

Progress and challenges of grain drying technologies in Indonesia

Engkos Achmad Kosasih^{a,1}, Muhammad Burhanuddin Fauzi^{a,b}, Tresna Priyana Soemardi^a

^aDepartment of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok, 16424

^bIndonesian Coffee and Cocoa Research Institute, Jember, 61147

¹Email korespondensi: kosri@eng.ui.ac.id

Abstract. Grain drying is a vital postharvest stage in Indonesia to maintain quality, reduce losses, and support food security. High moisture levels in rice, maize, coffee, and soybean increase risks of physical damage, nutrient loss, and mycotoxin contamination, lowering market value and competitiveness. Traditional sun-drying is still common among smallholder farmers due to its simplicity and low cost, but it is weather-dependent, unhygienic, and inefficient. To address these issues, mechanical dryers such as flat-bed, fluidized-bed, rotary, and solar-assisted types have been introduced, improving efficiency and moisture uniformity, yet adoption is constrained by high costs, energy requirements, and limited rural infrastructure. Recent advances include microwave drying and Internet of Things (IoT)-based systems that enable real-time monitoring and promote sustainable energy use. However, challenges remain in affordability, renewable energy access, and farmers' technological literacy. Future research should focus on developing low-cost hybrid dryers powered by renewable sources, integrating digital technologies for precision control, and exploring strategies to preserve nutritional quality and reduce mycotoxins. Strengthening regional collaboration is also crucial to accelerate the adoption of sustainable drying technologies in Southeast Asia. Overall, advancing grain drying technologies offers significant potential to improve energy efficiency, ensure product quality, and reinforce Indonesia's food security in tropical conditions.

Keywords: grain drying; postharvest technology; energy efficiency; renewable energy; food security Indonesia

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/5m959y42>

PENDAHULUAN

Pengeringan merupakan salah satu tahap penting dalam penanganan pascapanen biji-bijian di Indonesia. Tingginya kadar air pada hasil panen seperti padi, jagung, kopi, dan kedelai menjadikan produk rentan mengalami kerusakan fisik, penurunan kualitas gizi, hingga kontaminasi mikotoksin. Hal ini berimplikasi pada rendahnya mutu produk, harga jual, serta daya saing komoditas di pasar domestik maupun ekspor [1]. Oleh karena itu, teknologi pengeringan yang efektif, efisien, dan sesuai dengan kondisi iklim tropis Indonesia menjadi kebutuhan mendesak dalam rangka menjaga ketahanan pangan nasional. Selama beberapa dekade terakhir, metode pengeringan tradisional berupa penjemuran di bawah sinar matahari masih menjadi pilihan utama bagi petani kecil karena biaya yang rendah dan kemudahan aplikasinya. Namun, metode ini sangat bergantung pada kondisi cuaca, tidak higienis, serta memerlukan waktu relatif lama [2]. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai teknologi pengering mekanis mulai diperkenalkan, seperti *flat bed dryer*, *fluidized bed dryer*, dan *solar-assisted dryer*, yang terbukti mampu meningkatkan efisiensi waktu serta menurunkan kadar air secara lebih merata [3].

Seiring perkembangan teknologi, penelitian terkini juga menekankan pentingnya efisiensi energi dan mutu produk dalam proses pengeringan. Beberapa kajian menunjukkan bahwa konsumsi energi yang tinggi

masih menjadi hambatan utama adopsi pengering mekanis secara luas, terutama pada skala petani kecil [4]. Di sisi lain, metode pengeringan modern seperti *microwave drying* dan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) mulai dikembangkan untuk memungkinkan kontrol parameter pengeringan secara *real-time* serta meningkatkan keberlanjutan penggunaan energi [5, 6]. Meskipun terdapat berbagai inovasi, tantangan implementasi teknologi pengeringan di Indonesia masih cukup besar. Faktor biaya investasi, keterbatasan infrastruktur energi, rendahnya tingkat adopsi teknologi oleh petani kecil, serta isu keberlanjutan menjadi penghambat utama [7]. Oleh karena itu, diperlukan strategi penelitian dan kebijakan yang mampu menjembatani kesenjangan antara pengembangan teknologi dengan kebutuhan di lapangan. Artikel ini bertujuan untuk mengulas perkembangan teknologi pengeringan biji-bijian di Indonesia dalam sepuluh tahun terakhir serta mengidentifikasi tantangan utama yang perlu diatasi untuk mendukung ketahanan pangan nasional.

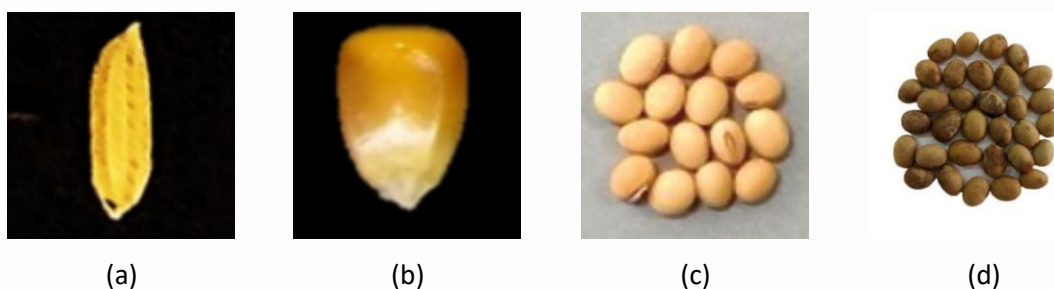
MATERIAL BIJI-BIJIAN DAN KARAKTERISTIKNYA

Biji-bijian merupakan komoditas utama dalam sistem pangan Indonesia, baik sebagai sumber karbohidrat, penyegar, maupun protein nabati, yang mencakup padi, jagung, kedelai, dan kopi. Keempat komoditas ini memiliki karakteristik fisik seperti pada Gambar 1, dan

fisiokimia yang berpengaruh langsung terhadap proses pengeringan, penyimpanan, serta mutu produk akhir. Padi (*Oryza sativa*) adalah komoditas pangan pokok dengan kadar air panen awal yang umumnya tinggi (20–30%), sehingga harus segera dikeringkan untuk mencegah kerusakan kualitas dan serangan mikroba [8]. Faktor kadar air memengaruhi sifat fisik gabah seperti densitas, porositas, dan koefisien gesek, yang berdampak pada rancangan dan efisiensi alat pengering [9]. Di sisi lain, penelitian budidaya juga menunjukkan bahwa kesesuaian lahan menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas produktivitas padi, jagung, kedelai, dan kopi yang nantinya akan berimplikasi pada kadar air hasil panen [10].

Jagung (*Zea mays*) dipanen dengan kadar air 25–35%, lebih tinggi dibandingkan kadar aman penyimpanan, yaitu 13–15%. Sifat aerodinamik dan fisik jagung,

seperti ukuran biji, kerapatan kamba, dan sudut tumpukan, sangat dipengaruhi oleh kadar air dan menjadi faktor penting dalam proses pengeringan mekanis [11]. Dalam sistem pertanian lahan kering di Indonesia bagian barat, jagung sering dibudidayakan bersama kedelai atau padi, dan hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi ini berpengaruh pada kadar air dan kualitas hasil [12]. Kedelai (*Glycine max*) memiliki kadar air panen sekitar 18–20% dan kualitas bijinya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pascapanen. Perubahan kadar air kedelai dapat memengaruhi kekerasan, ukuran, serta sifat mekanik biji, yang penting untuk diperhatikan dalam rancangan pengering dan proses pengolahan [12]. Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa interaksi tanaman kedelai dengan komoditas lain dalam pola tumpangsari juga dapat memengaruhi kadar air akhir hasil panen [10].



Gambar 1. Perbandingan bentuk biji (a) padi [11], (b) jagung [11], (c) kedelai [13], dan (d) kopi [14].

Kopi merupakan komoditas ekspor strategis dengan dua varietas utama, yaitu robusta (*Coffea canephora*) dan arabika (*Coffea arabica*). Biji kopi segar umumnya dipanen dengan kadar air 55–60% (basis basah) dan harus dikeringkan hingga 11–13% agar aman disimpan [15]. Perubahan kadar air berpengaruh langsung pada sifat fisik kopi, seperti densitas kamba, porositas, serta sifat gesek, yang menjadi parameter penting dalam perancangan alat pengering [16]. Kajian terbaru menunjukkan bahwa teknologi berbasis *near-infrared spectroscopy* (NIRS) dapat digunakan untuk memprediksi kualitas internal biji kopi secara non-destruktif, termasuk kandungan air, protein, dan lemak, yang sangat relevan untuk memastikan mutu produk setelah proses pengeringan [17].

Studi di dataran tinggi Gayo menemukan bahwa produksi kopi arabika dipengaruhi oleh karakteristik lahan dan tingkat erosi, yang secara tidak langsung menentukan kadar air dan kualitas biji panen [18]. Sementara itu, penelitian lain di Lampung menunjukkan adanya potensi pemalsuan campuran produk kopi robusta dengan beras putih, yang dapat dideteksi melalui metode FT-IR, menggarisbawahi pentingnya kualitas dan ketelusuran dalam rantai

pascapanen kopi [19]. Secara keseluruhan, karakteristik material biji-bijian di Indonesia menunjukkan bahwa kadar air merupakan faktor penentu utama dalam kualitas hasil panen dan rancangan teknologi pengeringan. Variasi sifat fisik antarkomoditas memperlihatkan perlunya pendekatan spesifik dalam memilih metode pengeringan yang sesuai, sehingga mutu produk tetap terjaga sekaligus mendukung ketahanan pangan nasional.

Perkembangan Teknologi Pengeringan Biji-bijian di Indonesia

Pengeringan tradisional berupa penjemuran di bawah sinar matahari masih menjadi praktik umum di kalangan petani kecil di Indonesia karena murah dan tidak membutuhkan peralatan tambahan [20]. Namun, cara ini memiliki banyak keterbatasan, seperti ketergantungan pada cuaca, waktu pengeringan yang lama, serta risiko kontaminasi jamur dan penurunan kualitas produk [21]. Dampak negatif tersebut dapat memengaruhi nilai jual komoditas biji-bijian, khususnya padi dan jagung, di pasar domestik maupun ekspor. Pengering mekanis sederhana mulai diperkenalkan di berbagai daerah untuk mengatasi keterbatasan metode tradisional. Salah satunya adalah

penggunaan rotary dryer dengan sumber panas dari kompor LPG yang terbukti dapat meningkatkan performa termal serta mempercepat waktu pengeringan jagung untuk petani kecil [22]. Teknologi ini dianggap lebih adaptif dibandingkan pengeringan matahari karena memberikan distribusi panas yang lebih stabil dan tidak tergantung pada kondisi lingkungan.

Beberapa penelitian juga mengembangkan desain ruang pengering yang lebih murah dan mudah dibuat. Studi terbaru menunjukkan bahwa drum oli bekas yang disusun horizontal dapat dimanfaatkan sebagai ruang pengering dalam sistem heat pump dryer, dengan hasil simulasi CFD yang menunjukkan kinerja aliran udara cukup baik untuk aplikasi pengeringan skala kecil [23]. Pendekatan ini menawarkan alternatif inovasi teknologi dengan biaya rendah yang dapat diadopsi di pedesaan. Teknologi berbasis energi terbarukan, terutama solar dryer, semakin banyak diteliti sebagai solusi berkelanjutan. Penerapan teknologi ini di Indonesia terbukti meningkatkan efisiensi pengeringan serta menurunkan kerugian pascapanen pada padi [20]. Selain mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, solar dryer juga membantu menjaga kualitas hasil panen karena proses berlangsung lebih higienis dibandingkan dengan penjemuran terbuka.

Secara global, kerugian pascapanen akibat fasilitas pengeringan yang kurang memadai menjadi salah satu faktor terbesar penyebab penurunan keuntungan petani, dengan kontribusi lebih dari 60% terhadap total kehilangan hasil [21]. Hal ini sejalan dengan kondisi di Indonesia, di mana keterbatasan akses terhadap teknologi pengering modern membuat petani masih sangat bergantung pada metode tradisional. Oleh karena itu, adopsi inovasi seperti *rotary dryer* LPG, *heat pump dryer* murah, dan *solar dryer* dinilai krusial untuk meningkatkan kualitas biji-bijian sekaligus memperkuat ketahanan pangan nasional.

Efisiensi Energi dan Mutu Produk

Efisiensi energi dalam pengeringan biji-bijian menjadi salah satu indikator utama keberhasilan teknologi pascapanen, karena berhubungan langsung dengan biaya produksi dan keberlanjutan. Penelitian terbaru mengenai kinetika pengeringan jagung di Filipina menunjukkan bahwa optimasi parameter suhu dan aliran udara dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi energi sekaligus memperpendek waktu pengeringan [24]. Di kawasan ekuatorial, konsumsi energi pada proses pengeringan padi dan jagung dilaporkan cukup tinggi, dengan variasi penggunaan energi yang bergantung pada jenis pengering dan metode operasional. Estimasi energi di zona ekuator menunjukkan bahwa pengeringan mekanis memerlukan energi lebih besar dibandingkan

penjemuran, namun menghasilkan mutu yang lebih stabil [25].

Inovasi pemanfaatan beras kering sebagai pakan alternatif dalam bioekonomi berkelanjutan juga menekankan pentingnya integrasi antara efisiensi energi dan pemanfaatan limbah pertanian. Studi di negara-negara penghasil padi menunjukkan bahwa pengeringan yang tepat tidak hanya menurunkan kehilangan hasil, tetapi juga berpotensi menciptakan produk samping bernilai ekonomi [26]. Kajian literatur lain menyoroti bahwa konsumsi energi pada pengeringan padi masih relatif tinggi dibandingkan dengan biji-bijian lain, sehingga perlu inovasi pada desain pengering hemat energi. Penelitian global menyarankan transisi ke sistem berbasis energi terbarukan untuk mengurangi dampak lingkungan dan biaya operasional [4].

Di Indonesia, pendekatan inovatif berupa *auto-stirring grains bed dryer* berhasil dikembangkan sebagai solusi efisiensi, karena dapat meningkatkan distribusi panas dan mengurangi kebutuhan energi per kilogram gabah yang dikeringkan [27]. Hal ini relevan dengan kondisi tropis di mana pengeringan yang merata sulit dicapai dengan metode tradisional. Selain energi, mutu produk juga menjadi aspek penting yang dipengaruhi oleh teknologi pengeringan. Studi terbaru mengenai beras, jagung, dan sorgum lokal Indonesia menunjukkan bahwa kandungan nutrisi, termasuk protein dan mikronutrien, sangat dipengaruhi oleh suhu pengeringan yang digunakan [28]. Bila suhu terlalu tinggi, risiko degradasi nutrisi meningkat, sedangkan suhu rendah menyebabkan waktu pengeringan lebih lama dan efisiensi menurun.

Pemodelan agronomi di Indonesia juga menunjukkan bahwa teknologi pengeringan berperan dalam menjaga potensi hasil tanaman, khususnya untuk padi dan jagung di lingkungan tropis lembap. Simulasi memperlihatkan bahwa dengan kontrol kadar air yang optimal, hasil panen dapat dipertahankan tanpa kehilangan signifikan pada mutu [29]. Aspek lingkungan tidak kalah penting. Studi jejak karbon pada produksi padi intensif di Asia Tenggara menemukan bahwa pengeringan menyumbang cukup besar terhadap emisi gas rumah kaca, tetapi penerapan teknologi modern berbasis energi efisien mampu menekan emisi sekaligus mempertahankan kualitas gabah [30].

Persamaan umum analisis pengeringan

Kadar air basis kering (M_{db}) dari kopi kering dalam satuan desimal dihitung menggunakan Persamaan (1) [31], di mana m_t adalah massa kopi pada waktu t , dan m_d adalah massa bahan kering dalam kopi (gram). Nilai m_d diperoleh dengan metode ASTM, yaitu dengan memanaskan bahan dalam oven selama 24 jam pada suhu 105 °C [32].

$$M_{ab} = \frac{m_t(g) - m_d(g)}{m_d(g)} \quad (1)$$

Nilai M_{ab} yang dihitung dari Persamaan (1) digunakan untuk menentukan *moisture ratio* (MR) selama proses pengeringan kopi. Persamaan (2) dapat digunakan untuk memperoleh nilai MR, di mana M_t adalah kadar air pada waktu t (basis

kering), M_o adalah kadar air awal (basis kering), dan M_e adalah kadar air kesetimbangan (basis kering). Karena nilai M_e pada waktu pengeringan yang panjang relatif sangat kecil dibandingkan M_t dan M_o , maka nilai M_e mendekati 0 [33-37].

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2)$$

Model eksponensial [38] digunakan untuk menentukan konstanta laju pengeringan. Model ini juga dikenal sebagai model matematis Lewis [33], sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3). Di

mana, k menyatakan konstanta laju pengeringan dan t menyatakan waktu. Nilai eksponensial dapat disederhanakan dengan logaritma natural, $\ln MR$.

$$MR = \exp(-k \cdot t) \quad (3)$$

Berdasarkan dari persamaan Arrhenius pada energi aktivasi, hubungan dari $\ln k$ dan $1/T$ ditunjukkan oleh Persamaan (4) [39, 40]

$$\ln k = \left(-\frac{Ea}{R} \times \frac{1}{T} \right) + \ln A \quad (4)$$

Ea adalah energi aktivasi, nilai R adalah konstanta gas ideal $\left(8.314 \frac{J}{mol \cdot K} \right)$ [41], dan T adalah temperatur dalam kelvin.

STUDI KASUS: PENDINGERAN KOPI ROBUSTA DENGAN HEAT PUMP DRYER

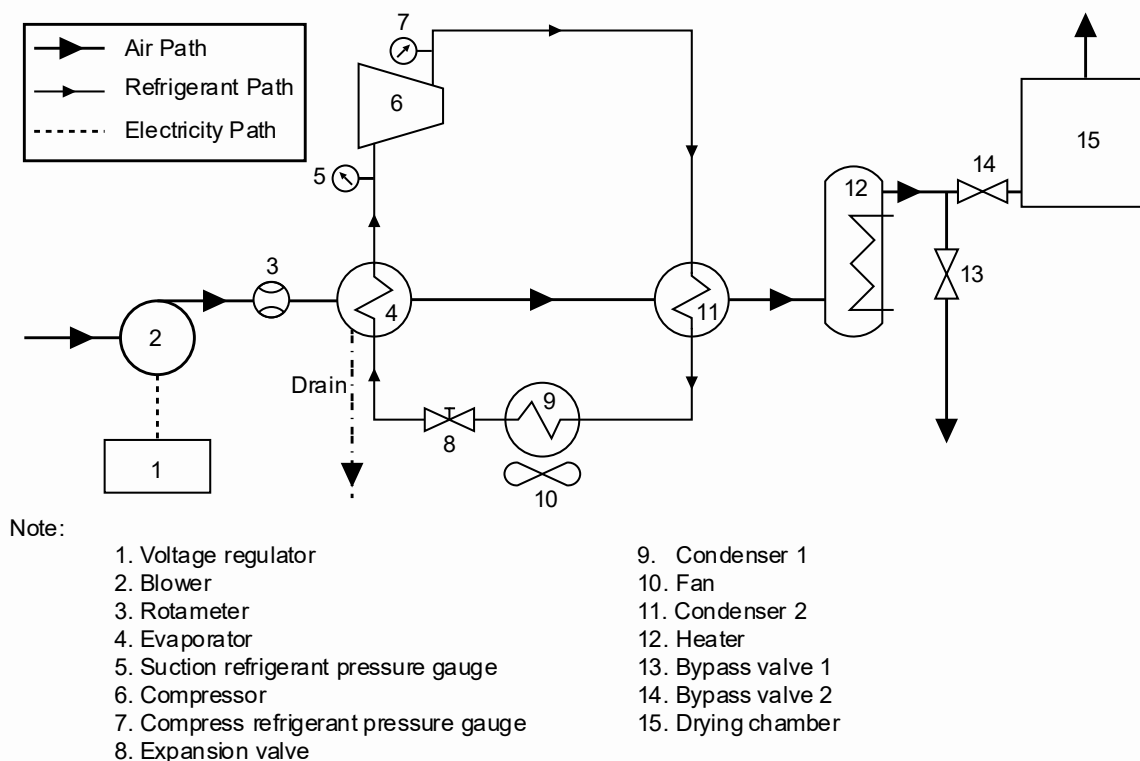
Kopi robusta (*Coffea canephora*) merupakan komoditas penting bagi Indonesia dengan kontribusi lebih dari 80% terhadap total produksi kopi nasional, sehingga upaya peningkatan kualitas pascapanennya memiliki dampak besar terhadap daya saing ekspor. Pengeringan merupakan tahap kritis dalam rantai pascapanen kopi karena biji kopi segar memiliki kadar air tinggi (55–60%) yang harus diturunkan hingga 11–13% untuk mencegah kerusakan kualitas dan kontaminasi mikroorganisme [42]. Penggunaan *heat pump dryer* (HPD) menjadi solusi alternatif karena mampu memberikan kontrol suhu rendah hingga sedang dengan kelembapan terkendali, sehingga kualitas fisik dan kimia kopi dapat lebih terjaga dibandingkan dengan metode konvensional [43]. Pada umumnya, HPD terdiri dari komponen sistem

refrigerasi dan dilengkapi dengan ruang pengeringan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa HPD mampu mempercepat laju pengeringan kopi robusta hingga 40% dibandingkan dengan pengeringan matahari, sekaligus menurunkan konsumsi energi hingga 30% [44].

Karakteristik pengeringan kopi robusta menggunakan HPD sangat dipengaruhi oleh parameter suhu dan kelembapan spesifik. Studi di Jawa Barat menemukan bahwa peningkatan suhu dari 60 °C ke 80 °C mempercepat pengeringan dengan rentang aktivasi energi sebesar 23 – 26 kJ/mol [45]. Oleh karena itu, optimasi suhu pengeringan dengan kelembapan relatif direkomendasikan untuk menjaga mutu sensoris biji kopi [46]. Selain efisiensi energi, penerapan HPD juga meningkatkan kualitas produk. Analisis komponen bioaktif menunjukkan bahwa biji kopi robusta yang dikeringkan dengan HPD memiliki kadar klorogenat yang lebih stabil dibandingkan dengan pengeringan

konvensional [47]. Studi serupa di Thailand dan Vietnam melaporkan bahwa HPD mampu menekan

kehilangan asam amino esensial yang penting bagi karakteristik cita rasa kopi [48].



Gambar 2. Diagram skematis sistem *Heat Pump Dryer* [14].

Dari sisi teknis, desain HPD untuk kopi robusta dapat dikombinasikan dengan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya atau geotermal, guna meningkatkan keberlanjutan sistem [49]. Di Indonesia, percobaan integrasi *solar-assisted* HPD terbukti meningkatkan efisiensi termal hingga 38% dan menjaga warna serta tekstur biji kopi lebih baik dibandingkan metode pengeringan konvensional [50]. Studi internasional juga menyoroti bahwa HPD dapat diterapkan pada skala petani kecil jika menggunakan sistem hibrida dengan biaya investasi lebih rendah. Sebagai contoh, penelitian di Meksiko membandingkan pengeringan kopi pada *greenhouse dryer*, *sun patio*, dan HPD, di mana HPD menghasilkan mutu fisik terbaik meskipun dengan biaya awal lebih tinggi [49].

Secara umum, penerapan HPD pada pengeringan kopi robusta di Indonesia menawarkan tiga keunggulan utama: (i) peningkatan efisiensi energi, (ii) pelestarian senyawa bioaktif dan mutu sensoris, serta (iii) peluang integrasi dengan energi terbarukan untuk mendukung keberlanjutan produksi. Namun, adopsi teknologi ini masih terkendala oleh biaya investasi dan keterbatasan literasi teknologi di kalangan petani kecil [51]. Dengan demikian, pengembangan HPD untuk pengeringan kopi robusta perlu diarahkan pada inovasi desain hemat energi, pemanfaatan sumber energi lokal,

serta model implementasi berbasis kelompok tani agar teknologi ini dapat diadopsi secara luas dan berkelanjutan di Indonesia.

Tantangan dalam Implementasi di Indonesia

Implementasi teknologi pengeringan biji-bijian di Indonesia menghadapi berbagai hambatan struktural dan teknis. Salah satu tantangan utama adalah rendahnya tingkat adopsi teknologi modern oleh petani kecil karena keterbatasan modal, kurangnya akses terhadap informasi, dan rendahnya literasi teknologi [20]. Kondisi ini menyebabkan petani masih bergantung pada metode tradisional seperti penjemuran matahari, yang memiliki risiko tinggi terhadap kehilangan hasil. Selain itu, biaya investasi untuk mesin pengering modern masih relatif mahal, sehingga sulit dijangkau oleh petani di pedesaan. Upaya mengembangkan desain pengering hemat biaya, seperti *heat pump dryer* berbahan drum bekas, telah diusulkan sebagai solusi, namun adopsinya masih terbatas karena kurangnya dukungan teknis dan finansial [52].

Tantangan berikutnya adalah keterbatasan infrastruktur energi di pedesaan. Penggunaan *rotary dryer* berbahan bakar LPG menawarkan efisiensi pengeringan, tetapi biaya operasional LPG dan distribusi energi menjadi hambatan besar bagi petani

kecil di daerah terpencil [53]. Hal ini memperlihatkan pentingnya alternatif energi terbarukan seperti tenaga surya, meskipun efektivitasnya tetap dipengaruhi oleh cuaca tropis Indonesia yang tidak menentu.

Selain aspek teknis dan finansial, faktor mutu produk juga menjadi hambatan penting. Penelitian menunjukkan bahwa biji-bijian lokal Indonesia seperti beras, jagung, dan sorgum sangat sensitif terhadap variasi suhu pengeringan, sehingga penggunaan teknologi yang tidak tepat justru dapat menurunkan kandungan nutrisi dan kualitas gizi [28]. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi teknologi pengeringan tidak hanya ditentukan oleh efisiensi energi, tetapi juga kemampuan mempertahankan kualitas produk akhir. Secara keseluruhan, tantangan implementasi teknologi pengeringan biji-bijian di Indonesia terletak pada biaya, akses energi, keterbatasan literasi teknologi, dan kualitas hasil. Untuk mengatasinya, diperlukan sinergi antara inovasi teknologi hemat biaya, dukungan kebijakan pemerintah, serta peningkatan kapasitas petani melalui pelatihan dan penyuluhan [20].

Peluang dan Arah Penelitian Masa Depan

Pengeringan biji-bijian di Indonesia masih menyimpan peluang besar untuk ditingkatkan melalui integrasi inovasi teknologi dan kebijakan yang berkelanjutan. Kajian mutakhir menekankan pentingnya riset dalam mengurangi kehilangan hasil pascapanen dengan mengembangkan teknologi pengering hemat energi dan ramah lingkungan [54]. Studi kasus di Asia Tenggara menunjukkan bahwa praktik terbaik pengeringan padi, seperti dua tahap pengeringan (*two-stage drying*), dapat menjadi acuan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi di Indonesia [55]. Tren penelitian global juga memprediksi bahwa riset pada beras hingga 2030 akan semakin menekankan teknologi presisi dan penggunaan sumber energi terbarukan [56].

Di Indonesia, transformasi teknologi tanaman padi melalui inovasi digital, otomatisasi, dan penggunaan sensor cerdas dipandang sebagai peluang besar untuk meningkatkan ketahanan pangan nasional [57]. Namun, tantangan adopsi masih memerlukan riset tentang model diseminasi teknologi yang sesuai dengan kondisi sosial-ekonomi petani kecil [58]. Selain efisiensi energi, aspek konsumsi daya dalam teknologi pengeringan padi juga menjadi bidang riset penting. Tinjauan literatur terbaru menunjukkan perlunya inovasi sistem pengering hemat energi yang sekaligus mampu menjaga mutu gizi biji-bijian [4]. Di sisi lain, kajian mengenai kualitas beras global menyoroti bahwa riset masa depan harus

mengintegrasikan aspek mutu gizi dan keamanan pangan, terutama dalam konteks nutrisi beras yang rentan berubah akibat suhu pengeringan [59].

Mitigasi kontaminasi mikotoksin selama pengeringan juga menjadi salah satu bidang penelitian yang semakin mendesak. Pengalaman di Eropa dan Asia Tenggara menunjukkan bahwa penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menemukan teknik pengeringan yang efektif dalam menekan perkembangan mikotoksin tanpa merusak kualitas pangan [60]. Peluang penelitian lain ada pada kerja sama regional di Asia Timur dan Tenggara, di mana pendekatan kolaboratif dapat mempercepat adopsi teknologi pengering berkelanjutan dan mendukung ketahanan pangan regional [61]. Lebih jauh, riset mengenai produktivitas beras di Asia Tenggara menggarisbawahi perlunya inovasi teknologi pascapanen, termasuk pengeringan, untuk menutup kesenjangan hasil dan mengantisipasi peningkatan kebutuhan pangan global [62]. Secara keseluruhan, arah penelitian masa depan di bidang pengeringan biji-bijian mencakup: (i) efisiensi energi dan keberlanjutan, (ii) digitalisasi dan otomatisasi, (iii) kualitas gizi dan keamanan pangan, serta (iv) kolaborasi riset regional untuk mempercepat adopsi teknologi.

KESIMPULAN

Pengeringan biji-bijian di Indonesia merupakan tahapan penting dalam menjaga kualitas hasil panen, mengurangi kehilangan pascapanen, dan mendukung ketahanan pangan nasional. Teknologi pengeringan mengalami perkembangan signifikan, mulai dari metode tradisional hingga penerapan teknologi modern berbasis IoT, *microwave*, dan energi terbarukan. Namun, adopsi teknologi tersebut masih terbatas karena kendala biaya, infrastruktur energi, dan literasi teknologi.

Dari sisi efisiensi energi dan mutu produk, penelitian mutakhir menegaskan adanya dilema antara konsumsi energi yang tinggi dan kebutuhan untuk menjaga kualitas gizi serta keamanan pangan. Sementara itu, tantangan implementasi di Indonesia, terutama keterbatasan modal petani, akses teknologi, serta keterjaminan mutu biji-bijian. Peluang riset masa depan sangat luas, meliputi inovasi pengering hemat energi, digitalisasi proses, mitigasi mikotoksin, serta pengembangan sistem kolaborasi riset regional. Dengan arah penelitian ini, teknologi pengeringan tidak hanya dapat meningkatkan efisiensi produksi, tetapi juga memperkuat ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan di Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, dan masukan dalam penyusunan naskah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama berkontribusi dalam penulisan naskah asli dan analisis literatur; penulis kedua bertanggung

jawab atas supervisi penelitian serta review naskah hingga finalisasi; sedangkan penulis ketiga berperan dalam peninjauan naskah.

DANA PENELITIAN

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Universitas Indonesia atas dukungan pendanaan penelitian yang menjadi dasar penulisan naskah

1

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hananda, N., Kamul, A., Harito, C., Djuana, E., Elwirehardja, G.N., Pardamean, B., Gunawan, F.E., Budiman, A.S., Asrol, M. and Pasang, T., "Solar drying in Indonesia and its development: a review and implementation," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1169/1/012084.
- [2] Syahrul, S., Mirmanto, M., Hartawan, Y. and Sukmawaty, S., "Effect of air intake temperature on drying time of unhulled rice using a fluidized bed dryer," *Heat and Mass Transfer*, 2019, doi: 10.1007/s00231-018-2414-3.
- [3] Parenthen, D., Sumbung, F.H. and Sahupala, P., "Analyzing the Performance of a Solar-Assisted Grain Dryer," *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*, 2025, doi: 10.17977/um016v9i12025p215.
- [4] T. Ying and E. S. Spang, "Paddy drying technologies: A review of existing literature on energy consumption," *Processes*, 2024, doi: 10.3390/pr12030532.
- [5] Latif, A., Yusuf, M.A. and Budiasto, J., "Real-Time Framework for Sustainable IoT-Based Grain Drying Integrated Load, Temperature, and Energy Performance Monitoring," *Instrumentation, Measure, Métrologie*, 2025, doi: 10.18280/i2m.240301.
- [6] Amanda, N., Wardhani, N.S.K. and Sari, A.R., "Characteristics of several foodstuff drying by microwave: A review," *International Conference on Smart and Innovative Agriculture*, 2022, doi: 10.2991/absr.k.220305.045.
- [7] Indianto, R., Asyifaa, A.H., Adiningsih, F.A., Aulia, G.A. and Achmad, S.R., "Conventional and advanced food-drying technology: A current review," *International Journal of Science and Technology*, 2021. [Online]. Available: <https://www.ijstr.org/final-print/jan2021/Conventional-And-Advanced-Food-drying-Technology-A-Current-Review.pdf>
- [8] Muchlisyyah, J., Shamsudin, R., Basha, R.K., Shukri, R. and How, S., "The effect of moisture content to the physical properties of long grain paddy (*Oryza sativa*)," *Asian Journal of Applied Science and Technology*, 2023, doi: 10.14456/apst.2024.63.
- [9] Bintoro, N., Zahra, A.I., Khansa, A.P., Nissa, M.C., Safira, A.S. and Ashari, S.N., "Effect of Moisture Content on Frictional Properties of Some Selected Grains in Indonesia," *Pertanika Journal of Science & Technology*, 2023, doi: 10.47836/pjst.31.3.04.
- [10] Suntoro, S., Mujiyo, M., Widijanto, H. And Herdiansyah, G., "Cultivation of Rice (*Oryza sativa*), Corn (*Zea mays*) and Soybean (*Glycine max*) Based on Land Suitability," *Journal of Settlements and Spatial Planning*, 2020, doi: 10.24193/JSSP.2020.1.02.
- [11] Bintoro, N., Karyadi, J.N.W., Saputro, A.D., Kusuma, R.A., Nissa, M.C. and Ashari, S.N., "Physical and aerodynamic properties of rough rice and corn: effect of moisture content and grain type," *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2024. [Online]. Available: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/9351>.
- [12] Erythrina, E., Susilawati, S., Slameto, S., Resiani, N.M.D., Arianti, F.D., Jumakir, J., Fahri, A., Bhermana, A., Jannah, A. and Sembiring, H., "Yield advantage and economic performance of rice–maize, rice–soybean, and maize–soybean intercropping in rainfed areas of Western Indonesia," *Agronomy*, 2022, doi: 10.3390/agronomy12102326.
- [13] F. Ridara, R. Fitriani, A. Algina, D. Ustari, and A. Karuniawan, "Genetic parameters and yield potential of Indonesian soybean varieties (*Glycine max* L.) in wetland during dry season," *Ilmu Pertanian (Agricultural Science)*, vol. 10, no. 1, pp. 1-10, 2025, doi: 10.22146/ipas.103816.

- [14] M. B. Fauzi, E. A. Kosasih, and M. I. Dzaky, "Influence of Drying Condition on the Drying Constants and Activation Energy for Robusta Coffee Using Heat Pump Drying," *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, vol. 1372, no. 1, p. 012105, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1372/1/012105.
- [15] J. Niwagaba and W. K. Sitienei, "Effect of moisture content on the physical properties of coffee beans (robusta)," *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 2019, doi: 10.9790/2380-1207010113.
- [16] Kobusinge, J., Gabiri, G., Kagezi, G.H., Sseremba, G., Nakitende, A., Arinaitwe, G. and Twesigye, C.K., "Potential of moisture conservation practices to improve soil properties and nutrient status of Robusta coffee plant," *Agronomy*, 2023, doi: 10.3390/agronomy13041148.
- [17] Munawar, A.A., Kusumiyati, K., Andasuryani, A., Yusmanizar, Y. and Adrizal, A., "Near-infrared technology in agriculture: Rapid, simultaneous, and non-destructive determination of inner quality parameters on intact coffee beans," *Open Agriculture*, 2024, doi: 10.1515/opag-2022-0290.
- [18] Manfarizah, M., Karim, A., Basri, H. and Muyassir, M., "Analysis of Land Characteristics and Erosion Impact on Gayo Arabica Coffee Production," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2025, doi: 10.1016/j.cscee.2025.101258.
- [19] Andriansyah, I., Ambaga, L.D., Pratama, R. and Muttaqin, F.Z., "Detection of white rice adulterants in Lampung robusta coffee extract using FT-IR method," *Medical Sains: Jurnal Sains Medis*, 2024, doi: 10.37874/ms.v9i2.1254.
- [20] R. Julianti and C. Faradillah, "Development of the Rice Agricultural Marketing Subsystem: Solutions to Improve the Efficiency and Quality of Agricultural Products for Traditional Farmers," *Jurnal AgroSainTa*, 2025. [Online]. Available: <https://epublikasi.pertanian.go.id/berkala/index.php/ags/article/download/4053/3956>.
- [21] H. L. Dzahan, "Effect of post-harvest losses on profitability of rice (*Oryza sativa*) processors in Benue State, Nigeria," *Anjoro: International Journal of Agriculture and Business*, 2025, doi: 10.51244/IJRSI. 2025.12010065.
- [22] I. B. Alit and I. G. B. Susana, "Thermal Performance of LPG Stove as Heat Source of Rotary Dryer for Drying Corn for Small Farmers," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 2025, doi: 10.23960/jtep-l.v14i2.537-546.
- [23] Biksono, D., Nelwan, L.O., Sari, D.P., Yusriski, R., Hidayat, W. and Adanta, D., "Feasibility of Horizontal-Aligned Used Oil Drum as Simple Material for Drying Chamber in Heat Pump Dryer by Computational Fluid Dynamics Method," *ResearchGate Preprint*, 2024, doi: 10.37934/arnht.26.1.2233.
- [24] Rubi, R.V., Jajurie, M.A., Javier, K.A., Mesina, C.E., Pascual, M.A., Soriano, A. and Eguico, C., "A Comprehensive Review on Drying Kinetics of Common Corn (*Zea mays*) Crops in the Philippines," *Engineering Proceedings*, 2025, doi: 10.3390/engproc2025087084.
- [25] Delgado-Plaza, E., Quilambaqui, M., Peralta-Jaramillo, J., Apolo, H. and Velázquez-Martí, B., "Estimation of the energy consumption of the rice and corn drying process in the equatorial zone," *Applied Sciences*, 2020, doi: 10.3390/app10217497.
- [26] Tonda, R., Hendroko Setyobudi, R., Vincevica-Gaile, Z., Zalizar, L., Roeswitawati, D., Ekawati, I., Zekker, I., Burlakovs, J., Iswahyudi, I. and Rudovica, V., "Dried rice for alternative feed as a waste management product for sustainable bioeconomy in rice-producing countries," *Sustainability*, 2024, doi: 10.3390/su16135372.
- [27] Sjechlad, D.Z., Jamari, J. and Widyanto, "Auto-Stirring Grains Bed Dryer as an Innovative Efficiency Solution," *E3S Web of Conferences*, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201912513001.
- [28] Winarti, C., Widayanti, S.M., Setyawan, N., Suryana, E.A. and Widowati, S., "Nutrient composition of Indonesian specialty cereals: rice, corn, and sorghum as alternatives to combat malnutrition," *Preventive Nutrition and Food Science*, 2023, doi: 10.3746/pnf.2023.28.4.471.
- [29] Agustiani, N., Deng, N., Edreira, J.I.R., Girsang, S.S., Sitaresmi, T., Pasuquin, J.M., Agus, F. and Grassini, P., "Simulating rice and maize yield potential in the humid tropical environment of Indonesia," *European Journal of Agronomy*, 2018, doi: 10.1016/j.eja.2018.08.002.
- [30] Gummert, M., Cabardo, C., Quilloy, R., Aung, Y.L., Thant, A.M., Kyaw, M.A., Labios, R., Htwe, N.M. and Singleton, G.R., "Assessment of post-harvest losses and carbon footprint in intensive lowland rice production in Myanmar," *Scientific Reports*, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-76639-5.
- [31] A. Lingayat, R. Balijepalli, and V. P. Chandramohan, "Applications of solar energy based drying technologies in various industries – A review," *Solar Energy*, vol. 229, pp. 52-68, 2021/11/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.058>.

- [32] V. Chandramohan and P. Talukdar, "Estimation of equilibrium moisture content and drying time of potato through hot air drying," in *Fluid Mechanics and Fluid Power–Contemporary Research*: Springer, 2017, pp. 205-213, doi: https://doi.org/10.1007/978-81-322-2743-4_21.
- [33] C. Tunckal and İ. Doymaz, "Performance analysis and mathematical modelling of banana slices in a heat pump drying system," *Renewable Energy*, vol. 150, pp. 918-923, 2020/05/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.040>.
- [34] N.-n. An *et al.*, "Effect of different drying techniques on drying kinetics, nutritional components, antioxidant capacity, physical properties and microstructure of edamame," *Food Chemistry*, vol. 373, p. 131412, 2022/03/30/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131412>.
- [35] D. Kong, Y. Wang, M. Li, X. Liu, M. Huang, and X. Li, "Analysis of drying kinetics, energy and microstructural properties of turnips using a solar drying system," *Solar Energy*, vol. 230, pp. 721-731, 2021/12/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.073>.
- [36] F. Salehi, M. Kashaninejad, and A. Jafarianlari, "Drying kinetics and characteristics of combined infrared-vacuum drying of button mushroom slices," *Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 5, pp. 1751-1759, 2017/05/01 2017, doi: 10.1007/s00231-016-1931-1.
- [37] J. Jayakumar *et al.*, "Performance analysis of solar and heat pump dryer of small cardamom (*Elettaria Cardamomum Maton*) using energy analysis, drying kinetics, and quality," *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 1-15, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04177-x>.
- [38] A. Khampakool, S. Soisungwan, and S. H. Park, "Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture," *LWT*, vol. 99, pp. 355-363, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.081>.
- [39] E. A. Kosasih, A. Zikri, and M. I. Dzaky, "Effects of drying temperature, airflow, and cut segment on drying rate and activation energy of elephant cassava," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 19, p. 100633, 2020/06/01/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100633>.
- [40] C. Fiorentini, S. M. Demarchi, N. A. Quintero Ruiz, R. M. Torrez Irigoyen, and S. A. Giner, "Arrhenius activation energy for water diffusion during drying of tomato leathers: The concept of characteristic product temperature," *Biosystems Engineering*, vol. 132, pp. 39-46, 2015/04/01/ 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.02.004>.
- [41] T. Wang, "1 - An overview of IGCC systems," in *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technologies*, T. Wang and G. Stiegel Eds.: Woodhead Publishing, 2017, pp. 1-80, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100167-7.00001-9>.
- [42] M. B. Fauzi, E. A. Kosasih, and M. I. Dzaky, "Influence of drying condition on the drying constants and activation energy for robusta coffee using heat pump drying," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1372/1/012105>.
- [43] A. Fudholi, A. Ridwan, and R. Yendra, "Solar drying technology in Indonesia: An overview," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2018, doi: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v9.i4.pp1804-1813>.
- [44] Y. Gunawan, R. Rizky, and N. Putra, "Enhancing the performance of conventional coffee beans drying with low-temperature geothermal energy by applying HPHE: An experimental study," *Open Agriculture*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1515/opag-2021-0053>.
- [45] M. B. Fauzi, E. A. Kosasih, and M. I. Dzaky, "Effects of drying temperature and specific humidity on drying rate constant and activation energy of robusta coffee," *AIP Conference Proceedings*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0229900>.
- [46] N. Laily, S. P. Wijayanti, and M. A. Alfakar, "Improvement of bio-active compounds in wheat-based functional drink formula with green coffee extract containing chlorogenic acid," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1485/1/012007.
- [47] T. Hariyadi, M. Djali, and B. Nurhadi, "The Effect of Freeze Drying and Determination of Heat Transfer on Various Maturity Levels of Robusta Coffee Fruits," *International Journal of Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2022, doi: 10.18517/ijaseit.12.6.14705.
- [48] P. Ghosh and N. Venkatachalapathy, "Changes in physico-chemical properties of coffee due to hot air assisted microwave drying," *Lipids*, 2015, doi: 10.15740/HAS/IJPHT/6.1/69-79.
- [49] J. J. Flores-Prieto and D. Santizo-Díaz, "Thermo-economic comparative of open-greenhouse and sun-patio coffee drying in Chiapas, Mexico," *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, doi: 10.2139/ssrn.4979092.

- [50] A. P. Desvina, "Solar Drying Technology in Indonesia: an Overview," *UIN Suska Repository*, 2023. [Online]. Available: <http://repository.uin-suska.ac.id/70024/1/SOLAR%20DRYING.pdf>.
- [51] S. Al-Ghamdi, B. Alfaifi, W. Elamin, and M. A. Lateef, "Advancements in coffee manufacturing: From dehydration techniques to quality control," *Food Engineering Reviews*, 2024, doi: 10.1007/s12393-024-09383-5.
- [52] Biksono, D., Nelwan, L.O., Sari, D.P., Yusriski, R., Hidayat, W. and Adanta, D., "Feasibility of Low-Cost Heat Pump Dryer Designs for Rural Grain Farmers," *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2024, doi: 10.37934/arnht.26.1.2233.
- [53] I. B. Alit and I. G. B. Susana, "Thermal Performance of LPG Stove as Heat Source of Rotary Dryer for Small Farmers," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 2025, doi: 10.23960/jtep-l.v14i2.537-546.
- [54] Nath, B., Chen, G., O'Sullivan, C.M. and Zare, D., "Research and technologies to reduce grain postharvest losses: a review," *Foods*, 2024, doi: 10.3390/foods13121875.
- [55] Nguyen-Van-Hung, Tran-Van-Tuan, Meas, P., Tado, C.J.M., Kyaw, M.A. and Gummert, M., "Best practices for paddy drying: case studies in Vietnam, Cambodia, Philippines, and Myanmar," *Plant Production Science*, 2019, doi: 10.1080/1343943X.2018.1543547.
- [56] A. R. Bin Rahman and J. Zhang, "Trends in rice research: 2030 and beyond," *Food and Energy Security*, 2023, doi: 10.1002/fes3.390.
- [57] Sutardi, C., Apriyana, Y., Rejekiningrum, P., Alifia, A.D., Ramadhani, F., Darwis, V., Setyowati, N., Setyono, D.E.D., Gunawan, Malik, A. and Abdullah, S., "The transformation of rice crop technology in Indonesia: Innovation and sustainable food security," *Agronomy*, 2022, doi: 10.3390/agronomy13010001.
- [58] Enriquez, Y., Yadav, S., Evangelista, G.K., Villanueva, D., Burac, M.A. and Pede, V., "Disentangling challenges to scaling alternate wetting and drying technology for rice cultivation: lessons from the Philippines," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, doi: 10.3389/fsufs.2021.675818.
- [59] H. Sarfaraz, "Rice production, quality, and nutrition: a comprehensive review on challenges and opportunities," *International Journal of Agriculture and Sustainable Development*, 2023. [Online]. Available: <https://journal.xdgen.com/index.php/ijas/article/download/199/215>.
- [60] Alvito, P., Barcelo, J., De Meester, J., Rito, E. and Suman, M., "Mitigation of mycotoxins during food processing: sharing experience among Europe and Southeast Asia," *Science & Technology Journal*, 2021, doi: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.06.004.en.
- [61] M. Rahman and M. A. Sombilla, "Toward a new approach and expanded cooperation in agricultural research and development in developing East Asia," *ERIA Report*, 2021. [Online]. Available: <https://www.eria.org/Chapter%2015%20Special%20Topic%205.pdf>.
- [62] A. G. Laborte, K. de Bie, E. M. A. Smaling, P. F. Moya, A. A. Boling, and M. K. Van Ittersum, "Rice yields and yield gaps in Southeast Asia: Past trends and future outlook," *European Journal of Agronomy*, vol. 36, no. 1, pp. 9-20, 2012/01/01/ 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2011.08.005>.