

ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF RICE FARMING IN EAST JAVA

Rizky Zulkarnain*¹ ¹Direktorat Neraca Produksi, Badan Pusat Statistik, Jakarta, Indonesia**ABSTRACT**

Sustainable agriculture is not only global agenda, but also becomes national and regional agenda. Rice farming is a key factor of national food security, where East Java province has a vital role as the largest rice producer in Indonesia. Unfortunately, excessive practices in agriculture lead to detrimental impact on environment, such as greenhouse gas (GHG) emissions, land degradation and water pollution (eutrophication). This study aims to measure environmental efficiency of rice farming in East Java and also to analyze its determinants. This study employs stochastic frontier model to measure environmental efficiency as well as to examine the effects of various factors. The results shows that environmental efficiency of rice farming in East Java is generally low, with average score 0.463. This result suggests that there is opportunity to enhance environmental efficiency of rice farming in East Java by 53.7%. The low environmental efficiency is influenced by the low labor quality (education and managerial quality), low technology adoption, physical environment, and institutional environment (land ownership, counseling, credit access, social network). Based on this study, various policy interventions can be implemented to improve environmental efficiency.

Keywords: Eco-efficiency, Food Security, Stochastic Frontier, Sustainability

RIWAYAT ARTIKEL

Tanggal Masuk:
4 Agustus 2023
Tanggal Revisi:
10 Februari 2025
Tanggal Diterima:
22 Februari 2025
Tersedia Online:
30 September 2025

*Korespondensi:
Rizky Zulkarnain
E-mail: zulqarnaen@bps.go.id

ABSTRAK

Pertanian yang berkelanjutan tidak hanya menjadi agenda global, tetapi juga menjadi agenda nasional dan regional. Pertanian padi menjadi faktor kunci dalam ketahanan pangan, dimana Provinsi Jawa Timur berperan penting sebagai produsen padi terbesar di Indonesia. Sayangnya, praktik pertanian yang eksekutif menimbulkan risiko bagi lingkungan, seperti peningkatan gas rumah kaca, degradasi lahan dan polusi air (eutrofikasi). Penelitian ini bertujuan untuk mengukur efisiensi lingkungan dari pertanian padi di Jawa Timur dan menganalisis determinannya. Penelitian ini menggunakan model stochastic frontier untuk mengukur efisiensi lingkungan sekaligus menguji pengaruh dari berbagai faktor. Hasil penghitungan menunjukkan bahwa efisiensi lingkungan dari pertanian padi di Jawa Timur masih rendah, dengan rata-rata skor 0,463. Terdapat peluang sebesar 53,7% untuk meningkatkan efisiensi lingkungan pertanian padi di Jawa Timur. Rendahnya efisiensi lingkungan tersebut disebabkan oleh rendahnya kualitas tenaga kerja seperti pendidikan dan kemampuan manajerial petani, adopsi teknologi yang minim, lingkungan fisik, dan lingkungan institusi (kepemilikan lahan, penyuluhan/bimbingan, akses kredit dan jaringan sosial). Berdasarkan hasil studi ini, berbagai intervensi kebijakan dapat diterapkan untuk meningkatkan efisiensi lingkungan pertanian padi di Jawa Timur.

Kata Kunci: Eko-efisiensi, Ketahanan Pangan, Stochastic Frontier, Keberlanjutan

JEL : C130; Q100; Q510

East Java Economic Journal, p-ISSN: 2597-8780, e-ISSN: 2830-2001, DOI:10.53572/ejavec.v9i2.111, Open access under a Creative Commons

Attribution- 4.0 International Public License (CC - BY 4.0)



published by Kantor Perwakilan Bank Indonesia Provinsi Jawa Timur in Collaboration with Faculty of Economics and Business, Universitas Airlangga

Pendahuluan

Pertanian merupakan salah satu sektor yang esensial bagi perekonomian Indonesia, yang menyumbang sebesar 13,28% Produk Domestik Bruto (PDB) dan 28,33% tenaga kerja nasional. Pertanian juga menjadi salah satu penyangga (*buffer*) pertumbuhan ekonomi Indonesia di masa pandemi karena mampu tumbuh positif di tengah-tengah kontraksi perekonomian nasional (BPS, 2022). Sebagian besar masyarakat Indonesia bergantung pada hasil pertanian, khususnya tanaman pangan sebagai sumber makanan utama, menjadikan beras sebagai produk strategis sekaligus faktor kunci ketahanan pangan nasional. Sektor pertanian yang berkelanjutan sangat berperan dalam pencapaian target ke-2 *Sustainable Development Goals* (SDGs), yaitu menghilangkan kelaparan (*zero hunger*).

Provinsi Jawa Timur memainkan peran penting dalam produksi pangan nasional. Sebagai produsen terbesar, Jawa Timur berkontribusi sebesar 17,40% terhadap produksi padi di Indonesia pada tahun 2022. Porsi tersebut setara dengan 9,53 juta ton Gabah Kering Giling (GKG) atau setara dengan 5,50 juta ton beras. Hal tersebut didukung oleh luas panen sebesar 1,69 juta hektar atau sekitar 16,20% luas panen nasional (BPS, 2023). Dalam visi misi pemerintah Provinsi Jawa Timur yang tertuang dalam Bhakti ke-6 “Nawa Bhakti Satya”, pemerintah Provinsi Jawa Timur bertekad memajukan sektor pertanian untuk mewujudkan kesejahteraan petani. Dengan demikian, pembangunan pertanian dan kemandirian pangan menjadi salah satu agenda prioritas pemerintah Provinsi Jawa Timur.

Pertumbuhan populasi yang tidak diiringi dengan perluasan lahan pertanian mendorong pemerintah untuk mencari alternatif agar produktivitas pertanian meningkat. Usaha peningkatan produktivitas tersebut dilakukan melalui berbagai cara, misalnya melalui perbaikan sistem budidaya dan teknik tanam, penggunaan bibit unggul, penggunaan teknologi pertanian, penyuluhan, pengendalian hama terpadu, dan penggunaan pupuk kimia. Sebagian besar petani memilih untuk menggunakan pupuk kimia karena relatif mudah digunakan dan memberikan hasil yang lebih banyak (Hirel dkk., 2011; Wang dkk., 2018). Pupuk kimia telah menjadi kebutuhan dasar bagi sistem pertanian saat ini. *Output* pertanian meningkat sebesar 40-60% akibat penggunaan pupuk kimia (Bibi dkk., 2020). Erisman dkk. (2008) menyatakan bahwa tanpa penggunaan pupuk kimia hasil pertanian hanya dapat mencukupi kebutuhan makanan bagi separuh populasi dunia. Di Indonesia, sekitar 99,87% usaha tani padi sawah menggunakan pupuk kimia. Usaha tani padi sawah menggunakan sekitar 109,71 kg pupuk Urea dan 59,66 kg pupuk NPK untuk setiap hektar lahan yang digunakan (BPS, 2017).

Meskipun pupuk kimia berperan penting dalam meningkatkan produksi dan menjamin ketahanan pangan, penggunaannya yang berlebihan dapat menimbulkan risiko bagi lingkungan. Berbagai literatur menunjukkan bahwa penggunaan pupuk kimia di pertanian belum efisien. Tilman dkk. (2002) mengatakan bahwa selama 40 tahun jumlah pupuk kimia yang digunakan di pertanian tanaman pangan meningkat 7,4 kali lipat, sedangkan hasil produksinya hanya meningkat 2,4 kali lipat. Lebih lanjut, Ladha dkk. (2005) mengungkapkan bahwa lebih dari 50% pupuk kimia yang digunakan tidak terserap oleh tanaman. Akibatnya, sisa pupuk kimia yang cukup banyak terbuang ke lingkungan. Hal ini dapat menimbulkan dampak merugikan bagi lingkungan, seperti degradasi lahan (Lin dkk., 2019), kontaminasi air tanah (Hashimoto dkk., 2007), eutrofikasi (Aczel, 2019), emisi amonia (Misselbrook dkk., 2000), dan peningkatan gas rumah kaca (Menegat dkk., 2022). *International Fertilizer Association* (IFA) melaporkan bahwa pertanian menyumbang sekitar 11-15% emisi gas rumah kaca.

Konsep pembangunan yang berkelanjutan menjadi perhatian berbagai negara dalam beberapa tahun terakhir. Pembangunan ekonomi yang berkelanjutan berimplikasi bahwa manfaat ekonomi dicapai dengan tetap memperhatikan kelestarian lingkungan. Tujuan ke-2 SDGs mendorong peningkatan pertanian yang berkelanjutan. Dengan demikian, diperlukan usaha peningkatan efisiensi lingkungan dalam produksi padi di Indonesia, khususnya di Provinsi Jawa Timur. Namun, studi tentang efisiensi lingkungan usaha tani padi di Jawa Timur masih minim dilakukan. Beberapa peneliti mengkaji efisiensi lingkungan, namun untuk sektor

manufaktur di Jawa Timur (Jamil dkk., 2023; Septiriana & Kusumawardani, 2016). Sedangkan, penelitian lainnya lebih fokus ke efisiensi teknis dari usaha tani padi, bukan efisiensi lingkungannya (Sholikah & Kadarmanto, 2020; Zulkarnain dkk., 2021).

Terdapat dua permasalahan yang ingin dijawab dalam penelitian ini. Isu pertama adalah seberapa tinggi tingkat efisiensi lingkungan pertanian padi di Jawa Timur. Kedua, faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi tingkat efisiensi lingkungan tersebut. Sehingga, penelitian ini bertujuan untuk mengukur efisiensi lingkungan usaha tani padi di Jawa Timur dengan menggunakan model *stochastic frontier*. Pupuk kimia dianggap sebagai input yang berdampak merugikan terhadap lingkungan (*environmentally detrimental input*). Dengan demikian, penelitian ini dapat menghitung seberapa besar pupuk kimia dapat dikurangi tanpa menurunkan produksi yang dihasilkan. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis variabel-variabel yang berpengaruh terhadap efisiensi lingkungan usaha tani padi di Jawa Timur. Hal ini berguna dalam penentuan intervensi kebijakan yang tepat untuk meningkatkan efisiensi lingkungan.

Telaah Literatur

Fungsi Produksi

Proses produksi menggambarkan proses transformasi input (bahan baku, tenaga kerja dan modal) menjadi *output*. Fungsi produksi merupakan gambaran matematis dari teknologi yang mentransformasi input menjadi *output* tersebut. Dengan kata lain, fungsi produksi adalah kuantitas maksimum *output* yang dapat dihasilkan dari sejumlah input (Ray & Kumbhakar, 2015). Terdapat dua jenis fungsi produksi teoritis yang sering digunakan, yaitu Cobb-Douglas (CD) dan *Transcendental Logarithmic* (Translog). Spesifikasi dari masing-masing fungsi produksi tersebut adalah sebagai berikut:

Fungsi produksi Cobb-Douglas (CD):

$$\ln Y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^k \alpha_j \ln X_{ij} \quad (1)$$

Fungsi produksi *Transcendental Logarithmic* (Translog):

$$\ln Y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^k \alpha_j \ln X_{ij} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k \alpha_{jj} (\ln X_{ij})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{l>j}^k \alpha_{jl} (\ln X_{ij}) (\ln X_{il}) \quad (2)$$

dimana Y_i adalah output dari unit produksi ke- i , X_{ij} adalah input ke- j dari unit produksi ke- i , k adalah banyaknya input, α_j dan α_{jl} adalah koefisien fungsi produksi.

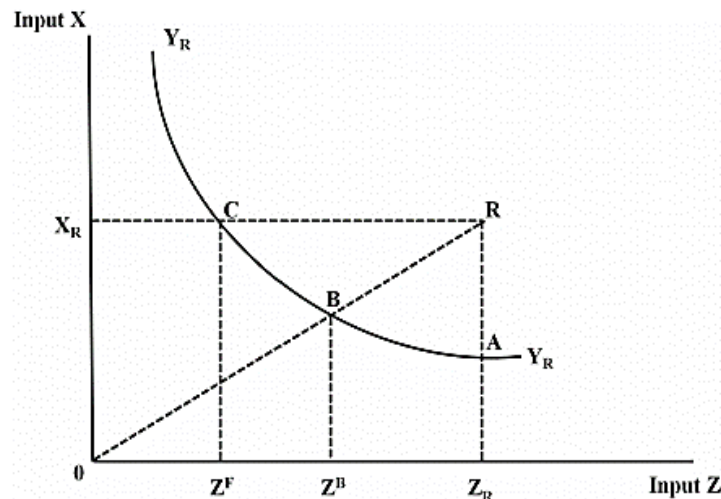
Fungsi produksi translog dapat dipandang sebagai perluasan dari fungsi produksi Cobb-Douglas dengan memasukkan efek kuadratik dan efek interaksi antar input. Dengan demikian, jika efek kuadratik dan efek interaksi tidak signifikan maka fungsi produksi Cobb-Douglas cocok digunakan. Sebaliknya, jika efek kuadratik dan efek interaksi signifikan maka fungsi produksi translog cocok digunakan. Uji *Likelihood Ratio* (LR) dapat digunakan untuk menentukan fungsi produksi mana yang lebih baik, yaitu sebagai berikut (Liu dkk., 2019):

$$LR = 2(l_{TR} - l_{CD}) \sim X_p^2 \quad (3)$$

dimana LR adalah statistik *log-likelihood ratio* berdistribusi *chi-square*, l_{TR} adalah *log-likelihood* dari fungsi produksi Translog, l_{CD} adalah *log-likelihood* dari fungsi produksi Cobb-Douglas, dan p adalah jumlah komponen kuadratik dan interaksi antar input. Jika nilai statistik lebih besar daripada *chi-square* tabel maka fungsi produksi Translog cocok digunakan. Sebaliknya, jika nilai statistik lebih kecil daripada *chi-square* tabel maka fungsi produksi Cobb-Douglas cocok digunakan (Liu dkk., 2019).

Efisiensi Lingkungan

Efisiensi lingkungan didefinisikan sebagai kemampuan suatu unit produksi untuk mengurangi input yang merusak lingkungan (*environmentally detrimental input*) tanpa mengubah level output dan input lainnya (Bibi dkk., 2020). Efisiensi lingkungan dapat diukur berdasarkan orientasi input, yaitu seberapa besar input yang merusak lingkungan dapat dikurangi tanpa menurunkan produksi yang dihasilkan. Dengan demikian, input *detrimental* digunakan secukupnya, karena penggunaan input *detrimental* yang eksekif hanya menghasilkan residu yang pada gilirannya dapat merusak lingkungan.



Gambar 1: Ilustrasi Efisiensi Lingkungan

Sumber: Bibi dkk. (2020)

Ilustrasi dari efisiensi lingkungan disajikan pada Gambar 1. Misalkan, terdapat satu input konvensional (X) dan satu input yang merusak lingkungan (Z). *Frontier* produksi adalah sebesar Y_R , yaitu fungsi produksi maksimum (*best practice*) yang dapat dicapai oleh unit produksi jika beroperasi secara efisien. Perhatikan bahwa, unit produksi R menggunakan input konvensional sebesar X_R dan input yang merusak lingkungan sebesar Z_R . Unit produksi R tidak berada pada *frontier* produksi, sehingga mengindikasikan bahwa unit produksi tersebut belum beroperasi secara efisien. Untuk mencapai *frontier* produksi dengan input konvensional (X) dan output yang tetap, unit produksi R harus mengurangi penggunaan input yang merusak lingkungan (Z) dari Z_R menjadi Z^F . Dengan demikian, efisiensi lingkungan untuk R adalah $|OZ^F|/|OZ_R|$.

Berbagai penelitian dilakukan untuk mengukur efisiensi lingkungan. Dua metode yang populer digunakan adalah *Data Envelopment Analysis* (DEA) dan *Stochastic Frontier Analysis* (SFA). Nguyen dkk. (2012) mengukur efisiensi biaya dan efisiensi lingkungan pertanian padi di Korea Selatan menggunakan metode DEA. Input yang digunakan diantaranya lahan, tenaga kerja, pupuk dan derajat eutrofikasi. Rata-rata efisiensi lingkungan yang dihasilkan adalah sebesar 0,396. Saelee (2017) menganalisis efisiensi lingkungan dari pertanian padi di Thailand menggunakan metode DEA. Saelee (2017) menghitung surplus nitrogen dan surplus fosfor dalam sistem pertanian padi di Thailand. Temuan dari penelitian tersebut adalah pertanian padi di Thailand memiliki surplus nitrogen sebesar 20,1 hingga 50,7 kg/ha dan surplus fosfor sebesar 11,0 hingga 28,7 kg/ha yang dilepaskan ke lingkungan. Metode DEA juga digunakan oleh Wang dkk. (2013) dan Wu dkk. (2014). Wang dkk. (2013) menggunakan *meta-frontier* DEA untuk menghitung efisiensi energi di China. Temuan penelitiannya adalah terdapat heterogenitas efisiensi energi di China. Sebagian besar provinsi di bagian timur China memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan provinsi di bagian barat China. Sedangkan, Wu dkk. (2014) menghitung efisiensi lingkungan industri di China berdasarkan *undesirable output* yaitu emisi polutan nitrogen dioksida. Wu dkk. (2014) menemukan bahwa

rata-rata efisiensi lingkungan di China adalah 0,809, yang berarti bahwa efisiensi lingkungan di China masih bisa ditingkatkan dengan cara mengurangi polutan nitrogen dioksida hingga 19,1%.

Beberapa peneliti memilih untuk menggunakan teknik SFA dalam mengukur efisiensi lingkungan. [Tu dkk. \(2018\)](#) menggunakan SFA untuk menghitung efisiensi lingkungan pertanian padi di delta Mekong Vietnam. Rata-rata efisiensi lingkungan yang dihasilkan adalah sebesar 22,58%, dimana metode padi terapung menghasilkan efisiensi lingkungan yang paling tinggi di antara metode lainnya. [Tu dkk. \(2018\)](#) menggunakan pupuk, pestisida dan BBM sebagai input yang merusak lingkungan. Selanjutnya, [Bibi dkk. \(2020\)](#) menggunakan SFA untuk mengukur efisiensi lingkungan sektor pertanian di Asia Selatan. Data yang digunakan adalah data panel periode 2002-2016. [Bibi dkk. \(2020\)](#) menggunakan pupuk kimia sebagai input detrimental. Temuannya, rata-rata efisiensi lingkungan sektor pertanian di Asia Selatan adalah sebesar 0,77, dengan nilai minimum sebesar 0,57 dan nilai maksimum sebesar 0,97. Efisiensi lingkungan tertinggi dihasilkan oleh Sri Lanka, sedangkan efisiensi lingkungan terendah dihasilkan oleh Nepal. Di Indonesia, teknik SFA untuk penghitungan efisiensi lingkungan pernah digunakan oleh [Mariyono dkk. \(2010\)](#) dan [Defidelwina dkk. \(2019\)](#). Penelitian [Mariyono dkk. \(2010\)](#) menemukan bahwa efisiensi lingkungan dari pertanian padi di Indonesia masih rendah akibat penggunaan input kimia yang berlebihan. Selain itu, pertanian padi di Jawa cenderung lebih efisien dibandingkan pertanian padi di luar Jawa. [Defidelwina dkk. \(2019\)](#) meneliti efisiensi lingkungan usaha tani padi sawah di Kabupaten Rokan Hulu, provinsi Riau. Hasil penelitian [Defidelwina dkk. \(2019\)](#) menunjukkan bahwa rata-rata efisiensi lingkungan padi sawah di Kabupaten Rokan Hulu adalah sebesar 23,7%. Hal ini disebabkan oleh penggunaan pupuk nitrogen yang ekssesif.

Pupuk Kimia sebagai Input Detrimental

Sebagian besar pupuk kimia mengandung unsur nitrogen (N), fosfor (P) dan kalium (K), yang memungkinkan tanaman tumbuh lebih besar, lebih cepat dan berproduksi lebih banyak. Nitrogen merupakan nutrisi penting untuk pertumbuhan seluruh makhluk hidup. Nitrogen menjadi komponen kunci bagi protein dan asam amino esensial tertentu, serta vitamin dan DNA. Jenis pupuk kimia yang paling banyak digunakan di Indonesia adalah Urea dan NPK, yaitu sekitar 109,7-118,5 kg/ha untuk Urea dan 59,6-63,3 kg/ha untuk NPK ([BPS, 2017](#)). Urea memiliki kandungan nitrogen yang lebih banyak daripada NPK, yaitu sekitar 45-46%. Secara alamiah, tanaman dapat memperoleh nitrogen dari tanah, dimana nitrogen dalam tanah dapat terbentuk dari proses fiksasi nitrogen biologis, erupsi gunung berapi, ataupun melalui petir yang memecah gas nitrogen di udara dan menghantarkannya sampai ke tanah ([Erisman dkk., 2015](#)). Namun, ketersediaan nitrogen dalam tanah bersifat terbatas, sehingga tidak dapat sepenuhnya diandalkan untuk mendukung produktivitas yang tinggi. Petani memperoleh tambahan nitrogen untuk tanaman dari penggunaan pupuk, terutama pupuk kimia. Saat ini, penggunaan pupuk kimia yang mengandung nitrogen sangat esensial bagi petani. Menurut [Erisman dkk. \(2008\)](#), penggunaan pupuk nitrogen berperan dalam menghasilkan makanan untuk 48% populasi dunia. Artinya, kita hanya mampu menghasilkan cukup makanan untuk separuh populasi dunia tanpa menggunakan pupuk nitrogen. Sayangnya, berbagai literatur menunjukkan bahwa penggunaan pupuk nitrogen di pertanian masih berlebihan. [Hirel dkk. \(2011\)](#) menyatakan bahwa sekitar 50% hingga 75% nitrogen yang diberikan ke tanah tidak digunakan oleh tanaman dan hanya terbuang ke lingkungan. Hal ini menimbulkan dampak merugikan bagi lingkungan, seperti degradasi tanah, emisi gas rumah kaca, dan polusi air ([Guo dkk., 2021](#)).

Pupuk kimia yang digunakan secara terus-menerus dapat meningkatkan keasaman tanah ([Guo dkk., 2010](#); [Li dkk., 2013](#)). Asam dalam tanah dapat menyebabkan tanah kehilangan porositas dan menjadi keras. Peningkatan keasaman tanah juga dapat mengganggu kehidupan mikroorganisme yang dibutuhkan oleh tanah, seperti bakteri pengikat nitrogen ([Hossain dkk., 2022](#)). Akibatnya, kesuburan tanah berkurang dan kualitas tanah terdegradasi. Nitrogen dan

fosfor dari pupuk kimia yang tidak terserap oleh tanaman dapat larut atau mengalir dari tanah ke sumber air bawah tanah. Kelebihan nitrogen dan fosfor tersebut juga dapat memasuki sistem akuatik sebagai limpasan di atas tanah dan menyebabkan eutrofikasi (Hashimoto dkk., 2007; Saelee, 2017). Eutrofikasi adalah proses perkembangbiakan tumbuhan air dengan cepat karena memperoleh zat makanan yang berlimpah akibat pemupukan yang berlebihan. Eutrofikasi memicu pertumbuhan fitoplankton (tumbuhan mikroskopis yang hidup melayang atau mengapung di atas air dan memiliki gerak yang terbatas). Fitoplankton dapat menutup cahaya matahari dan mengganggu proses fotosintesis bagi tumbuhan di bawah air. Ketika fitoplankton mati, mikroba di dalam air menguraikannya, dimana proses penguraian tersebut dapat mengurangi kadar oksigen di dalam air. Akibatnya, kehidupan organisme akuatik yang lebih besar seperti ikan menjadi terganggu dan menciptakan zona mati (Aczel, 2019). Penggunaan pupuk kimia yang ekseisif juga berdampak pada peningkatan emisi gas rumah kaca (Li dkk., 2013). Pertanian berkontribusi sekitar 11-15% terhadap keseluruhan emisi gas rumah kaca (Tho & Umetsu, 2022). Beberapa mikroorganisme tanah dapat mengubah nitrogen yang berasal dari pupuk kimia menjadi gas rumah kaca, seperti dinitrogen oksida (N_2O). Nitrogen oksida memiliki potensi pemanasan 300 kali lebih besar daripada karbon dioksida (Sedlacek dkk., 2020).

Beberapa peneliti menggunakan pupuk kimia sebagai input *detrimental* dalam menghitung efisiensi lingkungan di bidang pertanian. Kiatpathomchai (2008) dan Abedullah dkk. (2010) menggunakan pupuk nitrogen sebagai input *detrimental*. Le dkk. (2019) dan Bibi (2020) menggunakan konsumsi pupuk nitrogen (N), kalium karbonat (K_2O), dan fosfat (P_2O_5) sebagai input *detrimental*. Sedangkan, Mariyono dkk. (2010) menggunakan pupuk urea, Triple Super Phosphate (TSP), amonium sulfat (ZA), dan potasium klorida (KCl) sebagai input *detrimental*.

Determinan Efisiensi Lingkungan

Efisiensi lingkungan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu kualitas tenaga kerja, adopsi teknologi, lingkungan fisik dan lingkungan institusi (Reinhard dkk., 2002). Kualitas tenaga kerja mencerminkan kemampuan manajerial. Rougoor dkk. (1998) menjelaskan bahwa karakteristik personal yang menentukan kualitas manajerial dibagi menjadi tiga, yaitu: (1) dorongan dan motivasi; (2) kemampuan dan kapasitas; serta (3) latar belakang dan pengalaman. Beberapa penelitian menggunakan pendapatan di luar pertanian (*off-farm income*) sebagai proksi untuk motivasi (Abebe, 2014; Reinhard dkk., 2002; Xie & Huang, 2021). Namun, karena keterbatasan data penelitian ini tidak memperhitungkan variabel motivasi. Sebagai gantinya, penelitian ini memasukkan variabel efisiensi teknis untuk mencerminkan kemampuan manajerial. Menurut Mariyono dkk. (2010), petani yang dapat menggunakan input konvensional secara efisien, juga dapat memanfaatkan input kimia secara efisien. Hal senada diungkapkan oleh Nguyen dkk. (2012), yang menemukan bahwa peningkatan efisiensi teknis berdampak pada penurunan biaya produksi dan efisiensi lingkungan yang semakin baik.

Dalam dunia yang semakin kompleks dan penuh ketidakpastian, pendidikan dapat menjadi pembeda bagi individu untuk berhasil atau gagal dalam menghadapi tantangan (OECD, 2018). Pendidikan merupakan sarana penting untuk mempromosikan nilai-nilai keberlanjutan dan untuk melawan degradasi lingkungan. Seseorang yang lebih terdidik memiliki kemampuan yang lebih baik untuk memahami isu lingkungan (Dinca dkk., 2022). Kualitas tenaga kerja juga ditentukan oleh pengalaman. Semakin bertambah umur dan pengalaman petani, semakin meningkat kemampuan manajerial yang dimiliki oleh petani tersebut (Tauer, 1995). Dalam penelitian ini, tingkat pendidikan petani merepresentasikan kemampuan dan kapasitas. Sedangkan, umur petani merupakan proksi untuk pengalaman.

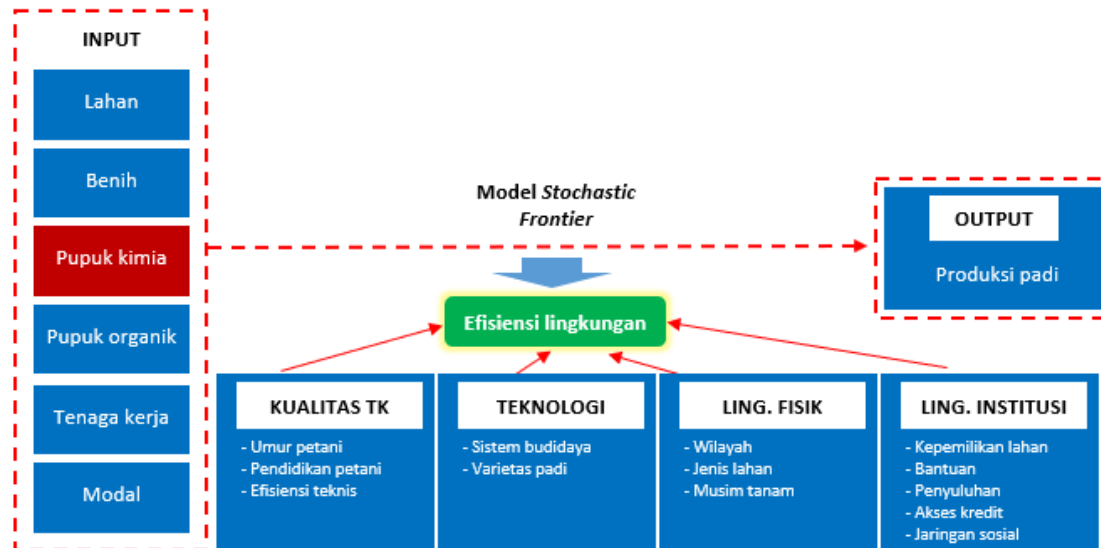
Petani memerlukan teknologi yang tepat untuk menjamin bahwa mereka dapat menghasilkan produksi yang tinggi sembari menjaga kelestarian lingkungan. Teknologi pertanian merupakan konsep yang luas, yang mencakup alat/perlengkapan, material genetik, teknik pertanian, dan input-input pertanian yang telah dikembangkan untuk

meningkatkan efektivitas pertanian (Ruzzante dkk., 2021). Selanjutnya, Ruzzante dkk. (2021) mengklasifikasikan teknologi pertanian menjadi empat kelompok besar, yaitu: (1) manajemen sumber daya alam; (2) pengembangan varietas; (3) input kimia; serta (4) mekanisasi dan infrastruktur. Salah satu sistem budidaya padi yang diklaim mampu memberikan manfaat terhadap lingkungan adalah *System of Rice Intensification* (SRI). Teknik SRI ditemukan oleh Laulanie (1993) dengan beberapa prinsip dasar, yaitu: (1) transplantasi bibit muda (8-12 hari); (2) penanaman bibit secara cepat dan hati-hati, dengan ruang tanam yang cukup luas (25 cm x 25 cm atau lebih); (3) penggunaan air yang tidak berlebihan; dan (4) penggunaan pupuk organik. Teknik SRI dapat meningkatkan hasil produksi lebih dari 60%, namun mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 40% (Gathorne-Hardy dkk., 2016). Di samping itu, penggunaan pupuk organik pada metode SRI dapat meningkatkan struktur dan kesuburan tanah (Iswandi dkk., 2011). Intensifikasi tanaman padi dapat pula dilakukan melalui pendekatan Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT). Pada dasarnya, teknologi yang diterapkan oleh PTT sama dengan SRI, namun strateginya berbeda (BPTP Sumatera Utara, 2013). Perbedaan antara SRI dan PTT misalnya pada dosis pupuk anjuran, jarak tanam dan pengairan. SRI menggunakan pupuk organik, sementara PTT menggunakan kombinasi pupuk organik dan anorganik sesuai kebutuhan. Selanjutnya, pada teknik SRI jarak tanamnya adalah 25 cm x 25 cm atau lebih lebar, sedangkan PTT menggunakan jarak tanam sesuai kondisi lokasi (VUB/VUTB 20 cm x 20 cm, VUH 25 cm x 25 cm, atau Legowo 2:1). Pada pengairan, SRI mempertahankan tanah lembab hingga retak-retak selama vegetatif, sedangkan PTT menggunakan pengairan berselang. Inovasi PTT dapat mendorong penggunaan pupuk yang lebih efisien (Rosadillah dkk., 2017). Pemilihan varietas padi juga berpengaruh terhadap efisiensi lingkungan. Varietas padi tertentu lebih efisien dalam menggunakan nitrogen dibandingkan dengan varietas lainnya (Hanh dkk., 2018; Tho & Umetsu, 2022). Penelitian dari Myrteza (2012) menemukan bahwa varietas padi hibrida menghasilkan emisi gas rumah kaca yang lebih kecil dibandingkan dengan padi lainnya karena padi hibrida memiliki siklus hidup yang lebih pendek dan produksi yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, sistem budidaya padi dan varietas padi dimasukkan sebagai variabel yang merepresentasikan adopsi teknologi.

Lingkungan fisik terdiri atas faktor-faktor fisik eksogen yang berhubungan dengan lokasi lahan. Faktor-faktor fisik tersebut tidak dapat dimanipulasi dengan mudah oleh petani, seperti kualitas tanah, suhu, cahaya matahari, air, dan sebagainya (Reinhard dkk., 2002). Penelitian ini menggunakan *dummy* wilayah untuk mencerminkan perbedaan radiasi matahari, ketersediaan air, infrastruktur, dan sebagainya. Disamping itu, penelitian ini juga menambahkan jenis lahan dan musim tanam untuk mencerminkan lingkungan fisik. Secara fisiografi, wilayah Jawa Timur dapat dibagi menjadi tiga zona, yaitu zona utara (lipatan), zona tengah (gunung berapi) dan zona selatan (plato). Daerah-daerah di sekitar gunung berapi biasanya memiliki tanah yang subur karena mengandung banyak mineral yang dibutuhkan bagi pertumbuhan tanaman.

Lingkungan institusi juga menjadi faktor yang berdampak pada efisiensi lingkungan (Reinhard dkk., 2002). Dalam penelitian ini, lingkungan institusi dicerminkan oleh kepemilikan lahan, bantuan/hibah/subsidi, penyuluhan/bimbingan, akses kredit dan jaringan sosial. Kepemilikan properti merupakan elemen dari lingkungan institusi (Williamson, 1998). Sedangkan, bantuan/hibah/subsidi dan penyuluhan/bimbingan mencerminkan peran pemerintah. Petani yang mengusahakan lahan milik sendiri cenderung menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan petani yang mengusahakan lahan milik orang lain karena petani yang menggunakan lahan milik sendiri lebih berhati-hati dalam mengelola lahannya demi menjaga keberlanjutan usaha tani yang dilakukan (Defidelwina dkk., 2019). Dukungan pemerintah dalam bentuk subsidi dapat menjadi insentif bagi petani untuk menerapkan perilaku ramah lingkungan (Varela-Candamio dkk., 2018). Subsidi pupuk organik dapat mendorong petani untuk menggunakan pupuk organik (Wang dkk., 2018). Namun, subsidi juga bisa berpengaruh negatif. Subsidi dapat meningkatkan risiko lingkungan melalui peningkatan input pupuk kimia (Scholz & Geissler, 2018). Selanjutnya, penyuluhan/bimbingan berperan dalam meningkatkan kepercayaan dan motivasi bagi petani untuk

terlibat dalam usaha pertanian yang berkelanjutan (Mousaei, 2021). Sedangkan, akses kredit berpengaruh terhadap keputusan petani untuk mengadopsi teknologi pertanian yang berkelanjutan (OECD, 2001). Komponen terakhir lingkungan institusi dalam penelitian adalah jaringan sosial. Petani yang menjadi anggota kelompok tani cenderung menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan petani yang tidak mengikuti kelompok tani. Petani yang berpartisipasi dalam keanggotaan kelompok tani memiliki lebih banyak akses informasi tentang efektivitas usaha tani dan teknologi baru (Tu dkk., 2018). Kerangka pikir dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2: Kerangka Pikir Penelitian

Metode Penelitian

Data dan Variabel

Tabel 1: Variabel Input dan Output

No.	Input/output	Label	Deskripsi	Satuan
1	Output	Y	Kuantitas produksi	Kg
2	Input konvensional	X_1	Lahan	
3	Input konvensional	X_2	Benih	Kg
4	Input yang merusak lingkungan	Z	Pupuk kimia	Kg
5	Input konvensional	X_3	Pupuk organik	Kg
6	Input konvensional	X_4	Tenaga kerja	Orang-jam
7	Input konvensional	X_5	Modal	Ribu rupiah

Data untuk penelitian ini bersumber dari survei Struktur Ongkos Usaha Tanaman Padi (SOUT-SPD) yang dilaksanakan oleh Badan Pusat Statistik (BPS). Jumlah sampel yang digunakan adalah sebanyak 14815 observasi, yang tersebar di seluruh kabupaten/kota di Jawa Timur. Variabel yang digunakan dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama adalah variabel input dan *output*, yang digunakan untuk membentuk model produksi padi. Sedangkan, bagian kedua adalah variabel penjelas yang diduga berpengaruh terhadap efisiensi lingkungan usaha tani padi. Variabel input dan *output* disajikan dalam Tabel 1, sedangkan variabel penjelas disajikan dalam Tabel 2. Pupuk kimia dianggap sebagai input yang merusak lingkungan (*environmentally detrimental input*), yang dinotasikan dengan Z. Variabel penjelas yang diduga berpengaruh terhadap efisiensi lingkungan usaha tani padi terdiri atas umur petani (AGE), tingkat pendidikan petani (EDU), efisiensi teknis (EFF), sistem budidaya padi (SYSTEM), varietas

padi (VAR), wilayah (REGION), jenis lahan (LAND), musim tanam (SEASON), kepemilikan lahan (OWNERSHIP), bantuan/hibah/subsidi (SUPPORT), penyuluhan/bimbingan (COUNSELING), akses kredit (CREDIT) dan jaringan sosial (NETWORK).

Tabel 2: Variabel Penjelas untuk Efisiensi Lingkungan

No.	Variabel	Deskripsi	Keterangan
Kualitas Tenaga Kerja			
1	AGE	Umur	Kuantitatif (tahun)
2	EDU ₁	Dummy Pendidikan 1	1: Tamat SD 0: Lainnya
3	EDU ₂	Dummy Pendidikan 2	1: Tamat SMP 0: Lainnya
4	EDU ₃	Dummy Pendidikan 3	1: Tamat SMA/Perguruan Tinggi 0: Lainnya
5	EFF	Efisiensi teknis	Kuantitatif
Adopsi Teknologi			
6	SYSTEM	Sistem budidaya padi	1: SRI/PTT 0: Konvensional
7	VAR	Varietas padi	1: Hibrida 0: Lainnya
Lingkungan Fisik			
8	REGION ₁	Dummy Region 1	1: Zona utara (lipatan) 0: Lainnya
9	REGION ₂	Dummy Region 2	1: Zona tengah (gunung berapi) 0: Lainnya
10	LAND	Jenis lahan	1: Sawah 0: Bukan sawah
11	SEASON	Musim tanam	1: Musim hujan 0: Musim kemarau
Lingkungan Institusi			
12	OWNERSHIP	Kepemilikan lahan	1: Milik sendiri 0: Sewa/bebas sewa/lainnya
13	SUPPORT	Bantuan/hibah/subsidi	1: Ada 0: Tidak ada
14	COUNSELING	Penyuluhan/bimbingan	1: Ada 0: Tidak ada
15	CREDIT	Pinjaman untuk usaha	1: Ada 0: Tidak ada
16	NETWORK	Jaringan sosial (keikutsertaan dalam kelompok tani)	1: Ya 0: Tidak

Model Stochastic Frontier

Model *stochastic frontier* pertama kali diperkenalkan oleh Aigner dkk. (1977) dan Meeusen & van den Broeck (1977) pada periode yang bersamaan dengan memasukkan efek acak yang tidak dapat dikendalikan oleh produsen (cuaca buruk, kerusakan mesin, dsb) untuk mengukur efisiensi. Model standar *stochastic frontier* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\ln(y_i) = \ln[f(x_i; \beta)] + \nu_i - u_i \quad (4)$$

dengan $\ln[f(x_i; \beta)]$ adalah fungsi produksi (Cobb-Douglas atau Translog), ν_i adalah komponen gangguan, u_i adalah komponen inefisiensi yang bersifat non-negatif, ν_i dan u_i diasumsikan saling bebas. Jika ν_i diasumsikan berdistribusi normal $\nu_i \sim iidN(0, \sigma_v^2)$ dan u_i diasumsikan berdistribusi *truncated normal* $u_i \sim iidN^+(\mu, \sigma_u^2)$, maka fungsi kepekatan peluang untuk ν dan u dapat dituliskan sebagai berikut:

$$f_v(\nu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^2}} \exp\left[-\frac{\nu^2}{2\sigma_v^2}\right]; -\infty < \nu < \infty, \sigma_v^2 > 0$$

$$f_u(u) = \frac{1}{\Phi(\mu/\sigma_u)\sqrt{2\pi\sigma_u^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{u-\mu}{\sigma_u}\right)^2\right]; -u > 0, \sigma_u^2 > 0, -\infty < \mu < \infty \quad (5)$$

Selanjutnya, fungsi kepekatan marginal bagi ε dapat diturunkan sebagai berikut (Stevenson, 1980):

$$h(\varepsilon) = \sigma^{-1} \phi\left(\frac{\varepsilon - \mu}{\sigma}\right) \left[\Phi\left(\frac{\mu}{\sigma\lambda} + \frac{\varepsilon\lambda}{\sigma}\right) \right] \left[\Phi\left(\frac{\mu}{\sigma_u}\right) \right]^{-1} \quad (6)$$

dengan $\Phi(\cdot)$ adalah fungsi distribusi kumulatif dari normal baku, $\phi(\cdot)$ adalah fungsi kepekatan dari distribusi normal baku, $\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 + \sigma_v^2}$, dan $\lambda = \sigma_u/\sigma_v$. Jika $\mu = 0$ maka distribusi dari menjadi *half normal*. Fungsi *log-likelihood* dapat dihitung sebagai:

$$\ln(L) = -\frac{n}{2} \ln 2\pi\sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \mu)^2 + \sum_{i=1}^n \ln \left[\Phi\left(\frac{\mu}{\sigma\lambda} + \frac{\varepsilon_i\lambda}{\sigma}\right) \right] - n \ln \left[\Phi\left(\frac{\mu}{\sigma_u}\right) \right] \quad (7)$$

Parameter model *stochastic frontier* diestimasi dengan cara memaksimumkan fungsi *log-likelihood* pada persamaan (7). Setelah estimasi parameter diperoleh, skor efisiensi teknis (*technical efficiency*) dapat dihitung sebagai berikut (Reinhard dkk., 1999):

$$TE_i = \exp\left[-\mu_{*i} + \frac{1}{2}\sigma^2\right] \quad (8)$$

dimana $\mu_{*i} = [-\varepsilon_i\sigma_u^2 + \mu\sigma_v^2]/\sigma^2$ dan $\sigma^2 = \sigma_u^2\sigma_v^2/\sigma^2$.

Dalam penelitian ini, model *stochastic frontier* digunakan untuk dua tujuan. Pertama, model *stochastic frontier* digunakan untuk membentuk model produksi. Kedua, model *stochastic frontier* digunakan untuk menganalisis pengaruh dari berbagai variabel penjelas terhadap efisiensi lingkungan usaha tani padi (Reinhard dkk., 2002). Untuk tujuan pertama, spesifikasi model yang digunakan adalah sebagai berikut:

Fungsi produksi Cobb-Douglas:

$$\ln Y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \ln X_{ij} + \beta_\epsilon \ln Z_i + \nu_i - u_i \quad (9)$$

Fungsi produksi Translog:

$$\ln Y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \ln X_{ij} + \beta_\epsilon \ln Z_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^5 \sum_{l=1}^5 \alpha_{jl} (\ln X_{ij}) (\ln X_{il}) + \frac{1}{2} \beta_{\epsilon\epsilon} (\ln Z_i)^2$$

$$+ \sum_{j=1}^5 \xi_j (\ln X_{ij}) (\ln Z_i) + \nu_i - u_i \quad (10)$$

dimana Y_i adalah produksi dari usaha tani padi ke- i , X_{ij} adalah input konvensional ke- j dari usaha tani padi ke- i , Z_i adalah *environmentally detrimental input* (pupuk kimia) dari usaha tani padi ke- i , ν_i adalah komponen gangguan dan u_i adalah komponen inefisiensi teknis.

Untuk tujuan kedua, spesifikasi model yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \ln EE_i = & \delta_0 + \delta_1 \ln AGE_i + \sum_{j=1}^3 \delta_{2j} EDU_{ji} + \delta_3 \ln EFF_i + \delta_4 SYSTEM_i + \delta_5 VAR_i \\ & + \sum_{j=1}^2 \delta_{6j} REGION_{ji} + \delta_7 LAND_i + \delta_8 SEASON_i + \delta_9 OWNERSHIP_i \\ & + \delta_{10} SUPPORT_i + \delta_{11} COUNSELING_i + \delta_{12} CREDIT_i \\ & + \delta_{13} NETWORK_i + v_i - u_i \end{aligned} \quad (11)$$

dimana EE adalah skor efisiensi lingkungan, AGE adalah umur petani, EDU adalah *dummy* tingkat pendidikan ke-*j*, EFF adalah efisiensi teknis, SYSTEM adalah sistem budidaya padi, VAR adalah varietas padi, REGION adalah *dummy* wilayah ke-*j*, LAND adalah jenis lahan, SEASON adalah musim tanam, OWNERSHIP adalah kepemilikan lahan, SUPPORT adalah bantuan/hibah/subsidi, COUNSELING adalah penyuluhan/bimbingan, CREDIT adalah akses kredit, dan NETWORK adalah jaringan sosial.

Penghitungan Efisiensi Lingkungan

Untuk menghitung efisiensi lingkungan, Reinhard dkk. (1999) terlebih dahulu menghitung *frontier* produksi dengan cara membuat $u_i=0$ lalu mengganti input yang merusak lingkungan (*environmentally detrimental input*) Z_i pada persamaan (10) dengan θZ_i , dimana θ merepresentasikan efisiensi lingkungan (EE). Dengan demikian, persamaannya menjadi:

$$\begin{aligned} \ln Y_i = & \alpha_0 + \sum_{j=1}^5 \alpha_j \ln X_{ij} + \beta_\epsilon \ln \theta Z_i + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^5 \sum_{l=1}^5 \alpha_{jl} (\ln X_{ij})(\ln X_{il}) + \frac{1}{2} \beta_{\epsilon\epsilon} (\ln \theta Z_i)^2 \\ & + \sum_{j=1}^5 \xi_j (\ln X_{ij})(\ln \theta Z_i) + v_i \end{aligned} \quad (12)$$

Karena efisiensi lingkungan didefinisikan sebagai kemampuan untuk mengurangi input yang merusak lingkungan tanpa mengubah level output dan input lainnya, maka output pada persamaan (10) sama dengan output pada persamaan (12). Dengan menyamakan persamaan (10) dan persamaan (12), diperoleh hasil:

$$\beta_\epsilon (\ln \theta Z_i - \ln Z_i) + \frac{1}{2} \beta_{\epsilon\epsilon} \{(\ln \theta Z_i)^2 - (\ln Z_i)^2\} + \sum_{j=1}^5 \xi_j (\ln X_{ij}) \{(\ln \theta Z_i) - (\ln Z_i)\} + u_i = 0 \quad (13)$$

Perhatikan bahwa, $\ln \theta Z_i - \ln Z_i = \ln(\frac{\theta Z_i}{Z_i}) = \ln(\theta)$ adalah logaritma natural dari efisiensi lingkungan, sehingga bisa dituliskan sebagai $\ln EE$. Dengan manipulasi matematis, persamaan (13) dapat diubah menjadi persamaan kuadrat sebagai berikut (Trang dkk., 2018):

$$a_i (\ln EE_i)^2 + b_i (\ln EE_i) + u_i = 0 \quad (14)$$

dimana $a_i = 1/2\beta_{\epsilon\epsilon}$ dan $b_i = \beta_\epsilon + \beta_{\epsilon\epsilon} (\ln Z_i) + \sum_{j=1}^5 \xi_j (\ln X_{ij})$.

Solusi dari persamaan (14) adalah sebagai berikut:

$$\ln EE_i = \frac{-b_i \pm \sqrt{b_i^2 - 4a_i u_i}}{2a_i} \quad (15)$$

Reinhard dkk. (1999) menjelaskan bahwa skor efisiensi lingkungan dihitung hanya dari solusi “ $+\sqrt{}$ ” dari persamaan (15). Sehingga, skor efisiensi lingkungan (EE) dihitung sebagai berikut:

$$EE_i = \exp \left\{ \frac{-b_i \pm \sqrt{b_i^2 - 4a_i u_i}}{2a_i} \right\} \quad (16)$$

dimana $a_i = 1/2\beta_{\epsilon\epsilon}$, $b_i = \beta_\epsilon + \beta_{\epsilon\epsilon} (\ln Z_i) + \sum_{j=1}^5 \xi_j (\ln X_{ij})$ dan u_i adalah inefisiensi teknis.

Hasil dan Pembahasan

Model Produksi Usaha Tani Padi di Jawa Timur

Sebelum menghitung efisiensi lingkungan usaha tani padi di Jawa Timur, terlebih dahulu dibentuk model produksi untuk menghubungkan input dan *output*. Penelitian ini menggunakan model *stochastic frontier*, dimana galat model didekomposisikan menjadi komponen *random shock (noise)* dan komponen inefisiensi. Tabel 3 menyajikan hasil pengujian eksistensi efek inefisiensi menggunakan uji *Likelihood Ratio (LR)*, baik menggunakan fungsi produksi Cobb-Douglas maupun Translog. Nilai statistik LR pada Cobb-Douglas adalah sebesar 3077,90, sedangkan nilai statistik LR pada Translog adalah sebesar 2944,43. Keduanya lebih besar daripada nilai *chi-square* tabel, sehingga disimpulkan bahwa terdapat efek inefisiensi dalam produksi padi di Jawa Timur.

Tabel 3: Hasil Pengujian Efek Inefisiensi Produksi Padi di Jawa Timur

Fungsi Produksi	Hipotesis	Statistik LR	χ^2 (df=1)	Keputusan
Cobb-Douglas	Ho : $\gamma = 0$ (tidak ada efek inefisiensi)	3077,90	3,84	Tolak Ho
	H1 : $\gamma > 0$ (ada efek inefisiensi)			
Translog	Ho : $\gamma = 0$ (tidak ada efek inefisiensi)	2944,43	3,84	Tolak Ho
	H1 : $\gamma > 0$ (ada efek inefisiensi)			

Karena terdapat efek inefisiensi, maka perlu ditentukan distribusi dari komponen inefisiensi. Distribusi yang sering digunakan untuk komponen inefisiensi adalah *half-normal* (Aigner dkk., 1977) atau *truncated normal* (Stevenson, 1980). Hasil pengujian distribusi komponen inefisiensi ditampilkan dalam Tabel 4. Berdasarkan fungsi produksi Cobb-Douglas, diperoleh statistik LR sebesar 737,16, sedangkan pada fungsi produksi Translog diperoleh statistik LR sebesar 695,59. Keduanya lebih besar daripada nilai *chi-square* tabel, sehingga disimpulkan bahwa distribusi yang cocok untuk komponen inefisiensi adalah *truncated normal*.

Tabel 4: Hasil Pengujian Distribusi Komponen Inefisiensi

Fungsi Produksi	Hipotesis	Statistik LR	χ^2 (df=1)	Keputusan
Cobb-Douglas	Ho : $\mu = 0$ (<i>half-normal</i>)	737,16	3,84	Tolak Ho
	H1 : $\mu \neq 0$ (<i>truncated-normal</i>)			
Translog	Ho : $\mu = 0$ (<i>half-normal</i>)	695,59	3,84	Tolak Ho
	H1 : $\mu \neq 0$ (<i>truncated-normal</i>)			

Tabel 5 menyajikan hasil estimasi parameter model *stochastic frontier*, baik menggunakan fungsi produksi Cobb-Douglas maupun fungsi produksi Translog. Pada fungsi produksi Cobb-Douglas terlihat bahwa input lahan (X1), pupuk kimia (Z), pupuk organik (X3) dan modal (X5) berpengaruh signifikan terhadap produksi padi di Jawa Timur. Pada fungsi produksi Translog, beberapa efek kuadratik dan efek interaksi dari input juga berpengaruh signifikan. Parameter μ yang signifikan mengonfirmasi bahwa distribusi *truncated normal* untuk efek inefisiensi tepat digunakan. Sedangkan, parameter γ yang signifikan mengonfirmasi bahwa efek inefisiensi berpengaruh signifikan terhadap produksi padi di Jawa Timur. Koefisien γ sebesar 0.98 menunjukkan bahwa inefisiensi teknis menjelaskan sebesar 98% deviasi usaha tani padi terhadap *frontier* produksi.

Koefisien pada fungsi produksi Cobb-Douglas dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai elastisitas, sedangkan pada fungsi produksi Translog, elastisitasnya dihitung menggunakan formula sebagai berikut (Ray & Kumbhakar, 2015):

$$elastisitas_j = \hat{a}_j + \sum_k \hat{a}_{jk} \ln X_k \quad (17)$$

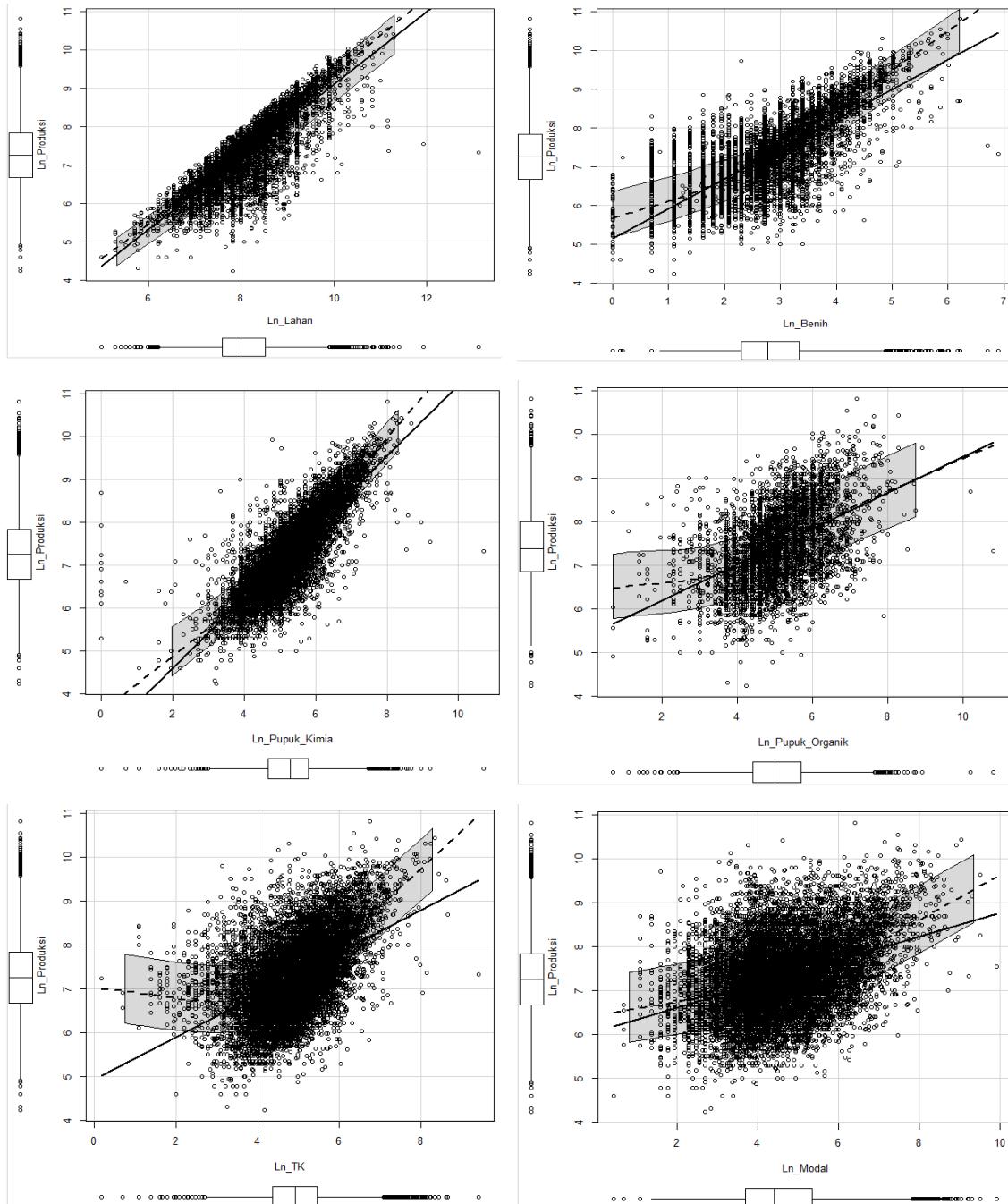
Tabel 5: Model Produksi Padi di Jawa Timur Berdasarkan *Stochastic Frontier Analysis*

	Cobb-Douglas			Translog		
	Koef.	s.e.	p-value	Koef.	s.e.	p-value
Konstanta	0,150	0,040	0,000***	0,361	0,406	0,373
Ln_X1	0,805	0,008	0,000***	0,873	0,134	0,000***
Ln_X2	0,006	0,006	0,286	-0,197	0,095	0,039**
Ln_Z	0,160	0,005	0,000***	-0,134	0,077	0,080*
Ln_X3	0,013	0,001	0,000***	-0,016	0,016	0,314
Ln_X4	0,002	0,003	0,513	0,275	0,051	0,000***
Ln_X5	0,033	0,002	0,000***	0,036	0,034	0,293
(Ln_X1) ²				-0,005	0,012	0,662
(Ln_X2) ²				0,001	0,007	0,903
(Ln_Z) ²				0,052	0,004	0,000***
(Ln_X3) ²				-0,002	0,001	0,064*
(Ln_X4) ²				0,016	0,003	0,000***
(Ln_X5) ²				0,003	0,001	0,084*
(Ln_X1)(Ln_X2)				0,082	0,016	0,000***
(Ln_X1)(Ln_Z)				0,009	0,014	0,520
(Ln_X1)(Ln_X3)				0,013	0,003	0,000***
(Ln_X1)(Ln_X4)				-0,084	0,010	0,000***
(Ln_X1)(Ln_X5)				0,013	0,007	0,057*
(Ln_X2)(Ln_Z)				-0,104	0,012	0,000***
(Ln_X2)(Ln_X3)				0,005	0,002	0,034**
(Ln_X2)(Ln_X4)				0,035	0,008	0,000***
(Ln_X2)(Ln_X5)				-0,018	0,005	0,001***
(Ln_Z)(Ln_X3)				-0,012	0,002	0,000***
(Ln_Z)(Ln_X4)				0,027	0,007	0,000***
(Ln_Z)(Ln_X5)				-0,018	0,004	0,000***
(Ln_X3)(Ln_X4)				-0,001	0,002	0,509
(Ln_X3)(Ln_X5)				-0,003	0,001	0,001***
(Ln_X4)(Ln_X5)				0,004	0,003	0,158
μ	-2,267	0,140	0,000***	-2,236	0,102	0,000***
γ	0,984	0,001	0,000***	0,983	0,001	0,000***
σ^2	1,306	0,060	0,000***	1,271	0,045	0,000***
Log-likelihood	-5630,43			-5346,19		
AIC	11280,86			10754,38		

Signifikan pada taraf nyata: 10%*, 5%** , 1%***

Elastisitas masing-masing input berdasarkan fungsi produksi Cobb-Douglas dan Translog disajikan pada Tabel 6. Input dengan elastisitas terbesar adalah lahan, yaitu sebesar 0,805 pada fungsi produksi Cobb-Douglas dan 0,737 pada fungsi produksi Translog. Hal ini berarti bahwa jika luas lahan ditingkatkan sebesar 1%, maka jumlah produksi padi meningkat sebesar 0,80% (berdasarkan fungsi produksi Cobb-Douglas) atau meningkat sebesar 0,74% (berdasarkan fungsi produksi Translog). Input yang juga memiliki elastisitas cukup tinggi adalah pupuk kimia, yaitu sebesar 0,160 pada fungsi produksi Cobb-Douglas dan 0,217 pada fungsi produksi Translog. Elastisitas pupuk kimia lebih besar dibandingkan dengan elastisitas

pupuk organik. Hal ini menunjukkan bahwa pertanian padi sangat bergantung pada pupuk kimia untuk peningkatan produksinya. Namun demikian, penggunaan pupuk kimia harus dilakukan secara efisien untuk menghindari dampak eksekif pupuk kimia terhadap lingkungan. Input-input lainnya memiliki elastisitas yang tidak begitu besar dibandingkan dengan lahan dan pupuk kimia. Pola hubungan antara masing-masing input terhadap produksi padi di Jawa Timur divisualisasikan dalam Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa seluruh input memiliki asosiasi yang positif dengan produksi padi, namun dengan kemiringan (*slope*) yang berbeda-beda.



Gambar 3: Pola Hubungan antara Masing-masing Input terhadap Output

Tabel 6: Elastisitas Masing-masing Input

No.	Input	Elastisitas	
		Cobb-Douglas	Translog
1	Lahan (X1)	0,805	0,737
2	Benih (X2)	0,006	0,017
3	Pupuk kimia (Z)	0,160	0,217
4	Pupuk organik (X3)	0,013	0,016
5	Tenaga kerja (X4)	0,002	0,007
6	Modal (X5)	0,033	0,033
Return to scale		1,020	1,027

Tabel 7 menampilkan hasil pengujian *Likelihood Ratio* (LR) untuk menentukan fungsi produksi yang lebih baik digunakan, Cobb-Douglas atau Translog. Nilai statistik LR yang dihasilkan adalah sebesar 568,48. Nilai tersebut lebih besar daripada nilai *chi-square* tabel (32,67), sehingga disimpulkan bahwa fungsi produksi Translog lebih tepat digunakan. Dengan demikian, penghitungan skor efisiensi teknis dan skor efisiensi lingkungan pada tahap selanjutnya dilakukan dengan menggunakan fungsi produksi Translog.

Tabel 7: Uji LR untuk Pemilihan Fungsi Produksi

Hipotesis	Statistik LR	χ^2 (df=21)	Keputusan
Ho : Cobb-Douglas cocok digunakan	568,48	32,67	Tolak Ho
H1 : Translog cocok digunakan			

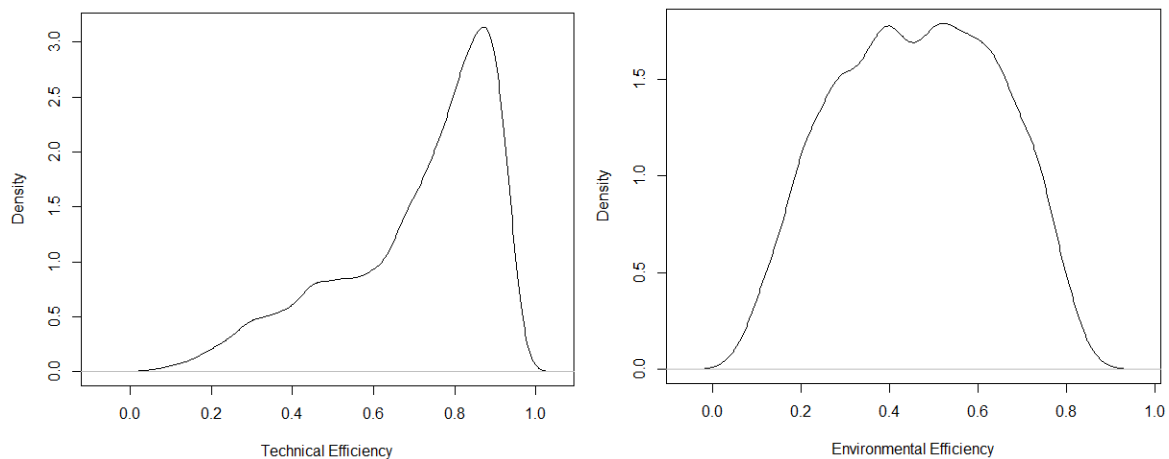
Efisiensi Teknis dan Efisiensi Lingkungan Usaha Tani Padi di Jawa Timur

Ringkasan statistik skor efisiensi teknis (*technical efficiency*) dan skor efisiensi lingkungan (*environmental efficiency*) usaha tani padi di Jawa Timur diberikan pada Tabel 8, sedangkan distribusinya ditampilkan dalam Gambar 4. Efisiensi teknis usaha tani padi di Jawa Timur berkisar antara 0,003 hingga 0,971, dengan rata-rata sebesar 0,706. Hal ini menunjukkan bahwa produksi padi di Jawa Timur masih bisa ditingkatkan sebesar 29,4% dengan menghilangkan efek inefisiensi. Sedangkan, efisiensi lingkungan usaha tani padi di Jawa Timur berkisar antara 0,024 hingga 0,885, dengan rata-rata sebesar 0,463. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi lingkungan dari pertanian padi di Jawa Timur masih rendah dan terdapat peluang untuk ditingkatkan sebesar 53,7%. Peningkatan efisiensi lingkungan dapat dilakukan melalui efisiensi penggunaan pupuk kimia.

Tabel 8: Ringkasan Statistik Efisiensi Teknis dan Efisiensi Lingkungan

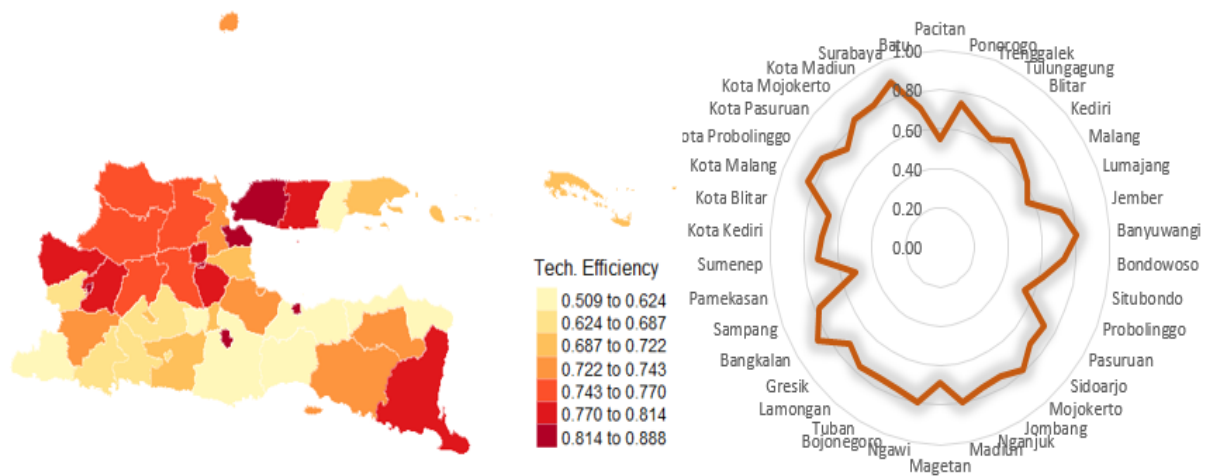
	Rata-rata	Min	Q1	Q2	Q3	Max
Efisiensi Teknis (TE)	0,706	0,003	0,589	0,766	0,859	0,971
Efisiensi Lingkungan (EE)	0,463	0,024	0,320	0,466	0,609	0,885

Penelitian ini juga menyajikan distribusi efisiensi teknis dan efisiensi lingkungan usaha tani padi secara spasial. Distribusi spasial efisiensi teknis disajikan dalam Gambar 5, sedangkan distribusi spasial efisiensi lingkungan terdapat pada Gambar 6. Kota Surabaya, Kabupaten Bangkalan dan Kota Malang memiliki efisiensi teknis yang relatif tinggi, sedangkan Kabupaten Pamekasan, Kabupaten Probolinggo dan Kabupaten Pacitan memiliki efisiensi teknis yang relatif rendah. Selanjutnya, Kabupaten Lamongan, Kabupaten Madiun dan Kabupaten Banyuwangi memiliki efisiensi lingkungan yang relatif tinggi, sedangkan Kota Pasuruan, Kota Mojokerto dan Kabupaten Sumenep memiliki efisiensi lingkungan yang relatif rendah.

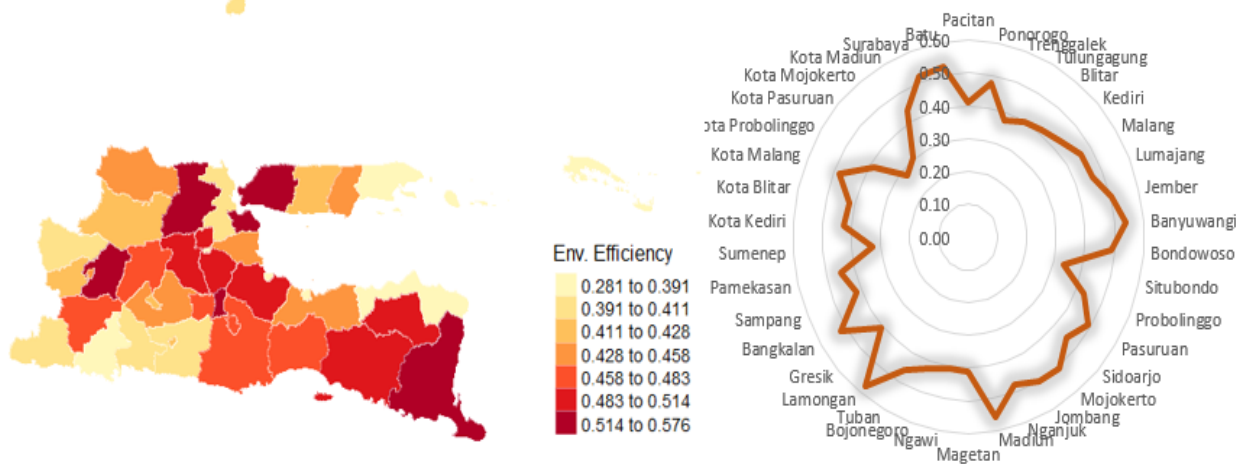


Gambar 4: Distribusi Efisiensi Teknis dan Efisiensi Lingkungan

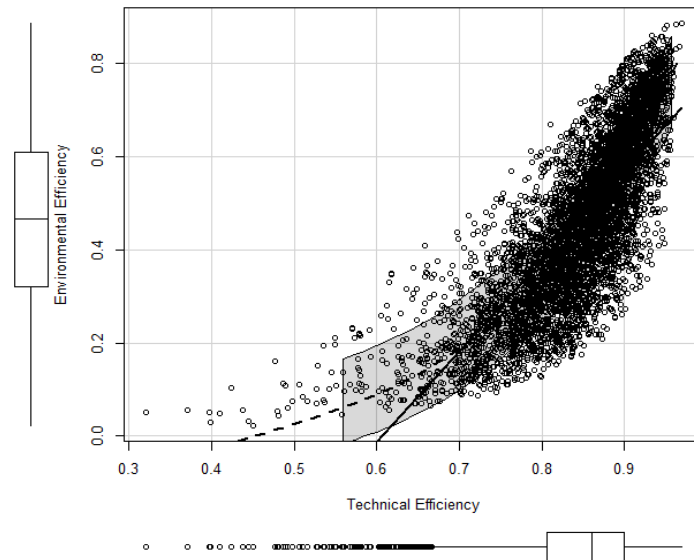
Gambar 7 memperlihatkan bahwa terdapat asosiasi yang positif antara efisiensi teknis dan efisiensi lingkungan. Semakin tinggi efisiensi teknis, semakin tinggi pula efisiensi lingkungan yang bisa dicapai usaha tani padi. Dengan demikian, meningkatkan efisiensi teknis juga berimplikasi pada kinerja lingkungan yang semakin baik.



Gambar 5: Distribusi Spasial Efisiensi Teknis



Gambar 6: Distribusi Spasial Efisiensi Lingkungan



Gambar 7: Scatterplot Efisiensi Teknis dan Efisiensi Lingkungan

Determinan Efisiensi Lingkungan Usaha Tani Padi di Jawa Timur

Tabel 9: Model Efisiensi Lingkungan Usaha Tani Padi di Jawa Timur

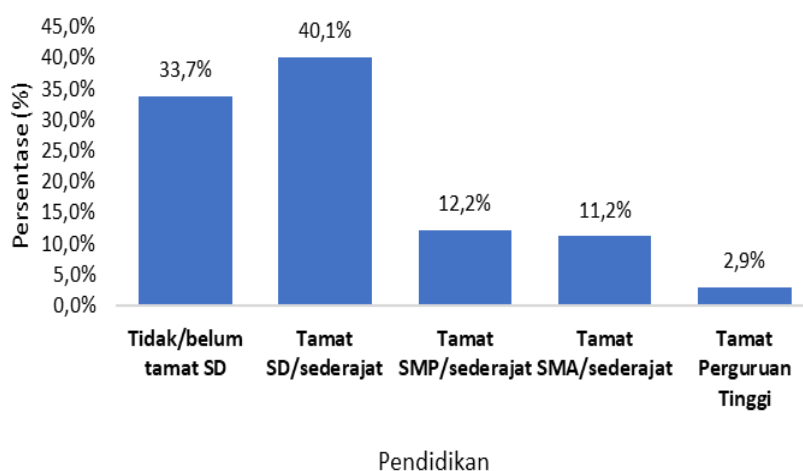
	OLS			VIF	Stochastic Frontier Model		
	Koef.	s.e.	p-value		Koef.	s.e.	p-value
Konstanta	-0,465	0,079	0,000***		-0,203	0,066	0,002***
Ln_AGE	0,028	0,019	0,131	1,265	0,002	0,015	0,921
EDU ₁	0,027	0,009	0,002***	1,524	0,020	0,007	0,005***
EDU ₂	0,032	0,013	0,011**	1,515	0,020	0,010	0,060*
EDU ₃	0,038	0,012	0,002***	1,606	0,022	0,010	0,028**
Ln_EFF	4,130	0,038	0,000***	1,047	3,402	0,045	0,000***
SYSTEM	0,043	0,011	0,000***	1,060	0,038	0,009	0,000***
VAR	0,049	0,008	0,000***	1,302	0,063	0,007	0,000***
REGION ₁	-0,022	0,010	0,033**	1,754	-0,012	0,009	0,153
REGION ₂	-0,019	0,010	0,049**	1,798	-0,014	0,008	0,094*
LAND	0,043	0,013	0,001***	1,218	0,033	0,011	0,002***
SEASON	-0,001	0,015	0,966	1,015	0,004	0,012	0,724
OWNERSHIP	0,030	0,009	0,001***	1,106	0,030	0,008	0,000***
SUPPORT	-0,006	0,008	0,487	1,103	-0,010	0,007	0,156
COUNSELING	0,061	0,009	0,000***	1,351	0,059	0,007	0,000***
CREDIT	0,027	0,013	0,034**	1,041	0,018	0,011	0,083*
NETWORK	0,094	0,009	0,000***	1,280	0,099	0,007	0,000***
μ					-1,125	0,327	0,001***
γ					0,967	0,006	0,000***
σ ²					0,474	0,086	0,000***
R ²	68,33%				-		
Log-likelihood	-658,59				-373,47		
AIC	1351,18				786,95		

Signifikan pada taraf nyata: 10%*, 5%** , 1%***

Pada penelitian ini, model *stochastic frontier* digunakan pula untuk menganalisis pengaruh dari berbagai variabel bebas terhadap efisiensi lingkungan. Hasil estimasi parameter model efisiensi lingkungan tersedia pada Tabel 9. Model *stochastic frontier* lebih baik dibandingkan dengan model standar (OLS), yang tercermin dari nilai *Akaike Information Criterion* (AIC) yang lebih kecil. Hal ini didukung oleh nilai parameter γ yang signifikan pada model *stochastic frontier*. Tabel 9 juga menyediakan nilai *Variance Inflation Factor* (VIF) untuk memeriksa multikolinieritas antar variabel bebas. Nilai VIF yang kurang dari 10 mengindikasikan bahwa asumsi non-multikolinearitas sudah terpenuhi (Chatterjee & Hadi, 2006). Pada Tabel 9 terlihat bahwa nilai VIF untuk seluruh variabel bebas bernilai sangat kecil dan kurang dari 10, sehingga mengindikasikan bahwa permasalahan multikolinearitas tidak ditemukan dalam model.

Efisiensi lingkungan usaha tani padi di Jawa Timur dipengaruhi secara signifikan oleh tingkat pendidikan petani (EDU), efisiensi teknis (EFF), sistem budidaya padi (SYSTEM), varietas padi (VAR), jenis lahan (LAND), kepemilikan lahan (OWNERSHIP), penyuluhan/bimbingan (COUNSELING), dan jaringan sosial (NETWORK). *Dummy* wilayah, khususnya zona tengah (REGION₂) dan akses kredit (CREDIT) juga menunjukkan pengaruh, namun dengan tingkat signifikansi yang lebih kecil (pada taraf nyata 10%). Sedangkan umur petani (AGE), musim tanam (SEASON) dan bantuan/hibah/subsidi (SUPPORT) tidak berpengaruh signifikan terhadap efisiensi lingkungan. Umur petani memiliki dampak positif dan negatif yang sama besarnya, sehingga efeknya ternetralisir. Petani yang lebih tua cenderung lebih berpengalaman, namun juga cenderung lebih sulit untuk mengadopsi teknologi baru (Xie & Huang, 2021). Begitu pula dengan bantuan/hibah/subsidi. Kebijakan subsidi pertanian telah menjadi salah satu cara untuk mendorong pertanian yang berkelanjutan di berbagai negara (Zhang dkk., 2021), namun subsidi pertanian juga dapat mendorong penggunaan pupuk kimia yang eksekutif (Scholz & Geissler, 2018). Sedangkan, musim tanam yang tidak signifikan menunjukkan bahwa efisiensi lingkungan dari padi yang ditanam di musim hujan tidak berbeda signifikan dengan efisiensi lingkungan dari padi yang ditanam di musim kemarau.

Koefisien yang cenderung meningkat pada variabel pendidikan (EDU₁ hingga EDU₃) menunjukkan bahwa petani dengan tingkat pendidikan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi pula. Pendidikan yang lebih baik merupakan insentif yang esensial bagi petani untuk memilih perilaku produksi ramah lingkungan (Adama dkk., 2018). Sayangnya, tingkat pendidikan petani padi di Jawa Timur umumnya masih rendah. Sekitar 33,7% petani tidak/belum tamat SD dan 40,1% petani hanya menamatkan SD/ sederajat. Selanjutnya, hanya 2,9% petani di Jawa Timur yang menamatkan Perguruan Tinggi (Gambar 8).

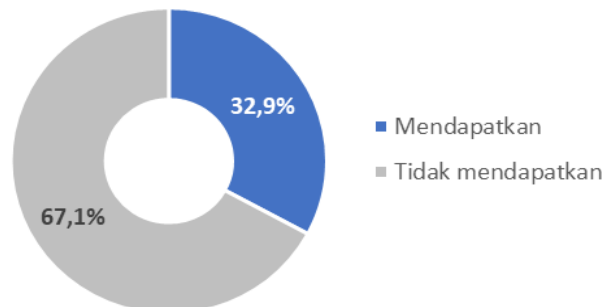


Gambar 8: Tingkat Pendidikan Petani Padi di Jawa Timur

Sistem budidaya padi (SYSTEM) yang positif dan signifikan menunjukkan bahwa sistem SRI/PTT menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional. *Nitrogen Use Efficiency* (NUE) dari metode SRI adalah 21,3 kg grain/kg N, sedangkan NUE dari metode konvensional adalah 13,3 kg grain/kg N (Mboyerwa dkk., 2022). Dengan demikian, metode SRI memerlukan pupuk kimia yang lebih sedikit dibandingkan dengan metode konvensional untuk mendapatkan hasil produksi yang sama. Namun, berdasarkan hasil survei Struktur Ongkos Usaha Tanaman Padi (SOUT-SPD), hanya 6,3% usaha tani padi di Jawa Timur yang menggunakan metode SRI.

Varietas padi (VAR) yang positif dan signifikan menunjukkan bahwa padi Hibrida menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan padi lainnya. Huang dkk. (2017) mengungkapkan bahwa padi hibrida tetap dapat menghasilkan produksi yang lebih banyak dibandingkan dengan padi Inbrida meskipun tanpa penambahan pupuk nitrogen. Selanjutnya, jenis lahan (LAND) yang positif dan signifikan menunjukkan bahwa lahan sawah menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan lahan bukan sawah.

Petani yang mengusahakan lahan milik sendiri memiliki efisiensi lingkungan yang lebih tinggi daripada petani yang mengusahakan lahan milik orang lain. Hasil ini sejalan dengan temuan Defidelwina dkk. (2019). Petani yang menggunakan lahan milik sendiri cenderung lebih berhati-hati dalam mengelola lahannya demi menjaga keberlanjutan usaha tani yang dilakukan. Penyuluhan/bimbingan juga berpengaruh positif terhadap efisiensi lingkungan. Petani yang mendapatkan penyuluhan/bimbingan cenderung menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan petani yang tidak mendapatkan penyuluhan/bimbingan. Penyuluhan pertanian menjadi sumber tambahan pengetahuan bagi petani di samping pendidikan formal. Namun, sekitar 67,1% petani padi di Jawa Timur belum mendapatkan penyuluhan (Gambar 9).



Gambar 9: Persentase Petani Padi di Jawa Timur yang Mendapatkan Penyuluhan/ Bimbingan

Akses kredit (CREDIT) berpengaruh terhadap efisiensi lingkungan pada taraf nyata 10%. Petani yang mendapatkan pinjaman untuk usaha menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan petani yang tidak mendapatkan pinjaman untuk usaha. Kredit usaha mengeliminasi kendala permodalan yang dihadapi oleh petani untuk menggunakan teknologi baru (Girma, 2022). Namun, berdasarkan hasil SOUT-SPD, sebanyak 90,9% petani di Jawa Timur hanya mengandalkan modal sendiri untuk usahanya. Bahkan, sebanyak 97,3% petani enggan untuk meminjam dari bank. Alasan utamanya adalah karena proses yang berbelit-belit/lama dan tidak mempunyai agunan. Variabel terakhir yang berpengaruh signifikan terhadap efisiensi lingkungan adalah jaringan sosial (NETWORK). Petani yang menjadi anggota kelompok tani cenderung memiliki efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan petani yang tidak mengikuti kelompok tani. Modal sosial (termasuk partisipasi sosial) mempengaruhi cara petani dalam menggunakan pupuk kimia, khususnya karena kesadaran akan tujuan bersama (Zhou dkk., 2018).

Simpulan dan Rekomendasi

Penelitian ini menemukan bahwa efisiensi lingkungan dari usaha tani padi di Jawa Timur masih rendah, yaitu sebesar 46,3%. Input yang merusak lingkungan, yaitu pupuk kimia masih bisa dikurangi hingga 53,7% tanpa mengurangi kuantitas produksi padi yang dihasilkan. Dengan demikian, dampak eksekutif pupuk kimia terhadap lingkungan dapat dikurangi. Secara spasial, Kabupaten Lamongan, Kabupaten Madiun dan Kabupaten Banyuwangi memiliki efisiensi lingkungan yang relatif tinggi, sedangkan Kota Pasuruan, Kota Mojokerto dan Kabupaten Sumenep memiliki efisiensi lingkungan yang relatif rendah. Efisiensi lingkungan usaha tani padi di Jawa Timur dipengaruhi oleh tingkat pendidikan petani, efisiensi teknis, sistem budidaya padi, varietas padi, wilayah, jenis lahan, kepemilikan lahan, penyuluhan/bimbingan, akses kredit dan jaringan sosial. Semakin tinggi pendidikan petani, semakin tinggi pula efisiensi lingkungan yang dihasilkan. Efisiensi lingkungan juga memiliki asosiasi yang positif dengan efisiensi teknis. *System of Rice Intensification* (SRI) dan Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT) menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional. Sedangkan, varietas padi hibrida menghasilkan efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan padi inbida dan padi ladang. Petani yang mengusahakan lahan milik sendiri cenderung memiliki efisiensi lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan petani yang mengusahakan lahan milik orang lain. Selanjutnya, penyuluhan/bimbingan, akses kredit dan keikutsertaan dalam kelompok tani memiliki dampak yang positif terhadap peningkatan efisiensi lingkungan.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, terdapat beberapa saran dan rekomendasi yang dapat diberikan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Pemerintah pusat (melalui Kementerian Pertanian) dan pemerintah daerah (melalui Dinas Pertanian dan Ketahanan Pangan Provinsi Jawa Timur) perlu mendorong pendidikan dan pelatihan bagi petani untuk menerapkan teknik pertanian yang ramah lingkungan dan memiliki produktivitas tinggi, baik melalui pendidikan vokasi pertanian, bimbingan teknis, maupun program pelatihan di luar negeri. Pelatihan tersebut perlu dilengkapi dengan pedoman teknis yang mudah dipahami oleh petani.
2. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Perguruan Tinggi perlu meningkatkan riset untuk penggunaan pupuk kimia yang lebih efisien. Misalnya, riset di bidang mikrobiologi untuk meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme yang dapat melakukan fiksasi nitrogen secara alami dari udara, riset di bidang botani untuk menghasilkan varietas padi yang minim penggunaan pupuk kimia, dan riset tentang *smart fertilization system* yang mampu memantau kondisi lahan pertanian sehingga pemberian pupuk ditargetkan sesuai kebutuhan tanaman.
3. Mendorong petani untuk menggunakan sistem budidaya dan varietas padi yang memiliki produktivitas tinggi namun ramah terhadap lingkungan. Pemerintah dapat memberikan insentif bagi petani yang mampu mengelola usaha pertaniannya secara berkelanjutan. Insentif tersebut dapat berupa percepatan sertifikasi lahan pertanian, kemudahan akses pinjaman, potongan harga untuk pembelian benih dan pupuk organik, kesempatan pelatihan di luar negeri, ataupun pemberian penghargaan.
4. Bank Indonesia dan pemerintah dapat bekerja sama untuk meningkatkan literasi dan akses terhadap Kredit Usaha Rakyat (KUR) Pertanian, dengan prosedur yang lebih sederhana dan suku bunga yang lebih rendah.
5. Mendorong petani untuk terlibat dalam kelompok tani, agar dapat saling berbagi pengetahuan, material dan tenaga kerja, serta akses pemasaran.

Daftar Pustaka

- Abebe, G. G. (2014). Off-Farm Income and Technical Efficiency of Smallholder Farmers in Ethiopia: A Stochastic Frontier Analysis. [Thesis, Swedish University of Agricultural Sciences].
- Abedullah, Kouser, S., & Mushtaq, K. (2010). Environmental Efficiency Analysis of Basmati Rice Production in Punjab, Pakistan: Implications for Sustainable Agricultural Development. *The Pakistan Development Review*, 49(1), 57-72.
- Aczel, M. (2019). What is The Nitrogen Cycle and Why is It Key to Life? *Frontiers for Young Minds*, 7(41), doi: 10.3389/frym.2019.00041.
- Adama, I., Asaleye, A., & Oye, A. (2018). Agricultural Production in Rural Communities: Evidence from Nigeria. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 9(3), 428-438.
- Aigner, D., Lovell, C.A.K., & Schmidt, P. (1977). Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models. *Journal of Econometrics*, 6(1), 21–37. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(77\)90052-5](https://doi.org/10.1016/0304-4076(77)90052-5)
- Bibi, Z., Khan, D., & Haq, I. ul. (2021). Technical and environmental efficiency of agriculture sector in South Asia: a stochastic frontier analysis approach. *Environment, Development and Sustainability*, 23(6), 9260–9279. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-01023-2>
- BPS. (2017). *Hasil Survei Struktur Ongkos Usaha Tanaman Padi 2017*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- BPS. (2022). *Laporan Perekonomian Indonesia 2022*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- BPS. (2023). *Luas Panen dan Produksi Padi di Indonesia 2022*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- BPTP Sumatera Utara. (2013). *Petunjuk Teknis Lapang Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT) Padi Sawah Irigasi*. Medan: Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Sumatera Utara.
- Chatterjee, S., & Hadi, A. S. (2006). *Regression Analysis by Example*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Defidelwina, Jamhari, Waluyati, L. R., & Widodo, S. (2019). Dampak Kepemilikan Lahan Padi Sawah terhadap Efisiensi Teknis dan Efisiensi Lingkungan di Kabupaten Rokan Hulu. *AGRARIS: Journal of Agribusiness and Rural Development Research*, 5(1), 79-87.
- Dinca, G., Barbuta, M., Negri, C., Dinca, D., & Model, L-S. (2022). The Impact of Governance Quality and Educational Level on Environmental Performance. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 950683. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.950683>
- Erismann, J.W., Galloway, J.N., Sutton, M.A., Klimont, Z., & Winiwater, W. (2008): How a Century of Ammonia Synthesis Changed the World. *Nature Geoscience*, 1, 636-639.
- Erismann, J. W., Galloway, J. N., Dice, N. B., Sutton, M. A., Bleeker, A., Grizzetti, B., Leach, A. M., & de Vries, W. (2015). *Nitrogen : too much of a vital resource : Science Brief*. Zeist: WWF Netherlands.
- Gathorne-Hardy, A., Reddy, D. N., Venkatanarayana, M., & Harriss-White, B. (2016). System of Rice Intensification Provides Environmental and Economic Gains But at The Expense of Social Sustainability - A Multidisciplinary Analysis in India. *Agricultural Systems*, 143,

- 159-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2015.12.012>.
- Girma, Y. (2022). Credit Access and Agricultural Technology Adoption Nexus in Ethiopia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100362. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100362>.
- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., Christie, P., Goulding, K. W. T., Vitousek, P. M., & Zhang F. S. (2010). Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science*, 327 (5968), 1008–1010. <https://doi.org/10.1126/science.1182570>
- Guo, L., Li, H., Cao, X., Cao, A., & Huang, M. (2021). Effect of Agricultural Subsidies on the Use of Chemical Fertilizer. *Journal of Environmental Management*, 299, 113621. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113621>.
- Hanh, N. T. T., Linh, D. M. T., Trung, N. Q., & Cuong, P. V. (2018). Nitrogen-use Efficiency Evaluation and Genome Survey of Vietnamese Rice Landraces (*Oryza sativa* L.). *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*, 1(2), 142-155. <https://doi.org/10.31817/vjas.2018.1.2.04>.
- Hashimoto, M., Herai, Y., Nagaoka, T., & Kuono, K. (2007). Nitrate Leaching in Granitic Regosol as Affected by N Uptake and Transpiration by Corn. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53(3), 300–309. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2007.00134.x>
- Hirel, B., Tetu, T., Lea, P. J., & Dubois, F. (2011). Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 3, 1452-1485. <https://doi.org/10.3390/su3091452>
- Hossain, M. E., Shahrukh, S., & Hossain, S. A. (2022). Chemical Fertilizers and Pesticides: Impacts on Soil Degradation, Groundwater, and Human Health in Bangladesh. In V. P. Singh, S. Yadav, K. K. Yadav, & R. N. Yadava (Eds.), *Environmental Degradation: Challenges and Strategies for Mitigation* (Vol. 104, pp. 63–92). Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95542-7_4
- Huang, M., Jiang, P., Shan, S., Gao, W., Ma, G., Zou, Y., Uphoff, N., & Yuan, L. (2017). Higher Yields of Hybrid Rice Do Not Depend on Nitrogen Fertilization under Moderate to High Soil Fertility Conditions. *Rice*, 10, 43. <https://doi.org/10.1186/s12284-017-0182-1>.
- Iswandi, A., Barison, J., Kassam, A., Mishra, A., Rupela, O. P., Thakur, A. K., Thiagarajan, T. M., & Uphoff, N. (2011). The System of Rice Intensification (SRI) as a Beneficial Human Intervention into Root and Soil Interaction. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 13(2), 72-88. <https://doi.org/10.29244/jitl.13.2.72-88>.
- Jamil, I. R., Putri, A. S., & Suryaatmaja, N. A. A. (2023). Evaluating Green Efficiency of Manufacture Sector and Its Determinants in East Java Province. *East Java Economic Journal*, 7(1), 90-108. <https://doi.org/10.53572/ejavec.v7i1.90>
- Kiatpathomchai, S. (2008). *Assessing Economic and Environmental Efficiency of Rice Production Systems in Southern Thailand: An Application of Data Envelopment Analysis*. [Dissertation, Justus-Liebig University Giessen].
- Ladha, J. K., Pathak, H., Krupnik, T. J., Six, J., & van Kessel, C. (2005). Efficiency of Fertilizer Nitrogen in Cereal Production: Retrospects and Prospects. *Advances in Agronomy*, 87, 85-156. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(05\)87003-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(05)87003-8).
- Laulanié, H. (1993). Le Système de Riziculture Intensive Malgache. *Tropicultura*

11(3), 110 - 114.

- Le, T. L., Lee, P-P., Peng, K.C., & Chung, R. H. (2019). Evaluation of Total Factor Productivity and Environmental Efficiency of Agriculture in Nine East Asian Countries. *Agricultural Economics*, 65(6), 249-258. doi: 10.17221/50/2018-AGRICECON.
- Li, Y., Zhang, W., Ma, L., Huang, G., Oenema, O., Zhang, F., & Dou, Z. (2013). An Analysis of China's Fertilizer Policies: Impacts on the Industry, Food Security, and the Environment. *Journal of Environmental Quality*, 42, 972-981. doi: 10.2134/jeq2012.0465.
- Lin, W., Lin, M., Zhou, H., Wu, H., Li, Z., & Lin, W. (2019). The Effects of Chemical and Organic Fertilizer Usage on Rhizosphere Soil in Tea Orchards. *PLoS ONE*, 14(5), e0217018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217018>
- Liu, J., Zhang, C., Hu, R., Zhu, X., & Cai, J. (2019). Aging of Agricultural Labor Force and Technical Efficiency in Tea Production: Evidence from Meitan County, China. *Sustainability*, 11(22), 6246. <https://doi.org/10.3390/su11226246>
- Mariyono, J., Resosudarmo, B. P., Kompas, T., & Grafton, Q. (2010). 'Understanding Environmental and Social Efficiencies in Indonesian Rice Production. In V. Beckmann, N. H. Dung, X. Shi, M. Spoor, & J. Wesseler (Eds.), *Economic Transition and Natural Resource Management in East and Southeast Asia* (Vol. 1, pp. 161–182). Aachen: Shaker Verlag.
- Mboyerwa, P. A., Kibret, K., Mtakwa, P., & Aschalew, A. (2022). Lowering Nitrogen Rates under the System of Rice Intensification Enhanced Rice Productivity and Nitrogen Use Efficiency in Irrigated Lowland Rice. *Heliyon*, 8(3), e09140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09140>.
- Meeusen, W., & van Den Broeck, J. (1977). Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error. *Int. Econ. Rev.*, 18(2), 435-444. <https://doi.org/10.2307/2525757>
- Menegat, S., Ledo, A., & Tirado, R. (2022). Greenhouse Gas Emissions from Global Production and Use of Nitrogen Synthetic Fertilisers in Agriculture. *Scientific Reports*, 12, 14490. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18773-w>.
- Misselbrook, T. H., van Der Weerden, T. J., Pain, B. F., Jarvis, S. C., Chambers, B. J., Smith, K. A., Phillips, V. R., & Demmers, T. G. M. (2000). Ammonia Emission Factors for UK Agriculture. *Atmospheric Environment*, 34(6), 871-880. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00350-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00350-7).
- Mousaei, M. (2021). The Effect of Farm Counseling on Farmers' Beliefs and Motivation in Sustainable Environmental Protection (Case Study: Wheat Farmers in Behbahan City, Iran). *Journal of Research in Agriculture and Animal Science*, 8(6), 40-49.
- Myrteza, H. (2012). *The Potential Environmental Benefits of Hybrid Rice Varieties*. [Master Thesis, University of Arkansas].
- Nguyen, T. T., Hoang, V-N, & Seo, B. (2012). Cost and Environmental Efficiency of Rice Farms in South Korea. *Agricultural Economics*, 43, 367-376.
- OECD. (2001). *Adoption of Technologies for Sustainable Farming Systems*. OECD.
- OECD. (2018). *The Future of Education and Skills: Education 2030*. OECD.

- Ray, S., & Kumbhakar, S. (2015). *Benchmarking for Performance Evaluation: A Production Frontier Approach*. Springer.
- Reinhard, S., Lovell, C. A. K., & Thijssen, G. (1999). Econometric Estimation of Technical and Environmental Efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms. *American Journal of Agricultural Economics*, 81(1), 44–60.
- Reinhard, S., Lovell, C. A. K., & Thijssen, G. (2002). Analysis of Environmental Efficiency Variation. *American Journal of Agricultural Economics*, 84(4), 1054-1065.
- Rosadillah, R., Fatchiya, A., & Susanto, D. (2017). Penerapan Pengelolaan Tanaman Terpadu Padi Sawah di Kecamatan Toili, Kabupaten Banggai, Sulawesi Tengah. *Jurnal Penyuluhan*, 13(2), 143-156. <https://doi.org/10.25015/penyuluhan.v13i2.15052>.
- Rougoor, C. W., Trip, G., Huirne, R. B. M., & Renkema, J. A. (1998). How to Define and Study Farmers' Management Capacity: Theory and Use in Agricultural Economics. *Agricultural Economics*, 18, 261-272. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.1998.tb00504.x>
- Ruzzante, S., Labarta, R., & Bilton, A. (2021). Adoption of Agricultural Technology in the Developing World: A Meta-Analysis of the Empirical Literature. *World Development*, 146, 105599. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105599>.
- Saelee, W. (2017). Environmental Efficiency Analysis of Thai Rice Farming. [Thesis, University of Reading].
- Scholz, R. W., & Geissler, B. (2018). Feebates for Dealing with Trade-Offs on Fertilizer Subsidies: A Conceptual Framework for Environmental Management. *Journal of Cleaner Production*, 189, 898-909. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.319>
- Sedlacek, C., Giguere, A., & Pjevac, P. (2020). Is Too Much Fertilizer a Problem?. *Front. Young Minds*, 8(63) <https://doi.org/10.3389/frym.2020.00063>
- Septiriana, R. T., & Kusumawardani, D. (2016). Environmental Technical Efficiency Measurement of Processing Industry in East Java in 2006-2009. *Jurnal Ilmu Ekonomi Terapan*, 1(1), 11-28. <https://doi.org/10.20473/jiet.v1i1.1843>
- Sholikah, S., & Kadamanto. (2020). The Analysis of Technical Efficiency of Inbred and Hybrid Lowland Rice Farming Business. *SOCA J.Sos. Ekon. Pertan.*, 14(3), 381-397.
- Stevenson, R. E. (1980) Likelihood Functions for Generalized Stochastic Frontier Estimation. *J. Econom.*, 13(1), 57–66.
- Tauer, L. (1995). Age and Farmer Productivity. *Review of Agricultural Economics*, 17(1), 63-69. <https://doi.org/10.2307/1349655>
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural Sustainability and Intensive Production Practices. *Nature*, 418, 671-677.
- Tho, L. C. B., & Umetsu, C. (2022). Rice Variety and Sustainable Farming: A Case Study in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Challenges*, 8, 100532. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100532>.
- Trang, N., Khai, H., Tu, H., & Hong, N. (2018). Environmental Efficiency of Transformed Farming Systems: A Case Study of Change from Sugarcane to Shrimp in the Vietnamese Mekong Delta. *Forestry Research and Engineering: International Journal*, 2, 54–60. <https://doi.org/10.15406/freij.2018.02.00026>

- Tu, V. H., Can, N. D., Takahashi, Y., Kopp, S. W., & Yabe, M. (2018). Technical and Environmental Efficiency of EcoFriendly Rice Production in the Upstream Region of the Vietnamese Mekong Delta. *Environment, Development and Sustainability*, 21, 2401-2424. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0140-0>
- Varela-Candamio, L., Calvo, N., & Novo-Corti, I. (2018). The Role of Public Subsidies for Efficiency and Environmental Adaptation of Farming: A Multi-Layered Business Model Based on Functional Foods and Rural Women. *Journal of Cleaner Production*, 183, 555-565. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.109>
- Wang, Q., Zhao, Z., Zhou, P., & Zhou, D. (2013). Energy Efficiency and Production Technology Heterogeneity in China: A Meta-Frontier DEA Approach. *Economic Modelling*, 35, 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2013.07.017>
- Wang, Y., Zhu, Y., Zhang, S., & Wang, Y. (2018). What Could Promote Farmers to Replace Chemical Fertilizers with Organic Fertilizers?. *Journal of Cleaner Production*, 199, 882-890. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.222>
- Williamson, O.E. (1998). Transaction Cost Economics: How It Works, Where it is Headed. *De Economist*, 146, 23-58. <https://doi.org/10.1023/A:1003263908567>
- Wu, J., An, Q., Yao, X., & Wang, B. (2014). Environmental Efficiency Evaluation of Industry in China Based on a New Fixed Sum Undesirable Output Data Envelopment Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 74, 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.054>
- Xie, H., & Huang, Y. (2021). Influencing Factors of Farmers' Adoption of Pro-Environmental Agricultural Technologies in China: Meta-Analysis. *Land Use Policy*, 109, 105622. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105622>
- Zhang, R., Ma, W., & Liu, J. (2021). Impact of Government Subsidy on Agricultural Production and Pollution: A Game-Theoretic Approach. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124806. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124806>
- Zhou, J., Liu, Q., & Liang, Q. (2018). Cooperative Membership, Social Capital, and Chemical Input Use: Evidence from China. *Land Use Policy*, 70, 394-401. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.11.001>
- Zulkarnain, R., Djuraidah, A., Sumertajaya, I. M., & Indahwati. (2021). Utilization of Student's t Distribution to Handle Outliers in Technical Efficiency Measurement. *Media Statistika*, 14(1), 56-67. <https://doi.org/10.14710/medstat.14.1.56-67>