

Korelasi dan Analisis Jalur Karakter Perkecambahan dan Karakter Agronomis yang Berkontribusi terhadap Hasil Padi (*Oryza sativa* L.) di Bawah Cekaman Masam

Eggy Akhmad Armandoni¹, Darmawan Saptadi¹, Eries Dyah Mustikarini², Gigih Ibnu Prayoga², Ratna Santi², Budi Waluyo^{1*}

¹Department Budidaya Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang, Jawa Timur, Indonesia

²Jurusan Agroteknologi, FPPB, Universitas Bangka Belitung, Kabupaten Bangka, Kepulauan Bangka Belitung, Indonesia

*Korespondensi: budiwaluyo@ub.ac.id

ABSTRACT

The rice germination process is an important initial step in determining plant development and can be influenced by environmental factors, such as acidity stress. Most of the agricultural land in Indonesia has a low pH value. Therefore, this research was conducted to determine the relationship between the morphological characters of rice germination in the germination phase under acid stress conditions and yields in paddy fields. This research was conducted in October 2022. Germination experiments were carried out at the Plant Breeding Laboratory located at the Faculty of Agriculture, Brawijaya University, while field planting was carried out at the experimental field owned by Universitas Brawijaya, which is located in Jatimulyo Village, Lowokwaru District, Malang City. Germination media was prepared under acidic pH conditions. Simulation of acid rain conditions or simulated acid rain (SAR) was prepared using a buffer solution of sulfuric acid H₂SO₄. The variables observed included genotypic, phenotypic and path analysis correlations carried out using the OPSTAT software. The results of this study showed that the dry weight germination characteristics of shoots under acidic conditions had a high genotypic and phenotypic correlation values and had a high direct effect on yield. The characters of harvesting and flowering ages show the value of the correlation coefficient and a negative direct effect on crop yields.

Keywords: Path Analysis; Acid Stress; Yield, Rice; Germination.

ABSTRAK

Proses perkecambahan padi merupakan langkah awal penting penentu perkembangan tanama dan dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti cekaman kemasaman. Sebagian besar lahan pertanian di Indonesia memiliki nilai pH yang rendah. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara karakter morfologis perkecambahan padi pada fase perkecambahan pada kondisi cekaman masam terhadap hasil panen pada lahan sawah. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2022. Percobaan perkecambahan dilaksanakan di Laboratorium Pemuliaan Tanaman yang berada di Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, sedangkan penanaman di lahan dilaksanakan di lahan percobaan milik Universitas Brawijaya, yang terletak di Kelurahan Jatimulyo, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang. Media perkecambahan dipersiapkan dalam kondisi pH masam. Simulasi kondisi hujan asam atau simulated acid rain (SAR) disiapkan dengan menggunakan larutan buffer asam sulfur H₂SO₄. Variabel yang diamati meliputi analisis korelasi genotipik, fenotipik dan analisis jalur

dilakukan menggunakan software OPSTAT. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa karakter perkecambahan bobot kering tunas pada kondisi masam memiliki nilai korelasi genotipik dan fenotipik dan pengaruh langsung yang tinggi terhadap hasil. Karakter umur panen dan umur berbunga menunjukkan nilai koefisien korelasi dan pengaruh langsung yang negatif terhadap hasil panen.

Kata Kunci: Analisis Jalur; Cekaman Masam; Hasil; Padi; Perkecambahan.

PENDAHULUAN

Varietas padi lahan sawah *wetland* dapat tumbuh dan berproduksi dengan baik dalam kondisi tanah tergenang air dimana air di tanah membatasi proses difusi gas, sedangkan varietas padi dataran tinggi/ gogo dapat tumbuh dengan baik dalam kondisi tanah yang tidak tergenang/ *well-drained* (Yamuangmorn *et al.*, 2020). Penelitian yang dilakukan oleh Datta *et al.* (2017) menunjukkan bahwa menanam padi di lahan kering akan menghasilkan penurunan hasil panen gabah khususnya pada varietas lahan sawah. Sedangkan Yamuangmorn *et al.* (2020) melakukan penelitian dengan menanam varietas padi gogo dan padi sawah pada kondisi lahan tergenang dan tidak tergenang dan mendapatkan hasil yang menunjukkan bahwa varietas padi gogo lebih stabil pada kondisi irigasi yang berbeda dari ekotipe aslinya dibandingkan dengan varietas padi sawah. Sehingga dapat dikatakan bahwa varietas padi gogo dapat ditanam baik pada kondisi lahan irigasi baik maupun kondisi lahan sawah tanpa penurunan hasil gabah. Kemasaman tanah merupakan faktor pembatas pada produksi padi gogo di lahan kering, dimana hampir keseluruhan lahan masam di Indonesia didominasi oleh lahan kering. Menurut Berek (2019) dari keseluruhan lahan masam di Indonesia, 107,36 juta hektarnya merupakan lahan kering masam dan sisanya seluas 14,94 juta hektar merupakan lahan gambut.

pH tanah yang rendah dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman padi, dikarenakan pada kondisi pH tanah yang sangat rendah <4.8 Al^{3+} yang terlarut dalam tanah dapat mencapai tingkat kritis, yaitu sebesar $30\mu M$, yang dapat merusak tanaman padi. Toksisitas Al sering dikaitkan dengan defisiensi fosfor karena tanah dengan konsentrasi Al yang tinggi akan menurunkan ketersediaan P akibat interaksi Al-Fe-fosfat (Ward *et al.*, 2008). Kondisi pH tanah yang rendah akan secara langsung dapat menurunkan pertumbuhan tanaman, akibat dari tingginya aktivitas H^+ (Koyama *et al.*, 2001). Tingginya konsentrasi H^+ akan memicu terjadinya stress oksidatif pada tanaman akibat akumulasi *reactive oxygen species* (ROS) yang tinggi. Untuk mengurangi kerusakan oksidatif yang terjadi, beberapa tanaman merespon dengan meningkatkan aktivitas enzim antioksidan, seperti superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), peroksidase (POD), askorbat peroksidase (APX), glutathione reduktase (GR) dan dehydroascorbate reductase (DR) (Liu *et al.*, 2011). Penelitian yang dilakukan oleh Zhang

et al. (2015) menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi H^+ di akar tanaman padi pada kondisi pH rendah menginduksi ekspresi OsAPX1 dan OsA7 yang lebih tinggi, yang mengakibatkan aktivitas APX dan PM H^+ -ATPase yang tinggi di akar. Hal ini merupakan mekanisme tanaman dalam mengurangi kerusakan oksidatif akibat ROS dan bentuk dari adaptasi akar padi terhadap pH rendah. Berbagai mekanisme ketahanan padi terhadap kondisi pH rendah telah dijelaskan dalam berbagai penelitian, seperti Toleran terhadap kondisi pH rendah pada fase perkecambahan (Wijayanto *et al.*, 2021), Toleran terhadap keracunan Fe (Mustikarini *et al.*, 2021), Sekresi Al melalui asam organik yang dikendalikan oleh OsFRDL4 (Yokosho *et al.*, 2011) Mengurangi penyerapan Fe dengan mengurangi aktivitas Fe reduktase (OsFRO1) dan transportasi Fe (OsIRT1) di pucuk, Membatasi translokasi Fe dengan mengatur ekspresi gen chelator logam (OsDMAS1, OsYSL15, OsYSL2, OsFRDL1) dan Mengurangi stres oksidatif melalui peningkatan aktivitas enzim antioksidan dan metabolit antioksidan (Kabir *et al.*, 2016).

Kondisi tanah masam ini dapat diakibatkan oleh berbagai sebab, salah satunya ialah hujan asam (*acid rain*). Data menunjukkan bahwa sebagian air hujan yang turun di Indonesia dapat disebut sebagai hujan asam. Prihatin *et al.* (2015) telah melakukan pengujian terhadap 31 kejadian hujan, di mana dari total 31 sampel air hujan yang diambil dari daerah yang tersebar di Indonesia, sebanyak 22 di antaranya berada di ambang batas nilai pH air hujan normal yaitu 5,6. Paparan hujan asam yang terus menerus pada tanah dapat mengakibatkan produktivitas tanaman menurun, karena hujan asam dapat meningkatkan tingkat kemasaman tanah (Sagane *et al.*, 2018). Kondisi paparan masam pada saat perkecambahan padi dapat mengganggu kualitas bibit padi yang akan di tanam. Hal ini menunjukkan bahwa metode pengujian pada fase perkecambahan dapat digunakan sebagai metode seleksi awal untuk menentukan genotipe padi yang toleran terhadap pH rendah. Penurunan pH media akibat simulasi hujan asam pada fase perkecambahan benih padi akan mempengaruhi pertumbuhan bibit padi, dan kemudian menurunkan hasil panen padi (Feng, 2000). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara karakter perkecambahan padi pada cekaman masam serta karakter agronomis padi terhadap hasil panen melalui analisis koefisien korelasi dan analisis jalur. Melalui hasil penelitian ini diharapkan dapat mengetahui karakter yang dapat digunakan sebagai kriteria seleksi untuk mendapatkan genotipe padi tahan cekaman masam dan hasil panen tinggi.

METODE

Pengujian ketahanan genotipe padi terhadap cekaman kemasaman dilaksanakan pada bulan Oktober 2022. Pengujian perkecambahan ini dilakukan di Laboratorium Pemuliaan Tanaman yang berada di Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya. Pengujian

penampilan agronomis genotipe padi dilaksanakan pada bulan Oktober 2022. penanaman padi pada lahan sawah untuk mengamati karakter agronomis dilakukan di lahan percobaan milik Universitas Brawijaya, yang terletak di Kelurahan Jatimulyo, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang yang berada pada ketinggian 440-460 m dpl. Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa pH meter, gelas ukur, timbangan analitik, magnetik stirrer, cawan petri, kapas, pipet tetes, cangkul, sabit, meteran, gembor, baki, tali raffia, plastik, jaring, timbangan digital, kamera digital, ajir, label dan alat tulis. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini ialah 10 benih genotipe padi gogo, larutan buffer H_2SO_4 , pupuk kandang, urea, SP36, KCL dan air destilasi. Penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan metode Rancangan Acak Kelompok (RAK). Pada penelitian ini 10 genotipe padi akan digunakan sebagai pembeda. Berikut merupakan kode genotipe padi gogo koleksi Universitas Bangka Belitung yang terdiri dari galur 19I-06-09-23-03, 21B-57-21-21-23, 23A-56-20-07-20, 23A -56-22-20-05, dan 23F-04-10-18-18, serta varietas Danau Gaung, Inpago 8, Inpago 12, PBM UBB 1 dan Rindang. Galur yang digunakan adalah merupakan hasil persilangan persilangan aksesori (Balok dan Mutant M8-GR150-1-9-13) dan varietas unggul nasional (Banyuasin dan Inpago 8).

Penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan metode Rancangan Acak Kelompok (RAK). Pada penelitian ini 10 genotipe padi akan digunakan sebagai pembeda. Berikut merupakan kode genotipe padi gogo yang digunakan. Total Genotipe yang digunakan sebagai perlakuan dalam penelitian ini sebanyak 10 satuan perlakuan yang diulang sebanyak 3 kali sehingga terdapat 30 unit perlakuan. Pada setiap petak perlakuan terdapat 320 tanaman sehingga total populasi tanaman yang digunakan adalah 9.600 tanaman. 19 karakter perkecambah dan agronomis tanaman diamati, yang meliputi; panjang akar kecambah pada kondisi normal (PA_n), panjang akar kecambah pada kondisi masam (PA_m), panjang tunas kecambah pada kondisi normal (PT_n), panjang tunas kecambah pada kondisi masam (PT_m), bobot kering akar kecambah pada kondisi normal (BKA_n), bobot kering akar kecambah pada kondisi masam (BKA_m), bobot kering tunas kecambah pada kondisi normal (BKT_n), bobot kering tunas kecambah pada kondisi masam (BKT_m), tinggi tanaman (TT), jumlah anakan per rumpun (JA), panjang daun bendera (PDB), jumlah anakan produktif (JAP), panjang malai (PM), jumlah gabah per malai (JGM), bobot 1000 biji (BB), umur berbunga (UB), umur panen (UP) dan hasil panen per hektar (HP)

Data kuantitatif dianalisis dengan menggunakan analisis korelasi genotipik, korelasi fenotipik dan analisis jalur. Korelasi genotipik, korelasi fenotipik dan analisis jalur dilakukan untuk menjelaskan faktor tertentu yang bertanggung jawab terhadap hasil panen berdasarkan nilai korelasi yang dibagi menjadi efek langsung dan tidak



Gunung Djati Conference Series, Volume 33 (2023)

Prosiding Seminar Nasional Pertanian 2023

ISSN : 2774-6585

Website: <https://conferences.uinsgd.ac.id/>

langsung. Analisis statistik dilakukan dengan menggunakan OPSTAT (Sheoran *et al.*, 1998).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Koefisien korelasi antara karakter perkecambahan dan agronomis

Tabel 2. Koefisien korelasi genotipik (diagonal bawah) dan koefisien korelasi fenotipik (diagonal atas) diantara 19 karakter perkecambahan dan agronomis genotipe padi gogo

| | PA _n | PA _m | PT _n | PT _m | BKA _n | BKA _m | BKT _n | BKT _m | TT | JA | PDB | JAP | PM | JGM | BB | UB | UP | HP |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| PA _n | | 0.593** | 0.644** | 0.538** | 0.235 ^{NS} | -0.396* | 0.209 ^{NS} | 0.043 ^{NS} | 0.123 ^{NS} | -0.238 ^{NS} | 0.193 ^{NS} | -0.234 ^{NS} | 0.092 ^{NS} | 0.008 ^{NS} | 0.063 ^{NS} | 0.154 ^{NS} | 0.083 ^{NS} | -0.003 ^{NS} |
| PA _m | 0.647** | | 0.244 ^{NS} | 0.296 ^{NS} | 0.049 ^{NS} | -0.433* | 0.041 ^{NS} | -0.240 ^{NS} | 0.382* | -0.383* | 0.219 ^{NS} | -0.443* | 0.450* | -0.101 ^{NS} | 0.026 ^{NS} | 0.402* | 0.186 ^{NS} | -0.318 ^{NS} |
| PT _n | 0.725** | 0.231 ^{NS} | | 0.778** | 0.557** | 0.020 ^{NS} | 0.619** | 0.514** | -0.102 ^{NS} | -0.091 ^{NS} | 0.183 ^{NS} | -0.056 ^{NS} | -0.128 ^{NS} | -0.164 ^{NS} | 0.144 ^{NS} | -0.299 ^{NS} | -0.252 ^{NS} | 0.527** |
| PT _m | 0.664** | 0.283 ^{NS} | 0.828** | | 0.533** | 0.202 ^{NS} | 0.665** | 0.489** | 0.298 ^{NS} | -0.400* | 0.405* | -0.328 ^{NS} | 0.061 ^{NS} | -0.265 ^{NS} | 0.296 ^{NS} | -0.175 ^{NS} | -0.267 ^{NS} | 0.328 ^{NS} |
| BKA _n | 0.201 ^{NS} | -0.081 ^{NS} | 0.607** | 0.558** | | 0.112 ^{NS} | 0.725** | 0.486** | 0.132 ^{NS} | -0.163 ^{NS} | 0.388* | -0.185 ^{NS} | 0.132 ^{NS} | -0.072 ^{NS} | 0.138 ^{NS} | -0.414* | -0.288 ^{NS} | 0.633** |
| BKA _m | -0.513** | -0.533** | -0.045 ^{NS} | 0.172 ^{NS} | 0.291 ^{NS} | | 0.296 ^{NS} | 0.098 ^{NS} | -0.141 ^{NS} | -0.071 ^{NS} | -0.125 ^{NS} | -0.064 ^{NS} | -0.317 ^{NS} | -0.114 ^{NS} | 0.420* | -0.231 ^{NS} | -0.247 ^{NS} | 0.216 ^{NS} |
| BKT _n | 0.284 ^{NS} | 0.055 ^{NS} | 0.641** | 0.724** | 0.825** | 0.400* | | 0.618** | 0.190 ^{NS} | -0.267 ^{NS} | 0.476** | -0.200 ^{NS} | 0.079 ^{NS} | -0.488** | 0.026 ^{NS} | -0.624** | -0.487** | 0.514** |
| BKT _m | 0.089 ^{NS} | -0.326 ^{NS} | 0.651** | 0.518** | 0.629** | 0.136 ^{NS} | 0.758** | | -0.003 ^{NS} | -0.001 ^{NS} | 0.346 ^{NS} | 0.084 ^{NS} | -0.134 ^{NS} | -0.303 ^{NS} | -0.283 ^{NS} | -0.693** | -0.536** | 0.583** |
| TT | 0.128 ^{NS} | 0.365* | -0.176 ^{NS} | 0.330 ^{NS} | 0.134 ^{NS} | -0.185 ^{NS} | 0.175 ^{NS} | 0.002 ^{NS} | | -0.764** | 0.841** | -0.733** | 0.880** | 0.035 ^{NS} | 0.061 ^{NS} | 0.113 ^{NS} | -0.121 ^{NS} | -0.222 ^{NS} |
| JA | -0.356 ^{NS} | -0.610** | -0.020 ^{NS} | -0.549** | -0.291 ^{NS} | 0.325 ^{NS} | -0.451* | -0.005 ^{NS} | -1.077** | | -0.655** | 0.946** | -0.721** | 0.079 ^{NS} | -0.189 ^{NS} | -0.090 ^{NS} | 0.041 ^{NS} | 0.280 ^{NS} |
| PDB | 0.161 ^{NS} | 0.142 ^{NS} | 0.117 ^{NS} | 0.531** | 0.449* | -0.149 ^{NS} | 0.545** | 0.515** | 0.899** | -1.029** | | -0.594** | 0.772** | -0.100 ^{NS} | -0.106 ^{NS} | -0.290 ^{NS} | -0.438* | 0.072 ^{NS} |
| JAP | -0.308 ^{NS} | -0.746** | 0.050 ^{NS} | -0.454* | -0.317 ^{NS} | 0.353 ^{NS} | -0.426* | 0.110 ^{NS} | -1.093** | 1.002** | -0.969** | | -0.725** | -0.005 ^{NS} | -0.177 ^{NS} | -0.096 ^{NS} | 0.053 ^{NS} | 0.239 ^{NS} |
| PM | 0.105 ^{NS} | 0.482** | -0.285 ^{NS} | 0.099 ^{NS} | 0.149 ^{NS} | -0.465** | 0.044 ^{NS} | -0.152 ^{NS} | 0.915** | -1.006** | 0.761** | -1.078** | | 0.066 ^{NS} | 0.045 ^{NS} | 0.166 ^{NS} | 0.020 ^{NS} | -0.238 ^{NS} |
| JGM | 0.070 ^{NS} | -0.132 ^{NS} | -0.201 ^{NS} | -0.298 ^{NS} | -0.101 ^{NS} | -0.191 ^{NS} | -0.513** | -0.323 ^{NS} | 0.016 ^{NS} | 0.269 ^{NS} | -0.171 ^{NS} | 0.173 ^{NS} | 0.028 ^{NS} | | 0.047 ^{NS} | 0.414* | 0.215 ^{NS} | 0.016 ^{NS} |
| BB | 0.088 ^{NS} | 0.022 ^{NS} | 0.118 ^{NS} | 0.415* | 0.259 ^{NS} | 0.530** | -0.009 ^{NS} | -0.387* | -0.074 ^{NS} | 0.090 ^{NS} | -0.314 ^{NS} | 0.052 ^{NS} | -0.277 ^{NS} | 0.044 ^{NS} | | 0.304 ^{NS} | 0.205 ^{NS} | 0.126 ^{NS} |
| UB | 0.216 ^{NS} | 0.487** | -0.306 ^{NS} | -0.236 ^{NS} | -0.489** | -0.350 ^{NS} | -0.733** | -0.956** | 0.220 ^{NS} | -0.219 ^{NS} | -0.224 ^{NS} | -0.386* | 0.391* | 0.554** | 0.457* | | 0.785** | -0.613** |
| UP | 0.219 ^{NS} | 0.363* | -0.302 ^{NS} | -0.492** | -0.454* | -0.525** | -0.792** | -1.072** | -0.045 ^{NS} | -0.044 ^{NS} | -0.305 ^{NS} | -0.199 ^{NS} | 0.380* | 0.528** | 0.269 ^{NS} | 0.929** | | -0.512** |
| HP | 0.053 ^{NS} | -0.388* | 0.608** | 0.401* | 0.786** | 0.340 ^{NS} | 0.546** | 0.832** | -0.376* | 0.430* | -0.021 ^{NS} | 0.470** | -0.545** | 0.025 ^{NS} | 0.084 ^{NS} | -0.649** | -0.734** | |

Keterangan : panjang akar kecambah pada kondisi normal (PA_n), panjang akar kecambah pada kondisi masam (PA_m), panjang tunas kecambah pada kondisi normal (PT_n), panjang tunas kecambah pada kondisi masam (PT_m), bobot kering akar kecambah pada kondisi normal (BKA_n), bobot kering akar kecambah pada kondisi masam (BKA_m), bobot kering tunas kecambah pada kondisi normal (BKT_n), bobot kering tunas kecambah pada kondisi masam (BKT_m), tinggi tanaman (TT), jumlah anakan per rumpun (JA), panjang daun bendera (PDB), jumlah anakan produktif (JAP), panjang malai (PM), jumlah gabah per malai (JGM), bobot 1000 biji (BB), umur berbunga (UB), umur panen (UP) dan hasil panen per hektar (HP).

Penelitian ini menunjukkan bahwa karakter yang diuji memiliki nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang beragam, yaitu nilai negatif, positif dan tidak berkorelasi (Tabel 1). Karakter yang memiliki nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang sangat signifikan dan positif terhadap hasil panen ialah panjang tunas kecambah pada kondisi normal (0.608**, 0,527**), bobot kering akar kecambah pada kondisi normal (0.786**, 0,633**), bobot kering tunas pada kondisi normal (0.546**, 0,514**) dan bobot kering tunas kecambah pada kondisi masam (0.823**, 0,583**). Waktu umur berbunga (-0.649**, -0,613**) dan umur panen (-0.734**, -0,512**) tanaman memiliki nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang sangat signifikan dan negatif terhadap hasil panen tanaman padi. Nilai korelasi antar karakter memungkinkan pemulia untuk dapat mengetahui karakter agronomis yang saling berhubungan untuk melakukan perbaikan genetik khususnya pada variabel hasil panen tanaman (Augustina *et al.*, 2013). Hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa karakter perkecambahan pada kondisi media normal, yaitu panjang tunas kecambah dan bobot kering akar kecambah memiliki nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang signifikan dan positif terhadap hasil panen padi. Damara *et al.* (2020) menemukan hasil serupa pada tanaman ercis dimana karakter perkecambahan yang diamati memiliki nilai korelasi fenotipik dan genotipik yang positif dan signifikan terhadap hasil panen tanaman. Nilai korelasi yang positif antara dua karakter menandakan bahwa peningkatan pada karakter yang lain akan diikuti dengan peningkatan karakter lainnya (Onyia *et al.*, 2019), sehingga korelasi yang signifikan dan positif ini menunjukkan bahwa karakter perkecambahan dapat digunakan sebagai indeks seleksi yang dapat menentukan hasil panen tanaman.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa karakter berat kering tunas pada kondisi cekaman masam menunjukkan nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang sangat signifikan dan positif terhadap hasil panen padi. hal ini menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara kemampuan kecambah pada kondisi masam terhadap hasil panen tanaman. Proses perkecambahan dan pembibitan tanaman padi dapat dipengaruhi oleh perubahan lingkungan, seperti tingkat kemasaman tanah (Sreesaeng *et al.*, 2021). Padi merupakan tanaman yang biasanya dibudidayakan melalui proses pindah tanam, dimana benih melalui proses perkecambahan dan pembibitan di lahan terpisah terlebih dahulu. Kemampuan ketahanan genotipe padi terhadap kondisi pH rendah pada fase pembibitan menjadi sangat penting guna mendukung pertumbuhan dan hasil panen yang maksimum. Pengujian ketahanan beberapa genotipe padi gogo terhadap lahan masam melalui screening pada fase perkecambahan telah dilakukan sebelumnya oleh Wijayanto *et al.*, (2021), yang mendapatkan bahwa genotipe Pae Huko toleran terhadap cekaman pH rendah jika dibandingkan dengan genotipe lainnya. Genotipe Pae Huko dianggap toleran terhadap cekaman kemasaman karena menunjukkan nilai *relative*

growth rate, keseragaman tumbuh, indeks vigor, dan panjang akar yang paling tinggi dibandingkan dengan varietas lainnya. Wijayanto *et al.* (2021) juga menyampaikan bahwa berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan menunjukkan bahwa masing-masing genotipe yang berbeda memiliki respon yang berbeda di bawah kondisi pH rendah

Hasil panen ialah karakter yang merupakan hasil ekspresi dari asosiasi berbagai karakter pendukung lainnya (Usman *et al.*, 2017). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa bobot biji bernas menunjukkan nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang sangat signifikan dan positif terhadap hasil panen tanaman padi. Hasil ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Sary *et al.* (2022) yang mendapatkan hasil bahwa karakter agronomis tanaman padi, seperti jumlah gabah per malai dan bobot biji bernas diketahui memiliki hubungan yang kuat dalam menentukan hasil panen tanaman padi. Oladosu *et al.* (2018) juga mengungkapkan bahwa beberapa karakter agronomis tanaman seperti tinggi tanaman, anakan per rumpun, malai per rumpun, panjang malai, jumlah bulir isi dan bulir isi per malai, berat 100 bulir, dan berat total bulir per malai merupakan karakter yang penting untuk diamati dalam program pemuliaan tanaman. Tidak jarang pengetahuan tentang nilai korelasi antar karakter tanaman terhadap hasil panen dijadikan dasar pemilihan karakter agronomis yang tepat untuk dijadikan sebagai indeks seleksi.

Analisis jalur antara karakter perkecambahan dan agronomis terhadap hasil

Hasil analisis jalur berdasarkan nilai koefisien korelasi genotipik dan fenotipik disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3. Karakter bobot kering akar pada kondisi normal (0.677, 0.254) dan berat kering tunas pada kondisi cekaman masam (0.558, 0.279) memiliki pengaruh positif langsung terbesar terhadap hasil panen baik berdasarkan korelasi genotipik dan fenotipik. Karakter agronomis tinggi tanaman memiliki nilai pengaruh langsung yang positif terhadap hasil panen melalui korelasi genotipik (0.993). Karakter umur panen (-0.457, -0.294) dan umur berbunga (-0.477, -0.309) menunjukkan pengaruh tidak langsung yang paling rendah baik melalui korelasi genotipik dan fenotipik.

Karakter bobot kering akar pada kondisi normal memiliki nilai pengaruh langsung yang tinggi terhadap hasil (0.677) yang nilainya mendekati nilai koefisien korelasinya (0.786). Jumlah dari pengaruh langsung dan tidak langsung pada satu karakter ke karakter lainnya merupakan nilai dari koefisien korelasi dari hubungan kedua karakter tersebut (Wright, 1968). Maka nilai pengaruh langsung ini dapat diartikan sebagai hubungan sebenarnya antara karakter bobot kering akar pada kondisi normal terhadap hasil panen.

Tabel 3. Analisis jalur melalui korelasi genotipik pengaruh langsung (tebal) dan tidak langsung pada 19 karakter perkecambahan dan agronomis genotipe padi gogo

| | PA _n | PA _m | PT _n | PT _m | BKA _n | BKA _m | BKT _n | BKT _m | TT | JA | PDB | JAP | PM | JGM | BB | UB | UP | Rg |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------------------|
| PA _n | 0.140 | -0.008 | 0.160 | -0.244 | 0.136 | 0.182 | -0.068 | 0.050 | 0.127 | -0.075 | -0.180 | -0.035 | 0.015 | 0.014 | 0.043 | -0.099 | -0.105 | 0.053 ^{NS} |
| PA _m | 0.090 | -0.012 | 0.051 | -0.104 | -0.055 | 0.189 | -0.013 | -0.182 | 0.362 | -0.129 | -0.159 | -0.085 | 0.069 | -0.027 | 0.011 | -0.222 | -0.173 | -0.388* |
| PT _n | 0.101 | -0.003 | 0.220 | -0.304 | 0.411 | 0.016 | -0.154 | 0.363 | -0.174 | -0.004 | -0.131 | 0.006 | -0.041 | -0.041 | 0.058 | 0.140 | 0.144 | 0.608** |
| PT _m | 0.093 | -0.003 | 0.182 | -0.367 | 0.377 | -0.061 | -0.173 | 0.289 | 0.327 | -0.116 | -0.595 | -0.052 | 0.014 | -0.060 | 0.203 | 0.108 | 0.234 | 0.401* |
| BKA _n | 0.028 | 0.001 | 0.134 | -0.205 | 0.677 | -0.103 | -0.198 | 0.351 | 0.133 | -0.062 | -0.502 | -0.036 | 0.021 | -0.020 | 0.127 | 0.223 | 0.216 | 0.786** |
| BKA _m | -0.072 | 0.006 | -0.010 | -0.063 | 0.197 | -0.354 | -0.096 | 0.076 | -0.184 | 0.069 | 0.167 | 0.040 | -0.067 | -0.039 | 0.260 | 0.160 | 0.250 | 0.340 ^{NS} |
| BKT _n | 0.040 | -0.001 | 0.141 | -0.266 | 0.558 | -0.142 | -0.240 | 0.423 | 0.174 | -0.095 | -0.610 | -0.048 | 0.006 | -0.103 | -0.005 | 0.335 | 0.377 | 0.546** |
| BKT _m | 0.012 | 0.004 | 0.143 | -0.190 | 0.426 | -0.048 | -0.182 | 0.558 | 0.002 | -0.001 | -0.576 | 0.013 | -0.022 | -0.065 | -0.189 | 0.437 | 0.511 | 0.832** |
| TT | 0.018 | -0.004 | -0.039 | -0.121 | 0.091 | 0.066 | -0.042 | 0.001 | 0.993 | -0.228 | -1.006 | -0.124 | 0.131 | 0.003 | -0.036 | -0.101 | 0.022 | -0.376* |
| JA | -0.050 | 0.007 | -0.005 | 0.201 | -0.197 | -0.115 | 0.108 | -0.003 | -1.070 | 0.212 | 1.152 | 0.114 | -0.144 | 0.054 | 0.044 | 0.100 | 0.021 | 0.430* |
| PDB | 0.022 | -0.002 | 0.026 | -0.195 | 0.304 | 0.053 | -0.131 | 0.287 | 0.892 | -0.218 | -1.119 | -0.110 | 0.109 | -0.034 | -0.154 | 0.103 | 0.145 | -0.021 ^{NS} |
| JAP | -0.043 | 0.009 | 0.011 | 0.167 | -0.214 | -0.125 | 0.102 | 0.062 | -1.085 | 0.212 | 1.085 | 0.114 | -0.155 | 0.035 | 0.026 | 0.177 | 0.095 | 0.470** |
| PM | 0.015 | -0.006 | -0.063 | -0.036 | 0.101 | 0.165 | -0.011 | -0.085 | 0.909 | -0.213 | -0.852 | -0.122 | 0.144 | 0.006 | -0.135 | -0.179 | -0.181 | -0.545** |
| JGM | 0.010 | 0.002 | -0.044 | 0.109 | -0.068 | 0.068 | 0.123 | -0.180 | 0.016 | 0.057 | 0.191 | 0.020 | 0.004 | 0.202 | 0.021 | -0.253 | -0.252 | 0.025 ^{NS} |
| BB | 0.012 | 0.000 | 0.026 | -0.152 | 0.176 | -0.188 | 0.002 | -0.216 | -0.073 | 0.019 | 0.351 | 0.006 | -0.040 | 0.009 | 0.489 | -0.209 | -0.128 | 0.084 ^{NS} |
| UB | 0.030 | -0.006 | -0.067 | 0.087 | -0.331 | 0.124 | 0.176 | -0.533 | 0.219 | -0.046 | 0.251 | -0.044 | 0.056 | 0.112 | 0.224 | -0.457 | -0.443 | -0.649** |
| UP | 0.031 | -0.004 | -0.067 | 0.180 | -0.307 | 0.186 | 0.190 | -0.598 | -0.045 | -0.009 | 0.341 | -0.023 | 0.055 | 0.106 | 0.131 | -0.425 | -0.477 | -0.734** |

Residual: -0.15312

Keterangan : panjang akar kecambah pada kondisi normal (PA_n), panjang akar kecambah pada kondisi masam (PA_m), panjang tunas kecambah pada kondisi normal (PT_n), panjang tunas kecambah pada kondisi masam (PT_m), bobot kering akar kecambah pada kondisi normal (BKA_n), bobot kering akar kecambah pada kondisi masam (BKA_m), bobot kering tunas kecambah pada kondisi normal (BKT_n), bobot kering tunas kecambah pada kondisi masam (BKT_m), tinggi tanaman (TT), jumlah anakan per rumpun (JA), panjang daun bendera (PDB), jumlah anakan produktif (JAP), panjang malai (PM), jumlah gabah per malai (JGM), bobot 1000 biji (BB), umur berbunga (UB), umur panen (UP) dan hasil panen per hektar (HP), koefisien korelasi genotipik (rg).

Tabel 4. Analisis jalur melalui korelasi fenotipe pengaruh langsung (tebal) dan tidak langsung pada 19 karakter perkecambahan dan agronomis fenotipe padi gogo

| | PA _n | PA _m | PT _n | PT _m | BKA _n | BKA _m | BKT _n | BKT _m | TT | JA | PDB | JAP | PM | JGM | BB | UB | UP | rp |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------------------|
| PA _N | 0.042 | -0.131 | 0.164 | 0.038 | 0.060 | 0.010 | 0.026 | 0.012 | 0.024 | -0.131 | -0.142 | 0.022 | 0.058 | 0.002 | 0.015 | -0.045 | -0.026 | -0.003 ^{NS} |
| PA _m | 0.025 | -0.220 | 0.062 | 0.021 | 0.013 | 0.011 | 0.005 | -0.067 | 0.074 | -0.211 | -0.161 | 0.042 | 0.281 | -0.023 | 0.006 | -0.118 | -0.057 | -0.318 ^{NS} |
| PT _n | 0.027 | -0.054 | 0.255 | 0.055 | 0.142 | 0.000 | 0.076 | 0.143 | -0.020 | -0.050 | -0.134 | 0.005 | -0.080 | -0.037 | 0.034 | 0.088 | 0.078 | 0.527 ^{**} |
| PT _m | 0.022 | -0.065 | 0.198 | 0.071 | 0.136 | -0.005 | 0.081 | 0.136 | 0.058 | -0.220 | -0.297 | 0.031 | 0.038 | -0.060 | 0.069 | 0.052 | 0.082 | 0.328 ^{NS} |
| BKA _n | 0.010 | -0.011 | 0.142 | 0.038 | 0.254 | -0.003 | 0.089 | 0.135 | 0.026 | -0.090 | -0.284 | 0.018 | 0.083 | -0.016 | 0.032 | 0.122 | 0.089 | 0.633 ^{**} |
| BKA _m | -0.017 | 0.095 | 0.005 | 0.014 | 0.029 | -0.025 | 0.036 | 0.027 | -0.027 | -0.039 | 0.092 | 0.006 | -0.198 | -0.026 | 0.098 | 0.068 | 0.076 | 0.216 ^{NS} |
| BKT _n | 0.009 | -0.009 | 0.158 | 0.047 | 0.184 | -0.007 | 0.122 | 0.172 | 0.037 | -0.147 | -0.349 | 0.019 | 0.049 | -0.110 | 0.006 | 0.183 | 0.150 | 0.514 ^{**} |
| BKT _m | 0.002 | 0.053 | 0.131 | 0.035 | 0.124 | -0.002 | 0.075 | 0.279 | -0.001 | 0.000 | -0.254 | -0.008 | -0.084 | -0.068 | -0.066 | 0.204 | 0.165 | 0.583 ^{**} |
| TT | 0.005 | -0.084 | -0.026 | 0.021 | 0.034 | 0.003 | 0.023 | -0.001 | 0.193 | -0.420 | -0.617 | 0.070 | 0.550 | 0.008 | 0.014 | -0.033 | 0.037 | -0.222 ^{NS} |
| JA | -0.010 | 0.084 | -0.023 | -0.028 | -0.041 | 0.002 | -0.033 | 0.000 | -0.148 | 0.550 | 0.480 | -0.091 | -0.450 | 0.018 | -0.044 | 0.026 | -0.013 | 0.280 ^{NS} |
| PDB | 0.008 | -0.048 | 0.047 | 0.029 | 0.099 | 0.003 | 0.058 | 0.097 | 0.162 | -0.360 | -0.734 | 0.057 | 0.482 | -0.022 | -0.025 | 0.085 | 0.135 | 0.072 ^{NS} |
| JAP | -0.010 | 0.098 | -0.014 | -0.023 | -0.047 | 0.002 | -0.024 | 0.023 | -0.142 | 0.520 | 0.436 | -0.096 | -0.453 | -0.001 | -0.041 | 0.028 | -0.016 | 0.239 ^{NS} |
| PM | 0.004 | -0.099 | -0.033 | 0.004 | 0.034 | 0.008 | 0.010 | -0.037 | 0.170 | -0.396 | -0.566 | 0.069 | 0.625 | 0.015 | 0.011 | -0.049 | -0.006 | -0.238 ^{NS} |
| JGM | 0.000 | 0.022 | -0.042 | -0.019 | -0.018 | 0.003 | -0.060 | -0.084 | 0.007 | 0.043 | 0.073 | 0.000 | 0.041 | 0.225 | 0.011 | -0.122 | -0.066 | 0.016 ^{NS} |
| BB | 0.003 | -0.006 | 0.037 | 0.021 | 0.035 | -0.010 | 0.003 | -0.079 | 0.012 | -0.104 | 0.078 | 0.017 | 0.028 | 0.011 | 0.234 | -0.089 | -0.063 | 0.126 ^{NS} |
| UB | 0.006 | -0.089 | -0.076 | -0.012 | -0.105 | 0.006 | -0.076 | -0.193 | 0.022 | -0.049 | 0.213 | 0.009 | 0.104 | 0.093 | 0.071 | -0.294 | -0.242 | -0.613 ^{**} |
| UP | 0.003 | -0.041 | -0.064 | -0.019 | -0.073 | 0.006 | -0.060 | -0.149 | -0.023 | 0.022 | 0.322 | -0.005 | 0.012 | 0.049 | 0.048 | -0.231 | -0.309 | -0.512 ^{**} |

Residual: 0.13399

Keterangan : panjang akar kecambah pada kondisi normal (PA_n), panjang akar kecambah pada kondisi masam (PA_m), panjang tunas kecambah pada kondisi normal (PT_n), panjang tunas kecambah pada kondisi masam (PT_m), bobot kering akar kecambah pada kondisi normal (BKA_n), bobot kering akar kecambah pada kondisi masam (BKA_m), bobot kering tunas kecambah pada kondisi normal (BKT_n), bobot kering tunas kecambah pada kondisi masam (BKT_m), tinggi tanaman (TT), jumlah anakan per rumpun (JA), panjang daun bendera (PDB), jumlah anakan produktif (JAP), panjang malai (PM), jumlah gabah per malai (JGM), bobot 1000 biji (BB), umur berbunga (UB), umur panen (UP) dan hasil panen per hektar (HP), koefisien korlasi fenotipik (rp).

Analisis jalur (path analysis) dilakukan untuk memisahkan nilai korelasi menjadi efek langsung (direct) dan tidak langsung (indirect) melalui karakter-karakter lainnya untuk memudahkan interpretasi yang baik dalam menentukan pengaruh satu karakter terhadap karakter lainnya (Güneri *et al.*, 2016). Beberapa karakter perkecambahan seperti bobot kering akar pada kondisi normal dan berat kering tunas pada kondisi cekaman masam memiliki pengaruh positif langsung terbesar terhadap hasil panen baik berdasarkan korelasi genotipik dan fenotipik. Kemampuan perkecambahan tanaman merupakan faktor kritikal bagi tanaman yang dapat menentukan nilai hasil panen yang dihasilkan (Zhang *et al.*, 2022). Kemampuan perkecambahan tanaman padi juga menentukan kemampuan tanaman selama masa pertumbuhan. Perkecambahan merupakan langkah awal penting yang merupakan perkembangan benih menjadi tanaman baru dan kondisi lingkungan yang mendukung akan dapat memacu pertumbuhan tanaman yang lebih baik (Chaipanich *et al.*, 2020).

KESIMPULAN

Karakter panjang tunas kecambah pada kondisi normal, bobot kering akar kecambah pada kondisi normal, bobot kering tunas pada kondisi normal dan bobot kering tunas kecambah pada kondisi masam memiliki nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang positif terhadap hasil panen. Waktu umur berbunga dan umur panen tanaman memiliki nilai korelasi genotipik dan fenotipik yang sangat signifikan dan negatif terhadap hasil panen tanaman padi. Karakter bobot kering akar pada kondisi normal dan berat kering tunas pada kondisi cekaman masam memiliki pengaruh positif langsung terbesar terhadap hasil panen baik berdasarkan korelasi genotipik dan fenotipik. Karakter agronomis tinggi tanaman memiliki nilai pengaruh langsung yang positif terhadap hasil panen baik melalui korelasi genotipik dan fenotipik. Karakter umur panen dan umur berbunga menunjukkan pengaruh tidak langsung yang paling rendah baik melalui korelasi genotipik dan fenotipik.

DAFTAR PUSTAKA

- Augustina U. A., Iwunor O. P., and Ijeoma O.R. (2013). Heritability and Character Correlation Among Some Rice Genotypes for Yield and Yield Components. *J. Plant Breed. Genet.* 01(02), 73-84.
- Berek, A.K. (2019). The Potential of Biochar as an Acid Soil Amendment to Support Indonesian Food and Energy Security -A Review. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.* 42(2), 745-759.



- Chaipanich, V., Roberts, D., Yenchon, S., Te-chato, S., & Divakaran, M. (2020). In vitro seed germination and plantlet regeneration of *Vanilla siamensis*: An endemic species in Thailand. *ScienceAsia*. 46, 315. 10.2306/scienceasia1513-1874.2020.040.
- Damara, H. L., Santika, I. W., & Waluyo B. (2020). Keragaman dan Korelasi Karakteristik Fisik Biji dengan Perkecambahan dan Karakter Hasil pada Kacang Ercis (*Pisum sativum* L.). *Plantropica: Journal of Agricultural Science*. 5(1), 74-84.
- Datta, A., Ullah, H., & Ferdous, Z. (2017). Water Management in Rice. In *Rice Production Worldwide* (pp. 255–277). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_11
- Feng, Z. . (2000). Impacts and control strategies of acid rain deposition on terrestrial ecosystems in China. *Engineering Science in China*, 2, 5–11.
- Güneri O. I., Göktaş A. and Kayalı U. (2017). Path analysis and determining the distribution of indirect effects via simulation, *Journal of Applied Statistics*, 44(7), 1181-1210, DOI: 10.1080/02664763.2016.1201793
- Kabir, A. H., Begum, M. C., Haque, A., Amin, R., Swaraz, A. M., Haider, S. A., Paul, N. K., & Hossain, M. M. (2016). Genetic variation in Fe toxicity tolerance is associated with the regulation of translocation and chelation of iron along with antioxidant defence in shoots of rice. *Functional Plant Biology*, 43(11), 1070. <https://doi.org/10.1071/FP16068>
- Koyama, H., Toda, T., & Hara, T. (2001). Brief exposure to low-pH stress causes irreversible damage to the growing root in *Arabidopsis thaliana*: pectin–Ca interaction may play an important role in proton rhizotoxicity. *Journal of Experimental Botany*, 52(355), 361–368. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.355.361>
- Liu, T.T., Wu P., Wang L. H., & Zhou Q. (2011). Response of Soybean Seed Germination to Cadmium and Acid Rain. *Biol. Trace Elem. Res.* 144(1–3), 1186–1196. doi: 10.1007/s12011-011-9053-6.
- Mustikarini, E. D., Prayoga, G. I., Santi, R., Khodijah, S., & Lestari, T. (2021). Tolerance of F6 Red Rice Lines against Iron (Fe) Stress. *Jurnal Lahan Suboptimal: Journal of Suboptimal Lands*, 10(1), 64–77. <https://doi.org/10.36706/JLSO.10.1.2021.511>
- Oladosu Y., Rafii M. Y., Magaji U.,1 Abdullah N., Miah G., Chukwu S. C., Hussin G., Ramli A., & and Isiaka Kareem. Genotypic and Phenotypic Relationship among Yield Components in Rice under Tropical Conditions. *BioMed Research*

International. 2018, 1-10

- Onyia V. N., Chukwudi U. P., Ezea A. C., Atugwu A. I. & Ene C. O. (2019). Correlation and path coefficient analyses of yield and yield components of eggplant (*Solanum melongena*) in a coarse-textured Ultisol. *Information Processing in Agriculture*. 7, 173 - 181.
- Prihatin, J., Corebima, A. D., Ariffin, & Gofur, A. (2015). The Effect of Exposure of Mulberry to Acid Rain on the Defects Cocoon of Bombyxmori L. *Procedia Environmental Sciences*, 23, 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.01.029>
- Sagane, S.G., Nagmote S. R., Gaikwad P. R., & Jadhao R. G. (2018). Effect of Acid Rain on Seed Germination. *Int. j. curr. eng. sci. res.* 5(5), 120-123.
- Sary D N., Badriyah L., Sihombing R. D., Syauqy T. A., Mustikarini E. D., Prayoga G. I., Santi R., & Waluyo B. (2022). Estimation of Heritability and Association Analysis of Agronomic Traits Contributing to Yield on Upland Rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Breed. Biotech.* 10, 232-243
- Sheoran O. P., Tonk D. S., Kaushik L. S., Hasija R. C., & Pannu R. S. (1998). Statistical software package for agricultural research workers. Recent advances in information theory, statistics & computer applications by DS Hooda & RC Hasija. *Department of Mathematics Statistics, CCS HAU, Hisar* 139-143.
- Sreesaenga, J., Kongchiua P., & Nakasathien S. (2021). Preliminary responses of some Thai rice cultivars to simulated acid rain stress during seed germination. *Sci. Asia* 47, 303-311.
- Usman M. G., Rafii M. Y., Martini M.Y, Oladosu Y., & Kashiani P. (2017). Genotypic character relationship and phenotypic path coefficient analysis in chili pepper genotypes grown under tropical condition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(4), 1164–1171
- Ward, J. T., Lahner, B., Yakubova, E., Salt, D. E., & Raghothama, K. G. (2008). The Effect of Iron on the Primary Root Elongation of Arabidopsis during Phosphate Deficiency. *Plant Physiology*, 147(3), 1181–1191. <https://doi.org/10.1104/pp.108.118562>
- Wijayanto, T., Susanti, Y., Rahni, N. M., Tufaila, M., & Rembon, F. S. (2021). Seedling-stage screening method for tolerance of upland rice genotypes to low pH stress. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 782(3), 032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/782/3/032030>
- Wright S. (1986). Genetic and biometric foundation, Vol. 1, The University of Chicago Press, Chicago.
- Yamuangmorn, S., Rinsinjoy, R., Lordkaew, S., Dell, B., & Prom-u-thai, C. (2020).

Responses of Grain Yield and Nutrient Content to Combined Zinc and Nitrogen Fertilizer in Upland and Wetland Rice Varieties Grown in Waterlogged and Well-Drained Condition. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(4), 2112–2122. <https://doi.org/10.1007/s42729-020>

00279-x

Yokosho, K., Yamaji, N., & Ma, J. F. (2011). An Al-inducible MATE gene is involved in external detoxification of Al in rice. *The Plant Journal*, 68(6), 1061–1069. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2011.04757.x>

Zhang, Y.-K., Zhu, D.-F., Zhang, Y.-P., Chen, H.-Z., Xiang, J., & Lin, X.-Q. (2015). Low pH-Induced Changes of Antioxidant Enzyme and ATPase Activities in the Roots of Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings. *PLOS ONE*, 10(2), e0116971. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116971>

Zhang K, Khan Z., Liu J., Luo T., Zhu K., Hu L., Bi J., & Luo L. (2022). Germination and Growth Performance of Water-Saving and Drought-Resistant Rice Enhanced by Seed Treatment with Wood Vinegar and Biochar under Dry Direct-Seeded System. *Agronomy*. 12(5), 1223. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051223>