumnya masih bersifat lokal dan fragmentaris sehingga belum memberikan gambaran menyeluruh mengenai kontribusinya terhadap produktivitas, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani. Penelitian ini bertujuan menelaah secara sistematis bukti empiris mengenai peran pemuliaan padi serta mengidentifikasi faktor-faktor yang menentukan keberhasilan adopsi varietas unggul dalam menghadapi perubahan iklim. Penelitian menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) berdasarkan protokol PRISMA 2020. Pencarian literatur dilakukan pada basis data Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar untuk periode 2015–2025. Artikel yang memenuhi kriteria inklusi dievaluasi menggunakan MMAT 2018 dan dianalisis melalui thematic analysis berbantuan NVivo 14. Hasil sintesis menunjukkan bahwa pemuliaan padi mampu meningkatkan produktivitas melalui hibridisasi, marker-assisted breeding, dan gene pyramiding, serta memperkuat ketahanan pangan melalui pengembangan varietas toleran cekaman abiotik dan biofortifikasi gizi. Selain itu, pemuliaan partisipatif terbukti mempercepat adopsi varietas dan meningkatkan kesejahteraan rumah tangga petani. Literatur juga menunjukkan pergeseran paradigma menuju resilience breeding yang mengintegrasikan aspek agronomis, molekuler, sosial, dan ekonomi.

Kata Kunci : Pemuliaan padi, Ketahanan pangan, Perubahan iklim, Kesejahteraan petani, Systematic Literature Review

Abstrack

Climate change poses a significant threat to global food systems, particularly rice production, which serves as the primary staple food for more than three billion people worldwide. Floods, droughts, and extreme temperatures have reduced agricultural productivity and increased the vulnerability of smallholder farmers. Although various rice breeding innovations have been developed, previous studies remain largely localized and fragmented, providing limited understanding of their comprehensive contributions to productivity, food security, and farmer well-being. This study aims to systematically review empirical evidence on the role of rice breeding and to identify key factors influencing the successful adoption of improved rice

varieties under changing climatic conditions. A Systematic Literature Review (SLR) approach was employed following the PRISMA 2020 guidelines. Literature searches were conducted across Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, and Google Scholar for publications from 2015 to 2025. Eligible studies were assessed using the Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) 2018 and analyzed through thematic analysis supported by NVivo 14. The synthesis revealed that rice breeding enhances productivity through hybridization, marker-assisted breeding, and gene pyramiding, while strengthening food security through the development of abiotic stress-tolerant and biofortified varieties. Furthermore, participatory breeding was found to accelerate varietal adoption and improve household welfare among farmers. The literature also highlights a paradigm shift toward resilience breeding, integrating agronomic, molecular, social, and economic dimensions to address climate-related challenges.

Keywords : Rice Breeding, Food Security, Climate Change, Farmer Welfare, Systematic Literature Review.

PENDAHULUAN

Perubahan iklim menjadi salah satu tantangan terbesar bagi sistem pangan global di abad ke-21. Laporan FAO (2024) memperkirakan 728 hingga 783 juta orang mengalami kelaparan pada tahun 2023, sementara 2,4 miliar orang hidup dalam kondisi kerawanan pangan sedang hingga parah. Tekanan ini diperparah oleh intensitas dan frekuensi kejadian iklim ekstrem seperti banjir, kekeringan, serta gelombang panas yang mengancam produktivitas tanaman pokok, terutama padi, yang menjadi makanan pokok bagi lebih dari tiga miliar orang (FAO, 2024; IPCC, 2022). Perubahan iklim memengaruhi ketersediaan air, meningkatkan risiko serangan hama, dan menurunkan hasil panen di berbagai negara, sehingga mengancam stabilitas ketahanan pangan global (IPCC, 2022).

Urgensi penelitian dalam bidang pemuliaan tanaman, khususnya padi, semakin jelas ketika pertanian global dihadapkan pada keterbatasan sumber daya alam dan meningkatnya populasi. Studi empiris menunjukkan bahwa pemuliaan tanaman berperan penting dalam menciptakan varietas padi toleran kekeringan, salinitas, dan suhu tinggi, serta varietas dengan efisiensi penggunaan input yang lebih baik (Singh et al., 2020). Namun, distribusi dan akses terhadap varietas unggul ini masih belum merata, terutama di kalangan petani kecil, yang menghadapi risiko paling besar terhadap variabilitas iklim. Peningkatan produktivitas melalui pemuliaan yang adaptif berpotensi mengurangi kebutuhan input seperti pupuk dan pestisida, sekaligus meminimalkan dampak lingkungan dari praktik pertanian intensif (Meher et al., 2019).

Sejumlah penelitian empiris dekade terakhir mendokumentasikan dampak positif pemuliaan padi terhadap hasil dan kesejahteraan petani. Contohnya, Meher et al. (2019) menemukan bahwa adopsi varietas padi toleran stres di Bangladesh dan India meningkatkan

produktivitas dan pendapatan petani kecil. Studi Adepoju et al. (2020) di Nigeria menunjukkan bahwa penggunaan varietas padi unggul meningkatkan ketahanan ekonomi rumah tangga petani, sementara Wang et al. (2023) mencatat bahwa kombinasi varietas unggul dan praktik manajemen modern dapat menghasilkan peningkatan signifikan pada hasil dan pendapatan. Namun, sebagian besar penelitian ini masih bersifat lokal dan berfokus pada satu atau dua dimensi, seperti produktivitas atau kesejahteraan, sehingga kurang memberikan gambaran menyeluruh mengenai dampak pemuliaan padi dalam konteks perubahan iklim yang lebih luas. Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian berupa kurangnya sintesis sistematis yang mengintegrasikan bukti empiris dari berbagai wilayah dan indikator.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan sistematis atas bukti empiris (2015–2025) yang mengevaluasi dampak pemuliaan padi terhadap produktivitas, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani di tengah tantangan perubahan iklim. Dengan metode *Systematic Literature Review* (SLR), penelitian ini akan memetakan kontribusi inovasi pemuliaan tanaman terhadap ketahanan pangan global dan kesejahteraan petani, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan adopsi varietas unggul. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar bagi pembuat kebijakan, peneliti, dan sektor swasta untuk mengembangkan strategi penyediaan benih, program penyuluhan, dan investasi penelitian yang lebih tepat sasaran. Secara praktis, temuan dari SLR ini diharapkan mampu mempercepat transformasi sistem pangan menuju model pertanian berkelanjutan yang tangguh terhadap perubahan iklim.

Penelitian ini merumuskan masalah terkait kontribusi pemuliaan padi terhadap peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan di tengah perubahan iklim, pengaruhnya terhadap kesejahteraan petani termasuk pendapatan dan ketahanan ekonomi rumah tangga, serta faktor-faktor yang menentukan keberhasilan pemuliaan padi dalam mendukung ketahanan pangan dan kesejahteraan petani. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengkaji peran pemuliaan padi dalam meningkatkan produktivitas, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani serta mengidentifikasi faktor penentu keberhasilannya dalam menghadapi perubahan iklim. Adapun implikasi penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan strategi pemuliaan padi yang efektif guna memperkuat ketahanan pangan, meningkatkan kesejahteraan petani, dan mendukung adaptasi sektor pertanian terhadap perubahan iklim.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti empiris terkait kontribusi pemuliaan padi terhadap ketahanan pangan dan kesejahteraan petani dalam konteks perubahan iklim. Pendekatan ini mengikuti prinsip transparansi, replikabilitas, dan keterlacakan proses pencarian serta seleksi literatur (Snyder, 2019). SLR dipilih karena dapat memberikan pemahaman komprehensif terhadap bukti lintas negara, teknologi, dan konteks sosial-ekonomi yang terpublikasi selama sepuluh tahun terakhir.

Penyusunan pertanyaan penelitian menggunakan kerangka PICO (*Population, Intervention, Comparison, Outcome*) untuk memperjelas fokus kajian. Populasi mencakup petani padi skala kecil di negara berkembang maupun maju; intervensi berupa penerapan varietas padi hasil pemuliaan; pembanding adalah sistem atau varietas tradisional; dan luaran mencakup indikator produktivitas, efisiensi sumber daya, ketahanan pangan, dan kesejahteraan rumah tangga petani.

Tabel 1. Kerangka PICO

Komponen	Deskripsi
P (Population)	Petani padi dan rumah tangga petani di berbagai konteks agroekologi
I (Intervention)	Adopsi varietas padi hasil pemuliaan, termasuk varietas toleran stres iklim
C (Comparison)	Varietas tradisional atau praktik budidaya konvensional
O (Outcome)	Produktivitas, ketahanan pangan rumah tangga, pendapatan petani, efisiensi sumber daya

Strategi pencarian literatur dilakukan secara sistematis melalui beberapa basis data akademik, termasuk Web of Science, Scopus, PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar. Pencarian menggunakan kombinasi kata kunci dengan Boolean operators, misalnya: ("rice breeding" OR "improved rice varieties") AND ("food security" OR "farmer livelihoods") AND ("climate change") AND (impact OR adoption). Penelusuran difokuskan pada artikel berbahasa Inggris, publikasi tahun 2015 hingga 2025, dan hanya mencakup penelitian empiris. Seleksi artikel dilakukan menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi yang terdefinisi jelas untuk menjaga kualitas sintesis.

Tabel 2. Data Seleksi Artikel

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Tahun publikasi	2015–2025	<2015
Bahasa	Inggris	Bahasa selain Inggris
Jenis studi	Penelitian empiris (kuantitatif/kualitatif/mixed-method)	Review artikel, editorial, komentar
Topik	Dampak pemuliaan padi terhadap ketahanan pangan, kesejahteraan petani, atau adaptasi iklim	Studi tanaman selain padi, tanpa analisis dampak sosial-ekonomi

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Akses	Tersedia teks lengkap	Hanya abstrak

Proses seleksi mengikuti pedoman PRISMA 2020 untuk memastikan transparansi pelaporan tahapan pencarian, penyaringan, dan pemilihan studi (Page et al., 2021). Diagram PRISMA akan menggambarkan jumlah artikel pada setiap tahap, mulai dari identifikasi awal hingga pemilihan akhir untuk analisis. Penilaian kualitas artikel dilakukan menggunakan Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) versi 2018 (Hong et al., 2018), yang memungkinkan evaluasi metodologis lintas desain studi kuantitatif, kualitatif, dan mixed-method secara konsisten. Penilaian ini akan memastikan bahwa hanya studi dengan kualitas metodologi memadai yang disertakan dalam sintesis.

Proses ekstraksi data dilakukan dengan formulir standar yang mencatat informasi inti seperti negara studi, desain penelitian, ukuran sampel, karakteristik intervensi, indikator hasil, metode analisis, dan temuan utama. Seluruh data dianalisis menggunakan NVivo 14, dengan pendekatan analisis tematik untuk mengidentifikasi pola, tema utama, serta hubungan antarvariabel. Analisis tematik dipilih karena kemampuannya merangkum bukti empiris secara sistematis dan menyajikan pemahaman mendalam tentang mekanisme dampak pemuliaan padi terhadap ketahanan pangan dan kesejahteraan petani.

Pelaksanaan penelitian ini dibagi menjadi tiga peneliti untuk efisiensi dan keakuratan proses. Peneliti pertama (P1) bertanggung jawab atas pengembangan protokol pencarian, eksekusi pencarian literatur, dan manajemen basis data referensi. Peneliti kedua (P2) memimpin proses skrining artikel, penilaian kualitas menggunakan MMAT, serta validasi hasil penilaian antarpenilai. Peneliti ketiga (P3) fokus pada ekstraksi data, pengkodean dalam NVivo 14, dan penyusunan sintesis hasil tematik. Setiap tahapan melibatkan diskusi kolektif untuk memastikan konsensus, validitas, dan reproduisibilitas temuan.

Dengan pendekatan metodologis yang terstruktur, penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan tinjauan sistematis yang kredibel dan dapat diandalkan. Integrasi pedoman PRISMA dan MMAT memberikan kerangka kerja yang kokoh untuk menjaga kualitas dan transparansi penelitian. Selain itu, penggunaan perangkat lunak analisis kualitatif seperti NVivo 14 memungkinkan eksplorasi mendalam terhadap data dan pengembangan narasi tematik yang kuat. Pendekatan kolaboratif antara tiga peneliti memperkuat integritas metodologi sekaligus meningkatkan akurasi sintesis literatur, sehingga hasilnya dapat menjadi rujukan ilmiah yang signifikan bagi pembuat

HASIL DAN PEMBAHASAN

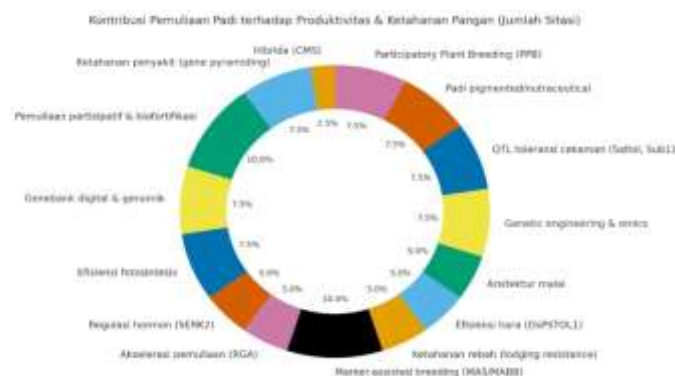
Pemuliaan padi berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan di tengah perubahan iklim

Pemuliaan padi memainkan peran strategis dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dengan meningkatkan produktivitas sekaligus memperkuat ketahanan pangan. Melalui pendekatan modern seperti pemuliaan partisipatif, biofortifikasi, pemanfaatan marker-assisted breeding (MAS/MABB), pemanfaatan keragaman genetik, serta integrasi teknologi genomik dan transgenik, berbagai varietas padi baru berhasil dikembangkan untuk lebih adaptif terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Upaya ini tidak hanya menjaga stabilitas hasil panen, tetapi juga meningkatkan nilai gizi dan daya saing ekonomi petani. Secara ringkas, kontribusi pemuliaan padi terhadap produktivitas dan ketahanan pangan di tengah perubahan iklim dijelaskan dalam Tabel 3 dan divisualisasikan dalam Gambar 1.

Tabel 3. Kontribusi Pemuliaan Padi Terhadap Produktivitas dan Ketahanan Pangan di Tengah Perubahan Iklim

No	Deskripsi Kontribusi	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
1	Peningkatan hasil melalui hibrida: Sistem CMS (Cytoplasmic Male Sterility) pada padi hibrida mampu meningkatkan hasil 15–20% dibanding varietas inbrida.	1	Virmani (1996 dalam Dash et al., 2016)
2	Ketahanan penyakit biotik: Pyramiding beberapa gen ketahanan (misalnya Xa4, xa5, xa13, Xa21) menghasilkan varietas dengan ketahanan luas terhadap penyakit hawar daun bakteri (BB), sehingga menjaga hasil dan menekan kehilangan produksi.	3	Khush et al. (1989 dalam Dash et al., 2016); Dash et al. (2016); Singh et al. (2023)
3	Pemuliaan partisipatif & biofortifikasi: Pemuliaan berbasis petani meningkatkan adopsi varietas adaptif, sekaligus biofortifikasi (misalnya peningkatan Zn hingga 28 ppm) mampu memenuhi hingga 80% kebutuhan gizi anak.	4	Bänziger & Cooper (2001); Ceccarelli & Grando (2007); Bouis & Saltzman (2017); Castro-Pacheco et al. (2024)
4	Pemanfaatan keragaman genetik & digital genebank: Sekuensing genom padi (3K Rice Genome Project) mempercepat penemuan gen/allele adaptif untuk varietas tahan iklim ekstrem.	3	McNally et al. (2020)
5	Peningkatan efisiensi fotosintesis: Varietas lokal (landraces) dengan laju fotosintesis tinggi digunakan sebagai donor gen untuk meningkatkan produktivitas di bawah iklim berubah.	3	Sheehy et al. (2007); Panda et al. (2018); Vikram et al. (2016)
6	Regulasi hormon & stres abiotik: Manipulasi gen SERK2 meningkatkan ukuran gabah sekaligus ketahanan salinitas tanpa mengorbankan arsitektur tanaman.	2	Dong et al. (2020); Tong & Chu (2018)

No	Deskripsi Kontribusi	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
7	Akselerasi pemuliaan (Rapid Generation Advance): Mempercepat siklus pemuliaan menghasilkan pelepasan varietas lebih cepat → manfaat ekonomi & ketahanan pangan.	2	Lenaerts et al. (2018); Fan et al. (2005)
8	Penggunaan marker-assisted breeding (MAS/MABB): Memungkinkan introgression gen-gen ketahanan (blast, BB, hama) dengan presisi tinggi, hemat waktu dan biaya.	4	Raina et al. (2019); Singh et al. (2023); Chithrameenal et al. (2018); Subburaj et al. (2024)
9	Ketahanan terhadap rebah (lodging resistance): Peningkatan kandungan lignin pada batang melalui overekspresi gen (PAL, CAD, CCR20) meningkatkan kekuatan batang, mengurangi kerugian panen.	2	Liu et al. (2018)
10	Pemuliaan untuk efisiensi hara: Gen OsPSTOL1 meningkatkan serapan fosfor → hasil lebih stabil di tanah marginal.	2	Chithrameenal et al. (2018)
11	Panicle architecture improvement: QTL pengendali panjang & berat malai meningkatkan jumlah gabah → peningkatan hasil.	2	Panda et al. (2020)
12	Genetic engineering (GE) & -omics: Padi transgenik Bt tahan hama mengurangi penggunaan insektisida, aman bagi lingkungan & meningkatkan pendapatan petani.	3	Liu et al. (2020); Klümper & Qaim (2014); NASEM (2016)
13	Identifikasi gen toleran cekaman abiotik (Saltol, Sub1, dsb.): QTL toleransi kekeringan & salinitas memperkuat ketahanan varietas terhadap perubahan iklim.	3	Sandhu et al. (2017); Subburaj et al. (2024)
14	Pengembangan varietas pigmented & nutraceutical rice: Varietas kaya flavonoid, antosianin, polifenol → meningkatkan nilai tambah ekonomi & ketahanan pangan fungsional.	3	Vaishnavi et al. (2024)
15	Participatory Plant Breeding (PPB): Melibatkan petani sejak awal mempercepat adopsi varietas adaptif, meningkatkan hasil & kesejahteraan.	3	Atlin & Witcombe (2002); Witcombe et al. (2002); Dogbe et al. (2002)



Gambar 1. Kontribusi Pemuliaan Padi Terhadap Produktivitas dan Ketahanan Pangan di Tengah Perubahan Iklim

Berdasarkan hasil pemetaan kontribusi pemuliaan padi dari berbagai literatur, terlihat bahwa strategi yang digunakan dalam peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan di tengah perubahan iklim sangat beragam dan saling melengkapi. Terdapat 15 kategori utama yang mencakup pendekatan konvensional hingga bioteknologi modern, seperti hibridisasi, marker-assisted breeding (MAS/MABB), gene editing, dan pendekatan multi-omics. Distribusi sitasi menunjukkan bahwa perhatian ilmiah cukup tinggi terhadap isu-isu yang berkaitan dengan ketahanan pangan, adaptasi iklim, dan peningkatan kualitas hasil padi.

Kategori yang paling dominan adalah pemuliaan partisipatif-biofortifikasi dan MAS/MABB, yang menunjukkan bahwa pendekatan yang menggabungkan keterlibatan petani serta teknik molekuler presisi menjadi strategi utama. Pemuliaan partisipatif meningkatkan tingkat adopsi varietas karena melibatkan petani secara langsung, sedangkan MAS/MABB efektif dalam menghasilkan varietas tahan penyakit dan lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan. Kedua pendekatan ini dianggap paling relevan dalam menjawab tantangan ketahanan pangan modern.

Selain itu, berbagai strategi lain seperti gene pyramiding, pemanfaatan genomik, peningkatan efisiensi fotosintesis, QTL toleransi cekaman, dan biofortifikasi juga banyak dikaji, menunjukkan fokus pada penguatan ketahanan terhadap stres biotik dan abiotik sekaligus peningkatan nilai gizi. Sementara itu, pendekatan seperti regulasi hormon, Rapid Generation Advance (RGA), dan perbaikan arsitektur tanaman berperan dalam meningkatkan efisiensi produksi dan mempercepat pengembangan varietas unggul. Di sisi lain, metode CMS pada hibrida yang dulu populer kini relatif lebih sedikit dibahas dalam literatur terbaru.

Hasil analisis menunjukkan bahwa pemuliaan padi bersifat multidimensional, tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil produksi, tetapi juga mencakup aspek ketahanan iklim, kualitas gizi, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan petani. Integrasi antara pendekatan tradisional, partisipatif, dan molekuler menjadi kunci utama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan menjaga ketahanan pangan global secara berkelanjutan.

Pemuliaan padi memengaruhi kesejahteraan petani, termasuk pendapatan dan ketahanan ekonomi rumah tangga

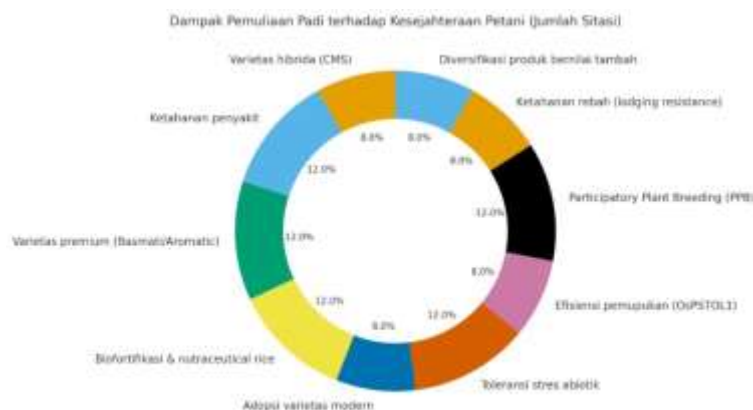
Pemuliaan padi terbukti memberikan dampak nyata terhadap kesejahteraan petani melalui berbagai mekanisme, mulai dari peningkatan produktivitas varietas hibrida, pengurangan biaya produksi lewat ketahanan penyakit, penciptaan nilai tambah melalui varietas premium dan biofortifikasi, hingga peningkatan stabilitas hasil melalui toleransi stres abiotik dan partisipasi petani dalam proses pemuliaan. Dampak tersebut tidak hanya menjaga

hasil panen, tetapi juga memperkuat pendapatan serta ketahanan ekonomi rumah tangga petani di tengah tantangan perubahan iklim. Secara ringkas, kontribusi pemuliaan padi terhadap kesejahteraan petani dijelaskan dalam Tabel 4 dan divisualisasikan dalam Gambar 2.

Tabel 4. Kontribusi Pemuliaan Padi Terhadap Kesejahteraan Petani

No	Deskripsi Dampak	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
1	Varietas hibrida baru meningkatkan keberlanjutan produksi: CMS dan maintainer lines dapat digunakan langsung untuk menghasilkan varietas hibrida baru, yang membantu stabilitas hasil dan pendapatan petani.	2	Dash et al. (2016)
2	Ketahanan biotik mengurangi biaya produksi: Pyramiding beberapa gen ketahanan (xa13, Xa21, Xa38, Pi9, Pib, Pita) menghasilkan varietas tahan penyakit utama (BB, blast), sehingga mengurangi penggunaan pestisida dan biaya input.	3	Singh et al. (2023)
3	Nilai tambah varietas premium (Basmati, Aromatic Rice): Varietas beraroma memiliki harga lebih tinggi di pasar global, mendukung ekspor bernilai miliaran dolar dan meningkatkan pendapatan petani.	3	Prasad et al. (2020)
4	Biofortifikasi & nutraceutical rice: Varietas biofortifikasi (misalnya Zn $\geq$ 28 ppm) serta padi pigmented (antioxidant-rich) memberi peluang pasar niche dengan harga premium, memperkuat ketahanan ekonomi rumah tangga.	3	Bouis & Saltzman (2017); Castro-Pacheco et al. (2024); Vaishnavi et al. (2024)
5	Adopsi varietas modern secara masif: Di Bangladesh, India, dan Vietnam, lebih dari 80–90% lahan ditanami varietas modern, mencerminkan peningkatan hasil yang signifikan dan peningkatan pendapatan petani.	2	Lenaerts et al. (2018); Alpuerto et al. (2009)
6	Stabilitas pendapatan melalui toleransi stres abiotik: Varietas dengan toleransi terhadap salinitas, submergence, dan kekeringan memberikan hasil lebih stabil di lingkungan marginal, melindungi ekonomi petani kecil.	3	Dong et al. (2020); Subburaj et al. (2024); Sandhu et al. (2017)
7	Efisiensi pemupukan & penggunaan lahan marginal: Gen OsPSTOL1 meningkatkan efisiensi serapan fosfor, memungkinkan petani mengurangi biaya pupuk serta tetap produktif di tanah miskin hara.	2	Chithrameenal et al. (2018)
8	Participatory Plant Breeding (PPB): Melibatkan petani dalam pemilihan varietas memberi hasil sesuai preferensi lokal (kualitas beras, ketahanan, earliness), sehingga meningkatkan penerimaan varietas dan pendapatan pasar lokal.	3	Atlin & Witcombe (2002); Witcombe et al. (2002); Dogbe et al. (2002)
9	Pengurangan risiko gagal panen: Varietas tahan rebah (lodging resistance) menjaga kualitas gabah, mengurangi kerugian hasil, serta meningkatkan efisiensi panen.	2	Liu et al. (2018)
10	Diversifikasi produk bernilai tambah: Produk olahan dari padi pigmented (beras merah, hitam, atau kaya senyawa bioaktif) menciptakan pasar baru, meningkatkan ketahanan ekonomi petani melalui	2	Vaishnavi et al. (2024)

No	Deskripsi Dampak	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
	diversifikasi usaha tani.		



Gambar 2. Kontribusi Pemuliaan Padi Terhadap Kesejahteraan Petani

Berdasarkan pemetaan literatur, penelitian pemuliaan padi dalam meningkatkan produktivitas dan ketahanan pangan di tengah perubahan iklim menunjukkan adanya 15 kategori strategi yang saling melengkapi, mulai dari pendekatan konvensional seperti hibridisasi hingga teknologi modern seperti genome editing dan multi-omics. Distribusi sitasi menunjukkan tingginya perhatian ilmiah terhadap isu ketahanan pangan, adaptasi iklim, dan peningkatan kualitas hasil padi, sehingga pemuliaan padi berkembang menjadi bidang yang semakin kompleks dan multidisipliner.

Kategori yang paling dominan adalah pemuliaan partisipatif-biofortifikasi dan marker-assisted breeding (MAS/MABB). Pemuliaan partisipatif meningkatkan peluang adopsi varietas karena melibatkan petani sejak awal proses, sedangkan MAS/MABB memberikan presisi tinggi dalam memasukkan gen ketahanan terhadap penyakit dan cekaman lingkungan. Kedua pendekatan ini menjadi fondasi utama dalam menjawab tantangan produktivitas dan ketahanan pangan global secara bersamaan.

Kategori lain seperti gene pyramiding, genomik, QTL toleransi cekaman, efisiensi fotosintesis, dan biofortifikasi juga banyak dikaji, menunjukkan fokus pada penguatan ketahanan biotik-abiotik sekaligus peningkatan nilai gizi. Sementara itu, pendekatan seperti regulasi hormon, Rapid Generation Advance (RGA), dan perbaikan arsitektur tanaman berperan dalam meningkatkan efisiensi produksi dan mempercepat pengembangan varietas unggul. Adapun CMS pada hibrida kini relatif menurun perhatiannya dibanding pendekatan molekuler dan partisipatif.

Secara keseluruhan, pemuliaan padi terbukti bersifat multidimensional dengan fokus tidak hanya pada peningkatan hasil, tetapi juga ketahanan iklim, kualitas gizi, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan petani. Integrasi pendekatan tradisional, partisipatif, dan molekuler menjadi kunci utama dalam membangun sistem pangan yang lebih tangguh di era perubahan iklim, sekaligus memperkuat konsep ketahanan pangan yang berkelanjutan.

Faktor-faktor yang menentukan keberhasilan pemuliaan padi dalam mendukung ketahanan pangan dan kesejahteraan petani di era perubahan iklim

Keberhasilan pemuliaan padi dalam mendukung ketahanan pangan dan kesejahteraan petani di era perubahan iklim sangat ditentukan oleh kombinasi faktor teknis dan sosial. Pendekatan molekuler seperti pyramiding multi-gen serta marker-assisted breeding terbukti memperkuat ketahanan terhadap penyakit, sementara pemanfaatan keragaman genetik, screening lintas lingkungan, dan integrasi genomik mempercepat penemuan varietas adaptif. Di sisi lain, faktor morfo-fisiologis, efisiensi sumber daya, serta partisipasi petani dalam pemuliaan memastikan varietas yang dihasilkan sesuai dengan kondisi agroekologi dan kebutuhan pengguna. Secara ringkas, faktor-faktor keberhasilan tersebut disajikan dalam Tabel 5 dan divisualisasikan dalam Gambar 3.

Tabel 5. Faktor-faktor Keberhasilan Pemuliaan Padi

No	Faktor Penentu	Deskripsi	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
1	Pyramiding multi-gen	Menggabungkan beberapa gen ketahanan (BB, blast, hama) lebih efektif dibanding satu gen karena memperlambat evolusi patogen dan meningkatkan ketahanan luas.	4	Dash et al. (2016); Raina et al. (2019); Singh et al. (2023); Subburaj et al. (2024)
2	Marker-assisted breeding (MAS/MABB)	Foreground dan background selection dengan marker molekuler meningkatkan presisi, mempercepat program, dan menjaga sifat unggul induk.	4	Hospital (2005 dalam Dash et al., 2016); Chithrameenal et al. (2018); Singh et al. (2023); Raina et al. (2019)
3	Pemanfaatan keragaman genetik	Plasma nutfah, landraces, dan wild relatives menyediakan sumber gen baru untuk fotosintesis, toleransi stres, dan kualitas hasil.	3	McNally et al. (2020); Prasad et al. (2020); Panda et al. (2018)
4	Screening fenotipe lintas lingkungan	Evaluasi multi-lokasi dan lintas musim mengidentifikasi genotipe stabil & adaptif, penting di tengah variabilitas iklim.	3	McNally et al. (2020); Singh et al. (2023); Castro-Pacheco et al. (2024)
5	Integrasi genomik & bioinformatika	Sekuensing generasi baru, analisis komputasi, & pemodelan genotipe-fenotipe mempercepat	3	McNally et al. (2020); Sandhu et al. (2017); Vaishnavi et al. (2024)

No	Faktor Penentu	Deskripsi	Jumlah Sitasi Relevan	Daftar Sitasi
		penemuan gen adaptif.		
6	Arsitektur tanaman & sifat morfo-fisiologis	Panicle architecture, stomatal traits, dan lignin batang menjadi kunci peningkatan hasil & ketahanan rebah.	3	Panda et al. (2020); Panda et al. (2018); Liu et al. (2018)
7	Efisiensi penggunaan sumber daya	Gen OsPSTOL1 meningkatkan serapan P, varietas efisien hara cocok untuk lahan marginal → lebih berkelanjutan.	2	Chithrameenal et al. (2018); Subburaj et al. (2024)
8	Partisipasi petani dalam pemuliaan (PPB)	Integrasi preferensi petani (earliness, kualitas beras, adaptasi lokal) memastikan adopsi lebih cepat & sesuai kebutuhan.	3	Atlin & Witcombe (2002); Castro-Pacheco et al. (2024); Dogbe et al. (2002)
9	Integrasi teknologi bioteknologi & genome editing	Penggunaan CRISPR/Cas9, transgenik, dan multi-omics untuk mempercepat pengembangan varietas adaptif dan nutraceutical.	2	Liu et al. (2020); Vaishnavi et al. (2024)
10	Faktor lingkungan & interaksi GxE	Ekspresi gen toleransi bergantung pada genotipe, tahap pertumbuhan, dan interaksi dengan lingkungan → kunci seleksi.	2	Sandhu et al. (2017); Panda et al. (2018)



Gambar 3. Faktor-faktor Keberhasilan Pemuliaan Padi

Pemuliaan padi merupakan strategi penting dalam menjaga ketahanan pangan global, terutama di Asia sebagai pusat produksi dan konsumsi padi dunia. Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor paling dominan dalam keberhasilan pemuliaan adalah pyramiding multi-gen dan marker-assisted breeding (MAS/MABB), yang menekankan pendekatan molekuler untuk menggabungkan gen ketahanan terhadap penyakit dan stres lingkungan. Strategi ini terbukti mampu meningkatkan ketahanan varietas sekaligus memperpanjang umur produktivitasnya di lapangan.

Selain itu, keberhasilan pemuliaan juga sangat dipengaruhi oleh pemanfaatan keragaman genetik, screening fenotipe lintas lingkungan, serta integrasi genomik dan bioinformatika. Plasma nutfah dan kerabat liar padi menjadi sumber gen penting untuk peningkatan hasil dan ketahanan stres, sementara uji multi-lokasi diperlukan untuk memastikan stabilitas varietas di berbagai kondisi. Teknologi genomik mempercepat identifikasi gen adaptif sehingga proses pemuliaan menjadi lebih efisien dan presisi.

Faktor lain yang berperan adalah karakter morfo-fisiologis tanaman, efisiensi penggunaan hara, serta partisipasi petani melalui Participatory Plant Breeding (PPB). Karakter seperti arsitektur tanaman, efisiensi fotosintesis, dan ketahanan rebah mendukung peningkatan produktivitas, sedangkan gen seperti OsPSTOL1 membantu efisiensi serapan hara pada lahan marginal. PPB memastikan varietas yang dihasilkan sesuai dengan kebutuhan petani, sehingga meningkatkan peluang adopsi di lapangan.

Selain itu, bioteknologi modern seperti genome editing (CRISPR/Cas9) serta interaksi genotipe $\times$ lingkungan (G $\times$ E) juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan pemuliaan. Teknologi ini memungkinkan pengembangan varietas unggul secara lebih cepat dan spesifik, meskipun masih menghadapi tantangan regulasi dan penerimaan masyarakat. Secara keseluruhan, keberhasilan pemuliaan padi ditentukan oleh sinergi antara teknologi molekuler, keragaman genetik, faktor agronomis, dan keterlibatan sosial-ekonomi petani.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa pemuliaan padi memiliki kontribusi signifikan terhadap peningkatan produktivitas, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani di tengah tekanan perubahan iklim. Temuan utama menunjukkan bahwa berbagai strategi pemuliaan, mulai dari hibridisasi klasik hingga integrasi bioteknologi modern seperti marker-assisted breeding (MAS), gene pyramiding, dan genome editing, telah terbukti mampu menjawab persoalan utama pertanian beras global. Dengan demikian, hasil ini secara langsung menjawab pertanyaan penelitian yang berfokus pada sejauh mana pemuliaan padi berperan dalam mendukung keberlanjutan sistem pangan dan kesejahteraan rumah tangga petani.

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemuliaan padi berperan penting dalam meningkatkan produktivitas, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani di tengah perubahan iklim. Peningkatan produktivitas dicapai melalui hibridisasi, perbaikan arsitektur tanaman, efisiensi fotosintesis, dan pengendalian rebah, sedangkan ketahanan pangan diperkuat melalui varietas tahan penyakit, toleransi cekaman abiotik, serta biofortifikasi gizi. Selain itu, pemuliaan juga meningkatkan kesejahteraan petani melalui efisiensi biaya produksi, stabilitas

hasil di lahan marginal, dan diversifikasi varietas bernilai ekonomi.

Dibandingkan literatur sebelumnya, temuan ini tetap konsisten dengan studi yang menunjukkan bahwa varietas unggul meningkatkan produktivitas dan pendapatan petani. Namun, penelitian ini menegaskan adanya pergeseran paradigma dari pendekatan tunggal berbasis hasil menuju pemuliaan multidimensional yang mencakup aspek gizi, keberlanjutan lingkungan, dan penerimaan sosial. Pendekatan ini juga memperluas perspektif dengan mengintegrasikan konsep resilience breeding dan food system resilience, sehingga pemuliaan tidak lagi dipandang sebagai proses teknis semata, tetapi sebagai sistem yang lebih kompleks.

Secara teoretis, penelitian ini memperkuat pentingnya pendekatan resilience breeding yang menekankan adaptasi terhadap perubahan iklim melalui interaksi genotipe $\times$ lingkungan ($G \times E$). Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan varietas tidak hanya ditentukan oleh teknologi molekuler, tetapi juga oleh kesesuaian sosial dan ekologis. Sementara itu, food system resilience menegaskan bahwa ketahanan pangan mencakup produksi, distribusi gizi, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan petani, sehingga pemuliaan padi berperan sebagai penghubung antara inovasi ilmiah dan sistem sosial ekonomi.

Secara praktis dan kebijakan, penelitian ini menekankan pentingnya penguatan strategi pemuliaan seperti MAS/MABB, gene pyramiding, biofortifikasi, serta Participatory Plant Breeding (PPB). Kebijakan perlu diarahkan pada distribusi benih unggul, dukungan riset bioteknologi seperti genome editing, serta regulasi yang adaptif terhadap teknologi baru. Selain itu, keterlibatan petani sejak awal pemuliaan menjadi kunci agar inovasi lebih sesuai dengan kebutuhan lokal dan mudah diadopsi.

Pemuliaan padi terbukti sebagai instrumen strategis dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan menjaga ketahanan pangan global. Meskipun metodologi SLR ini memiliki keterbatasan pada cakupan literatur dan data kuantitatif, hasilnya tetap memberikan kontribusi penting dalam merumuskan arah pengembangan pemuliaan yang lebih inklusif, multidimensional, dan berkelanjutan. Ke depan, integrasi multi-omics, pemodelan iklim, serta kolaborasi lintas disiplin dan lintas negara menjadi agenda penting untuk memperkuat sistem pangan global.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis sistematis, penelitian ini menegaskan bahwa pemuliaan padi berkontribusi signifikan terhadap peningkatan produktivitas, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani di tengah perubahan iklim melalui berbagai strategi seperti marker-

assisted breeding, pyramiding multi-gen, biofortifikasi, dan pemuliaan partisipatif yang saling melengkapi dalam menjawab tantangan agronomis, sosial, dan ekonomi. Temuan ini menunjukkan pergeseran paradigma dari peningkatan hasil semata menuju resilience breeding yang multidimensional, mencakup aspek gizi, keberlanjutan lingkungan, dan penerimaan sosial, sekaligus memperkuat kerangka food system resilience dalam konteks ketahanan pangan global. Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan implikasi berupa penyediaan varietas adaptif bagi petani kecil, peluang pengembangan pasar premium melalui biofortifikasi, serta rekomendasi kebijakan terkait distribusi benih dan regulasi bioteknologi yang lebih responsif. Namun, penelitian ini memiliki keterbatasan seperti cakupan bahasa literatur, rentang waktu publikasi, dan terbatasnya data kuantitatif sehingga membatasi estimasi dampak secara numerik. Meskipun demikian, sintesis ini tetap memberikan kontribusi penting sebagai dasar pengembangan strategi pemuliaan padi yang berkelanjutan. Untuk penelitian selanjutnya, diperlukan pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan aspek pemuliaan dengan dimensi sosial, gender, dan tata kelola kebijakan, serta perluasan studi komparatif lintas negara untuk memahami variasi adopsi varietas. Selain itu, pemanfaatan teknologi mutakhir seperti multi-omics, CRISPR/Cas9, dan pemodelan iklim perlu dikombinasikan dengan participatory plant breeding, didukung oleh kebijakan distribusi benih yang inklusif, penyuluhan berbasis bukti, dan investasi riset jangka panjang agar pemuliaan padi semakin efektif dalam memperkuat ketahanan pangan global dan meningkatkan kesejahteraan petani secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adepoju, A., Fagbemi, F., & Kehinde, B. (2020). Improved rice varieties adoption and welfare implications among small-holder farmers in South West Nigeria. AgEconSearch. Retrieved from <https://ageconsearch.umn.edu/record/342404/files/Improved%20rice%20varieties%20adoption%20and%20welfare.pdf>
- Castro-Pacheco, S. A., Rabekijana, R., Andriamiarana, M., Raveloson, H., Rakotomalala, J., Ramanantsoanirina, A., Garin, V., Grenier, C., & vom Brocke, K. (2024). Participatory plant breeding to develop biofortified upland rice for marginal environments. *Experimental Agriculture*, 60. <https://doi.org/10.1017/S0014479724000218>
- Chithrameenal, K., Alagarasan, G., Raveendran, M., Robin, S., Meena, S., Ramanathan, A., & Ramalingam, J. (2018). Genetic enhancement of phosphorus starvation tolerance

- through marker-assisted introgression of OsPSTOL1 gene in rice genotypes harbouring bacterial blight and blast resistance. *PLoS ONE*, 13(9), e0204144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204144>
- Dash, A. K., Rao, R. N., Rao, G. J. N., Verma, R. L., Katara, J. L., Mukherjee, A. K., Singh, O. N., & Bagchi, T. B. (2016). Phenotypic and marker-assisted genetic enhancement of parental lines of Rajalaxmi, an elite rice hybrid. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01005>
- Dong, N., Yin, W., Liu, D., Zhang, X., Yu, Z., Huang, W., Liu, J., Yang, Y., Meng, W., Niu, M., & Tong, H. (2020). Regulation of brassinosteroid signaling and salt resistance by SERK2 and potential utilization for crop improvement in rice. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.621859>
- Durrani, I. S., Butt, F. I., Jan, A., Asim, N., & Naqvi, S. M. S. (2019). In silico analysis tools prove Basmati 2008 (Indica rice) to be more meaningful for crop improvement as compared to Nipponbare (Japonica rice). *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 17, 7–16.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). The State of Food Security and Nutrition in the World 2024. Retrieved from <https://www.fao.org/3/cc9648en/cc9648en.pdf>
- Hong, Q. N., Fàbregues, S., Bartlett, G., Boardman, F., Cargo, M., Dagenais, P., Gagnon, M. P., Griffiths, F., Nicolau, B., O’Cathain, A., Rousseau, M. C., & Vedel, I. (2018). The Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) version 2018 for information professionals and researchers. *Education for Information*, 34(4), 285–291.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf
- Lenaerts, B., de Mey, Y., & Demont, M. (2018). Global impact of accelerated plant breeding: Evidence from a meta-analysis on rice breeding. *PLoS ONE*, 13(6), e0199016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199016>
- Liu, Q., Yang, X., Tzin, V., Peng, Y., Romeis, J., & Li, Y. (2020). Plant breeding involving genetic engineering does not result in unacceptable unintended effects in rice relative to conventional cross-breeding. *The Plant Journal*, 103, 2236–2249. <https://doi.org/10.1111/tpj.14895>
- Liu, S., Huang, Y., Xu, H., Zhao, M., Xu, Q., & Li, F. (2018). Genetic enhancement of

- lodging resistance in rice due to the key cell wall polymer lignin, which affects stem characteristics. *Breeding Science*, 68(4), 508–515. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.18050>
- McNally, K. L., Mauleon, R. P., Chebotarov, D., Klassen, S. P., Kohli, A., Ye, G., Leung, H., Hamilton, R. S., & Wing, R. A. (2020). Mass genome sequencing of crops and wild relatives to accelerate crop breeding: The digital rice genebank. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 482(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/482/1/012005>
- Mehar, M., Gupta, S., & Singh, R. (2019). Farmers' adoption of stress-tolerant rice varieties: Evidence from South Asia. *AgEconSearch*. Retrieved from https://ageconsearch.umn.edu/record/321902/files/ONLINE_03_Mehar.pdf
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
- Panda, D., Mahakhud, A., Mohanty, B., Mishra, S. S., & Barik, J. (2018). Genotypic variation of photosynthetic gas exchange and stomatal traits in some traditional rice (*Oryza sativa* L.) landraces from Koraput, India for crop improvement. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 24, 973–983. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0542-3>
- Panda, D., Sahu, N., Behera, P. K., & Lenka, K. (2020). Genetic variability of panicle architecture in indigenous rice landraces of Koraput region of Eastern Ghats of India for crop improvement. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26, 1961–1971. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00871-6>
- Patel, A., Chaudhari, P. R., & Verulkar, S. B. (2012). Integrating conventional and participatory crop improvement in rainfed rice. *Plant Archives*, 12, 129–133.
- Quintero, M. F., Ortega, D. F., Valenzuela, J. L., & Guzmán, M. (2013). Variation of hydro-physical properties of burnt rice husk used for carnation crops: Improvement of fertigation criteria. *Scientia Horticulturae*, 154, 82–87. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.019>
- Raina, M., Salgotra, R. K., Pandotra, P., Rathour, R., & Singh, K. (2019). Genetic enhancement for semi-dwarf and bacterial blight resistance with enhanced grain quality characteristics in traditional Basmati rice through marker-assisted selection. *Comptes Rendus Biologies*, 342(5–6), 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2019.04.004>

- Sandhu, M., Venkadesan, S., Prakash, C., Dixit, R., Solanke, A. U., Sharma, T. R., Mohapatra, T., & Amitha Mithra, S. V. (2017). RiceMetaSys for salt and drought stress responsive genes in rice: A web interface for crop improvement. *BMC Bioinformatics*, 18, Article 432. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1846-y>
- Singh, G., Singh, N., Ellur, R. K., Balamurugan, A., Prakash, G., Rathour, R., Mondal, K. K., Bhowmick, P. K., Gopala Krishnan, S., Nagarajan, M., Seth, R., Vinod, K. K., Singh, V., Bollinedi, H., & Singh, A. K. (2023). Genetic enhancement for biotic stress resistance in Basmati rice through marker-assisted backcross breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(22), 16081. <https://doi.org/10.3390/ijms242216081>
- Singh, R. K., Singh, U. S., & Khush, G. S. (2020). Breeding rice for sustainable agriculture. *Plant Breeding Reviews*, 43, 1–40. <https://doi.org/10.1002/9781119616801.ch1>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Subburaj, S., Thulasinathan, T., Sakthivel, V., Ayyenar, B., Kambale, R., Rajagopalan, V. R., Manickam, S., Rajasekaran, R., Chellappan, G., Thiyagarajan, K., Swaminathan, M., & Muthurajan, R. (2024). Genetic enhancement of blast and bacterial leaf blight resistance in rice variety CO 51 through marker-assisted selection. *Agriculture*, 14(5), 693. <https://doi.org/10.3390/agriculture14050693>
- Taylor, P., & Reeder, R. (2020). Assessment of diversity of Indian aromatic rice germplasm collections for morphological, agronomical, quality traits and molecular characters to identify a core set for crop improvement. *CABI Agriculture and Bioscience*, 1, Article 13. <https://doi.org/10.1186/s43170-020-00013-8>
- Vaishnavi, K., Geetha, S., Mathankumar, P., Ganesan, K. N., Boopathi, N. M., Uma, D., & Anandhi, K. (2024). Therapeutic rice (*Oryza sativa* L.): Crop breeding interventions to combat chronic diseases. *Plant Science Today*, 11. <https://doi.org/10.14719/pst.5331>
- Wang, X., Liu, Y., & Zhang, H. (2023). Impacts of joint adoption of improved varieties and management practices on yield and income. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1194930. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2023.1194930/pdf>

