



MIKROBA RIZOSFER PADA TANAMAN SAAT KEKERINGAN

- Nio Song Ai**
- Daniel Peter Mantilen Ludong**

**UNSRAT PRESS
2023**

MIKROBA RIZOSFER PADA TANAMAN SAAT KEKERINGAN

OLEH:

**- Nio Song Ai
- Daniel Peter Mantilen Ludong**

UNSRAT PRESS

2023

MIKROBA RIZOSFER PADA TANAMAN SAAT KEKERINGAN

Rancang Sampul : Art Division Unsrat Press
Editor : Benedicta Chrysilla Mantilen Ludong
Judul Buku : **MIKROBA RIZOSFER PADA TANAMAN SAAT
KEKERINGAN**
Penulis : - **Nio Song Ai**
- **Daniel Peter Mantilen Ludong**
Penerbit : **Unsrat Press**
Jl. Kampus Unsrat Bahu Manado 95115
Email : **percetakanunsrat@gmail.com**
ISBN : 978-623-8410-07-1 (PDF)

Cetakan 2023

Dilarang mengutip dan atau memperbanyak tanpa izin tertulis dari penerbit sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apa pun baik cetak, fotoprint, mikrofilm dan sebagainya

PRAKATA

Puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulisan buku referensi ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku referensi yang berjudul “Mikroba Rizosfer pada Tanaman Saat Kekeringan” menyajikan informasi yang berkaitan dengan sifat resistensi kekeringan pada tanaman berdasarkan pendekatan metagenomik. Informasi tentang struktur komunitas mikroba rizosfer pada tanaman saat kekeringan merupakan sumber daya genetik yang bermanfaat dalam perbaikan resistensi tanaman. Buku ini dapat dipakai sebagai salah satu referensi dalam kegiatan pembelajaran bidang biologi yang berkaitan dengan mekanisme resistensi tanaman terhadap kekeringan yang melibatkan mikroba rizosfer yang dominan hidup di sekitar perakaran tanaman.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada orang tua kami, keluarga kami, para guru kami, sanak saudara kami, para kolega kami, para mahasiswa kami dan semua pihak yang memberikan motivasi dan inspirasi dalam penulisan buku referensi ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian kepada Masyarakat Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi atas hibah dana skema Penelitian Fundamental Reguler Tahun

Anggaran 2023 dengan judul “Analisis Molekuler Sifat Resistensi Kekeringan dan Banjir pada Varietas Padi Lokal Sulawesi Utara Menggunakan Pendekatan Transkriptomik dan Metagenomik untuk Mendukung Ketahanan Pangan Nasional” yang memfasilitasi penulisan buku referensi tersebut. Saran dan masukan dari berbagai pihak sangat diharapkan untuk penyempurnaan buku referensi tersebut. Harapan kami buku referensi ini akan bermanfaat dalam upaya mencerdaskan generasi penerus bangsa Indonesia khususnya di bidang biologi.

Manado, Oktober 2023
Penulis;

Nio Song Ai & Daniel P M Ludong

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II EFEK KEKERINGAN TERHADAP FISIOLOGI TANAMAN	5
BAB III EFEK KEKERINGAN TERHADAP MIKROORGANISME RIZOSFER	11
BAB IV EFEK KEKERINGAN TERHADAP MIKROORGANISME DI AKAR	15
4.1 <i>Plant Growth-Promoting Rhizobacteria</i> (PGPR)	15
4.2 <i>Root Endophytes</i>	16
4.3 <i>Arbuscular Mycorrhizal Fungi</i> (AMF)	17
BAB V STRUKTUR KOMUNITAS MIKROBA RIZOSFER PADA PADI LOKAL SULAWESI UTARA SAAT KEKERINGAN	21
5.1 Perlakuan Kekeringan pada Padi Lokal Sulawesi Utara	22
5.2 Struktur Komunitas Filum Mikroba Rizosfer pada Padi Lokal Sulawesi Utara Saat Kekeringan	26
BAB VI APLIKASI MIKROBA TOLERAN KEKERINGAN DI MASA DEPAN	31
DAFTAR PUSTAKA	39
DAFTAR ISTILAH (GLOSARIUM)	45
BIOGRAFI PENULIS	49

DAFTAR GAMBAR

2.1	Bagan sederhana yang menunjukkan jalur sinyal yang tergantung pada ABA dan tidak tergantung pada ABA sebagai respon tanaman terhadap kekeringan	9
5.1	Tanaman padi pada tahap empat daun yang berkembang penuh	25
5.2	Tanaman padi Superwin yang tidak diairi (kanan) dan diairi sampai 100% kapasitas lapang (kiri)	25
5.3	Sampling akar tanaman padi Superwin setelah 14 hari perlakuan	26
5.4	Kelimpahan relatif mikroba rizosfer pada tanaman padi Superwin yang tidak diairi (wd) dan yang diairi 100% kapasitas lapang (ww) pada tingkat filum	28

DAFTAR TABEL

4.1	Daftar mikroba yang menurunkan efek cekaman kekeringan pada beberapa tanaman	19
5.1	Bagan penelitian yang menunjukkan tahap-tahap penelitian	24
5.2	Perbandingan kelimpahan relatif mikroba rizosfer pada tanaman padi Superwin yang tidak diairi (wd) dan yang diairi 100% kapasitas lapang (ww) pada tingkat filum	29

BAB I.

PENDAHULUAN

Air mempunyai beberapa fungsi penting bagi tumbuhan, di antaranya sebagai pelarut, membentuk koloid dalam protoplasma, memberikan tekanan yang merata di seluruh dinding sel, sistem angkutan unsur-unsur hara dari tanah dan bahan-bahan organik hasil metabolisme dan pengatur temperatur. Air merupakan bahan baku fotosintesis yang menyediakan oksigen dan makanan untuk keberlangsungan hidup semua organisme yang ada di bumi.

Perubahan iklim akibat pemanasan global berdampak luas terhadap berbagai aspek kehidupan, termasuk sektor pertanian, khususnya subsektor tanaman pangan yang sensitif terhadap kekeringan akibat kekurangan air. Kejadian iklim ekstrem berupa kekeringan yang tidak menentu mengakibatkan peningkatan puso pada tanaman. Ketersediaan pangan bagi seluruh rakyat Indonesia merupakan salah satu dampak yang perlu diantisipasi pada masa pandemi Covid-19 ini. Salah satu program Gerakan Ketahanan Pangan yang dicanangkan oleh Kementerian Pertanian Republik Indonesia ialah penguatan cadangan dan sistem logistik pangan yang dapat dilakukan dengan cara penguatan cadangan beras oleh pemerintah. Upaya aktif untuk mengantisipasi perubahan iklim tersebut dan sekaligus mendukung program ketahanan pangan

dilakukan melalui strategi adaptasi. Strategi adaptasi yang dapat diterapkan meliputi penyesuaian waktu tanam, penggunaan varietas unggul tahan kekeringan, rendaman dan salinitas serta pengembangan teknologi pengelolaan air (Surmaini *et al.*, 2011).

Pemanfaatan *microbiome* banyak digunakan dalam manajemen cekaman kekeringan pada tanaman, karena ramah lingkungan dan biayanya murah. Fraksi tanah yang langsung dipengaruhi oleh sekresi akar secara biokimia yang meliputi lapisan tanah sekitar 1-5 mm dari permukaan akar dinamakan rhizosphere (Hatman dan Tringe, 2019). Mikroba tanah yang berasosiasi secara kolektif di rhizosfer (bacteria, archaea, fungi, virus dan oomycetes) beserta keseluruhan genom yang berasosiasi disebut *microbiome* rhizosfer (Matur dan Roy 2020). Rhizosfer mengandung beberapa bakteri dan mikroorganisme lain dengan tingkat keragaman tinggi yang memanfaatkan sel-sel tanaman yang sudah mati serta eksudat akar (protein dan gula yang dilepaskan oleh akar) melalui proses rhizodeposisi. *Microbiome* akar mencakup berbagai mikroba yang bermanfaat seperti *plant growth-promoting rhizobacteria* (PGPRs), bakteri dan jamur endofit and jamur mikroriza. Semua mikroba tersebut berperan penting dalam merangsang pertumbuhan, perkembangan dan toleransi tanaman terhadap kekeringan. Di samping itu mikroba tersebut juga berperan dalam siklus unsur-unsur hara dengan memfasilitasi pengambilan unsur N dan P untuk

menunjang modifikasi arsitektur akar saat kekeringan yang juga dipengaruhi oleh sekresi fitohormon IAA, GA, sitokinin (Egamberdieva *et al.*, 2017; Lata *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2019).

Microbiome rizosfer berperan dalam merangsang pertumbuhan, perkembangan dan toleransi terhadap cekaman pada tanaman. Saat kekeringan mikroba ini juga membantu dalam daur ulang nutrisi dengan cara memfasilitasi pengambilan unsur nitrogen dan fosfor serta membantu perubahan arsitektur akar (Glick, 2012). Kekeringan meningkatkan pertumbuhan mikroba resisten kekeringan (Actinobacteria dan Chloroflexi) dan menurunkan jumlah Acidobacteria dan Deltaproteobacteria. Perubahan *microbiome* akar sangat mendukung adaptasi tanaman saat kekeringan. Penurunan emisi CO₂ dan reduksi H₂ di rizosfer gandum berdampak pada penurunan populasi bakteri, tetapi tidak berdampak pada populasi jamur yang lebih tahan terhadap kekeringan. Kolonisasi mikroba endofit di akar meningkatkan kemampuan tanaman untuk mengatasi rendahnya ketersediaan air. *Microbacterium*, *Arthrobacter koreensis*, and *Rhodococcus* sp. merupakan genus mikroba yang toleran kekeringan karena mampu memproduksi trehalose intraselular pada saat kekeringan. Peranan fitohormon dan eksopolisakarida yang disekresikan oleh tanaman pada strain bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus endophyticus*, dan *Bacillus tequilensis* saat kekeringan

menyebabkan kecambah Arabidopsis toleran terhadap cekaman osmotik (Matur dan Roy, 2020).

BAB II.

EFEK KEKERINGAN TERHADAP FISIOLOGI TANAMAN

Kekeringan merupakan cekaman utama pada sebagian besar tanaman pangan yang menurunkan produksi hasil panen. Cekaman ini berkaitan erat dengan aktivitas ribulosa bifosfat karboksilase oksigenase (RUBISCO) dan enzim-enzim fotosintetik lainnya yang terjadi bersamaan dengan peningkatan akumulasi *reactive oxygen species* (ROS) akibat kerusakan mesin enzim antioksidan. Kondisi ini menghambat pembentukan dan produksi biji (Matur dan Roy, 2020). Tetapi penyesuaian osmotik terjadi pada varietas yang resisten terhadap kekeringan dengan cara akumulasi gula terlarut, prolin, glisin betain, K^+ dan solut lainnya (Nio *et al.*, 2011; Nio *et al.*, 2018a), sehingga proses fisiologis tetap berlangsung secara normal. Respon awal terhadap kekeringan terjadi melalui jalur *hormonal signalling* yang dikontrol oleh asam absisat (ABA) dan asam jasmonat. Sinyal ABA berperan penting dalam menutupnya stomata dengan menghambat masuknya K^+ ke dalam sel penutup, sehingga mengurangi laju transpirasi tanaman saat tercekam (Matur dan Roy, 2020).

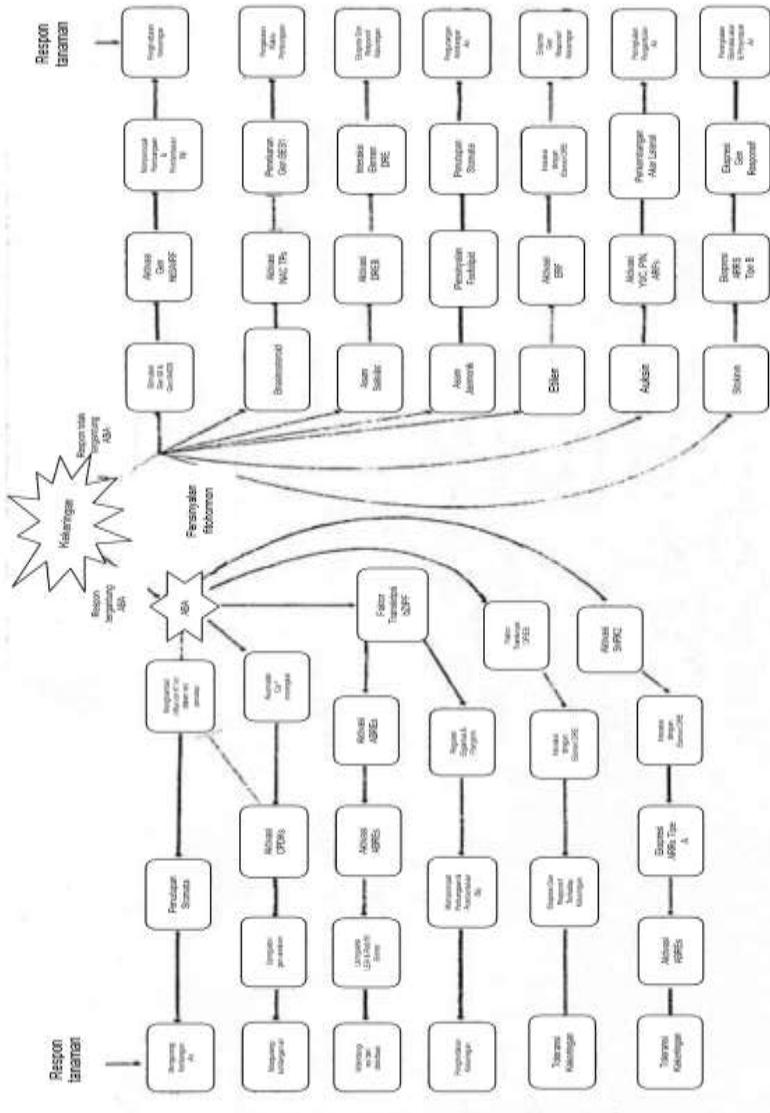
Semua tanaman merespons dengan cara yang hampir sama terhadap cekaman kekeringan, tetapi strategi yang

dilakukan tersebut menentukan tingkat resistensi. Gejala primer pada tanaman yang kekurangan air ialah layu dan penuaan. Ullah *et al.* (2017) melaporkan adanya beberapa parameter kunci sebagai respon tanaman terhadap kekeringan yang mencakup perkembangan akar, penutupan stomata, fotosintesis, *ROS scavenging*, akumulasi ABA and *jasmonic acid* (JA). Bartletta *et al.* (2016) melaporkan bahwa koordinasi antara karakteristik fisiologis seperti penutupan stomata, titik layu dan konduktivitas hidrolik batang dapat meminimalkan kerusakan fungsional yang diinduksi oleh kekeringan sesuai dengan ketersediaan air. Zahoor *et al.* (2017) juga melaporkan bahwa kultivar yang sensitif dengan kadar K^+ yang rendah menunjukkan peningkatan akumulasi prolin, enzim-enzim antioksidan, dan efisiensi fotosistem II saat K^+ dengan dosis tinggi diaplikasikan secara eksogen. Liang *et al.* (2017) melaporkan adanya akumulasi gula, asam amino dan lipid dan antioksidan yang lebih tinggi pada akar, sehingga akar merupakan pusat respon tanaman terhadap kekeringan. Perubahan arsitektur akar saat kekeringan menentukan pemanfaatan air tanah secara optimal dan perkembangan akar ini ditentukan oleh koordinasi kerja fitohormon, seperti brasinosteroid, etilen dan auksin, sedangkan ABA dan sitokinin berperan dalam proses regulasi (Mathur dan Roy, 2020). Nio *et al.* (2018a) melaporkan bahwa K^+ , glisin betain and prolin berkontribusi terhadap penyesuaian osmotik di

daun pada level tanaman utuh, sedangkan Na^+ and prolin berkontribusi pada penyesuaian osmotik di daun pada level jaringan saat kekeringan pada gandum. Beberapa respon fisiologis tanaman lainnya terhadap kekeringan ialah peningkatan pertumbuhan akar dan penurunan perkecambahan biji, pertumbuhan awal, kandungan air relatif, dan kandungan klorofil pada beberapa varietas *finger millet* (Mukami *et al.*, 2019), penurunan kandungan klorofil total dan klorofil a pada daun padi lokal Sulawesi Utara sebagai respon terhadap kekeringan yang diinduksi oleh polietilen glikol (PEG) 8000 pada tingkat tanaman utuh (Nio *et al.*, 2019); penurunan kandungan air relatif daun padi lokal Sulawesi Utara sebagai respon terhadap kekeringan yang diinduksi oleh polietilen glikol (PEG) 8000 pada tingkat jaringan (Nio *et al.*, 2021). Tipe akar dan mikroba yang berasosiasi menentukan pembentukan *rhizosheath*, yakni lapisan tanah yang tetap kuat melekat pada sistem akar. Pembentukan *rhizosheath* meningkat pada kekeringan tingkat moderat akibat aktivitas bakteri yang mendegradasi 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) sebagai strategi toleransi terhadap kekeringan (Zhang *et al.*, 2020).

Respon tanaman terhadap kekeringan diatur melalui jalur sinyal yang tergantung dan tidak tergantung pada ABA. Respon tanaman terhadap kekeringan yang diatur melalui jalur sinyal yang tergantung ABA dan mencakup pengurangan kehilangan air,

perlindungan sel-sel mengatasi dehidrasi, penghindaran kekeringan dan toleransi kekeringan (Mathur dan Roy, 2020). ABA merupakan metabolit sentral yang mengatur pergerakan stomata, pembungaan awal, pengaturan biji, penyesuaian osmotik dan lain-lain. ABA berinteraksi secara langsung maupun tidak langsung dengan faktor-faktor transkripsi seperti DREB (*dehydration responsive element binding*), bZIP (*basic leucine zipper domain*), ABREs (*ABA-responsive elements*) and DREs (*drought regulatory elements*) untuk menginduksi gen-gen target untuk toleransi kekeringan. Respon tanaman terhadap kekeringan yang diatur melalui jalur sinyal yang tidak tergantung pada ABA meliputi penghindaran kekeringan, pengaturan waktu berbunga, ekspresi gen-gen yang responsif terhadap kekeringan, pengurangan kehilangan air, peningkatan pengambilan air, peningkatan biomassa akar dan pengambilan air (Mathur dan Roy, 2020). Beberapa fitohormon selain ABA seperti auksin, sitokinin, etilen, asam jasmonat, asam salisilat, dan brassinosteroid serta beberapa faktor transkripsi terlibat dalam jalur yang tidak tergantung pada ABA (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Bagan sederhana yang menunjukkan jalur sinyal yang tergantung pada ABA dan tidak tergantung pada ABA sebagai respon tanaman terhadap kekeringan (Matur dan Roy, 2020)

BAB III.

EFEK KEKERINGAN TERHADAP MIKROORGANISME RIZOSFER

Rizosfer atau daerah di sekitar akar tanaman, merupakan tempat berkumpulnya beberapa mikroflora tanah baik yang menguntungkan dan berbahaya. Mikroflora ini ditarik secara kimia oleh eksudat akar yang mengandung gula, asam amino dan nutrisi lain (Glick, 2012). Dua macam interaksi antara akar tanaman dan mikroorganisme akan mengatur pertumbuhan, perkembangan dan status kesehatan. Tetapi asosiasi antara mikroba tanah yang berbeda dan daerah rizosfer sangat spesifik untuk tanaman tertentu. Hal ini secara bersamaan juga dipengaruhi oleh tipe tanah, pH, kelembaban, kondisi nutrisi dan iklim (Azarbad *et al.*, 2018). Kondisi tersebut menggambarkan karakteristik rhizobiota yang sangat bervariasi dan dinamis untuk berubah pada kondisi tercekam. Beberapa studi mendokumentasikan perubahan populasi mikroba rizosfer sebagai respon terhadap kekeringan, temperatur, CO₂, dan lain-lain (Williams *et al.*, 2018; Rasmussen *et al.*, 2019). Peningkatan populasi mikroba berperan penting dalam aklimatisasi sebagian besar tanaman pada kondisi tercekam (Hu *et al.*, 2018). Eksudat akar sangat mempengaruhi komunitas mikroba rizosfer pada kondisi lingkungan tercekam dan analisis *microbiome* akar dapat

menunjukkan fungsi ekosistem (Williams dan de Vries, 2020). Oleh sebab itu eksplorasi *microbiome* dilakukan untuk mencari populasi mikroba baru yang dapat menguntungkan untuk meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman seiring dengan perubahan iklim.

Santos-Medellin *et al.* (2017) berusaha melacak keanekaragaman *microbiome* akar tanaman padi yang ditumbuhkan pada berbagai macam kondisi tanah. Tanpa memperhitungkan tipe tanah dan kultivar, kekeringan mengubah populasi mikroflora dengan menunjang pertumbuhan Actinobacteria dan Chloroflexi yang relatif resisten terhadap kekeringan. Hal ini terjadi bersamaan dengan berkurangnya populasi Acidobacteria dan Deltaproteobacteria. Perubahan *microbiome* akar sebagai respon terhadap kekeringan terutama berkontribusi pada adaptasi tanaman saat kondisi tercekam (Santos-Medellin *et al.*, 2017). Moreno-Glvan *et al.* (2020) mengisolasi 22 strain *Bacillus* spp. dari rizosfer *guinea grass* (*Megathyrsus maximus*). Di antara 22 strain tersebut, *B. amyloliquefacien*, *B. aryabhatai* dan *B. licheniformis* merupakan strain yang paling toleran dan dapat memperbaiki resistensi tanaman terhadap kekeringan. Strain bakteri lain seperti *Bacillus*, *Enterobacter*, *Moraxella* dan *Pseudomonas* yang diisolasi dari *gum arabic* (*Acacia arabica*) juga memperbaiki resistensi tanaman terhadap kekeringan yang ditunjukkan dengan

adanya peningkatan jumlah anakan dan *spikelet* gandum (Raheem *et al.*, 2018). Perubahan kelimpahan mikroflora rizosfer sangat dipengaruhi oleh status air tanah (diairi dan tidak diairi) dan hal ini tampaknya mengatur aspek fungsional rizosfer. Penurunan emisi CO₂ dan reduksi H₂ pada rizosfer gandum yang kekurangan air mengakibatkan penurunan populasi bakteri, tetapi tidak menurunkan populasi jamur yang lebih resisten terhadap perubahan konsentrasi air. Selain itu kolonisasi mikroba endofit di akar menunjukkan kemampuannya untuk mengatasi ketersediaan air yang rendah (Azarbad *et al.*, 2018).

Komposisi *rhizomicrobiome* tergantung pada arsitektur akar dan penambahan strain bakteri spesifik pada tanah. Luo *et al.* (2019) melaporkan adanya perbaikan pertumbuhan tanaman dan plastisitas akar *Arabidopsis thaliana* setelah *Sphingomonas* sp. ditambahkan ke rizosfer yang mengakibatkan perubahan populasi mikroba yang sudah ada sebelumnya (*indigenous microbial population*). Inokulasi *Sphingomonas* mengakibatkan berlimpahnya Betaproteobacteria, Burkholderiaceae, dan Rhizobiaceae pada saat cekaman kekeringan. Vilchez *et al.* (2016) melaporkan bahwa *Microbacterium*, *Arthrobacter koreensis*, dan *Rhodococcus* sp. merupakan genus yang paling toleran dan dapat dikaitkan dengan level produksi trehalose saat perlakuan kekeringan. Strain mikroba tersebut merupakan produsen IAA, GA, SA, ABA, ACC deaminase dan enzim

antioksidan. Adanya zat pengatur tumbuh yang dihasilkan dan toleransi mikroba terhadap kekeringan berperan dalam peningkatan strategi *survival* yang lebih baik pada tanaman yang diinokulasi pada saat kekeringan. Ghosh *et al.* (2019) melaporkan peran fitohormon dan eksopolisakarida yang disekresikan oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa*, *Bacillus endophyticus* dan *Bacillus tequilensis* berperan dalam toleransi terhadap stres osmotik pada kecambah *Arabidopsis*.

BAB IV.

EFEK KEKERINGAN TERHADAP MIKROORGANISME DI AKAR

4.1 *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR)

PGPR mencakup suatu kelompok bakteri penting yang hidup di dekat permukaan akar atau secara spesifik di rizosfer. Strain-strain PGPR ini mampu untuk memproduksi IAA, solubilisasi fosfat, mempunyai aktivitas ACC deaminase dan produksi *siderophore* atau senyawa yang mempunyai afinitas tinggi dengan berat molekul kecil yang berperan dalam pengkelatan besi (Fe^{3+}) disekresikan oleh mikroorganisme seperti bakteri dan jamur dan terutama berfungsi untuk transportasi besi di membran sel. Strain-strain PGPR memperbaiki toleransi tanaman pangan dengan meningkatkan akumulasi solut kompatibel seperti prolin dan glisin betain, menambah produksi metabolit sekunder dan juga menginduksi ekspresi banyak gen spesifik tanaman. Akhir-akhir ini eksplorasi populasi PGPR pada tanaman saat kondisi tercekam menunjukkan kreativitas mikroorganisme-mikroorganisme tersebut untuk menerjemahkan *induced systemic tolerance* (IST) (Tabel 4.1; Vurukonda *et al.*, 2016). Biosintesis osmolit dan enzim antioksidan pada tanaman saat kekeringan dapat ditingkatkan dengan aplikasi PGPR. Mitigasi (tindakan mengurangi dampak bencana) kekeringan oleh

PGPR diamati pada tanaman gandum yang diinokulasi dengan *Klebsiella* sp., *Enterobacter ludwigii* dan *Flavobacterium* sp. Tanaman gandum yang diinokulasi dengan strain-strain PGPR juga menunjukkan pertumbuhan vegetatif yang lebih baik, kandungan air relatif yang lebih tinggi, kandungan malondialdehida (MDA) yang rendah, akumulasi prolin dan metabolit-metabolit lain terkait stress yang meningkat (Tabel 4.1; Gontia-Mishra *et al.*, 2016).

4.2 Root Endophytes

Endofit merupakan kelompok organisme khusus yang terdapat dalam jaringan tanaman seperti akar, tajuk atau daun, yang tidak berdampak negatif pada tanaman inang. Beberapa endofit dari kelompok bakteri dan jamur berperan penting dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan. Govindasamy *et al.* (2020) melaporkan inokulasi tanaman sorgum yang mengalami kekeringan dengan bakteri endofitik akar, seperti *Ochrobactrum* sp., *Microbacterium* sp., *Enterobacter* sp. dan *Enterobacter cloacae* meningkatkan pertumbuhan dan penyesuaian osmotik. Tanaman yang diinokulasi mengalami peningkatan akumulasi solut kompatibel seperti prolin dan hal ini disebabkan oleh *upregulation* gen-gen untuk biosintesis prolin seperti *SbP5CS 1* dan *SbP5CS 2* (*Pyrroline-5-carboxylate synthase genes*) (Tabel 4.1). Selanjutnya Meenaksi *et al.* (2019)

mengobservasi tiga macam bakteri endofit dari kelompok *Bacillus* yang diisolasi dari varietas padi gogo (*upland rice*) dapat mengurangi dampak kekeringan pada tanaman gandum. Tanaman gandum yang diinokulasi menunjukkan peningkatan kandungan air relatif, adanya aktivitas enzim-enzim antioksidan serta peningkatan akumulasi gula dan prolin saat kekeringan (Tabel 4.1). Di samping itu inokulasi jamur endofit juga berperan dalam toleransi tanaman terhadap kekeringan, salah satunya *Piriformospora indica*. Studi tentang analisis proteom dan metabolik pada *P. indica* yang diinokulasikan pada tanaman *barley* yang mengalami kekeringan menunjukkan ekspresi beberapa gen yang meregulasi sintesis protein sinyal cekaman, transporter, enzim-enzim dalam jalur metabolik yang penting, otofagi dan protein-protein *up-regulation* yang terlibat dalam proteksi tanaman terhadap cekaman oksidatif (Tabel 4.1; Ghaffari *et al.* 2019). Inokulasi *P. indica* pada kecambah padi saat kekeringan meningkatkan pengambilan nutrisi (Zn dan P) dan juga meningkatkan pertumbuhan dan biomassa (Tabel 4.1; Saddique *et al.* 2018).

4.3 Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)

Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) merupakan endofit akar yang sangat terspesialisasi dan berasosiasi dengan banyak tanaman. AMF ini melindungi tanaman secara efektif terhadap

berbagai macam cekaman lingkungan seperti yang ditunjukkan oleh beberapa contoh berikut ini. Begum *et al.* (2019) melaporkan tanaman jagung yang diinokulasi dengan AMF menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik, laju fotosintesis yang lebih tinggi, kandungan pigmen fotosintesis yang lebih tinggi dan pengambilan nutrisi yang meningkat. Di samping itu terjadi peningkatan akumulasi solut kompatibel yang memelihara status air pada tanaman (Tabel 4.1). Chareesri *et al.* (2020) melaporkan toleransi kekeringan yang dimediasi oleh AMF pada tanaman padi terjadi melalui peningkatan konsentrasi fosfat dan IAA. AMF secara signifikan mempengaruhi proteom beberapa genotipe gandum yang mengalami kekeringan. Ekspresi diferensial menunjukkan protein *upregulation* yang terlibat dalam pemeliharaan integritas dinding sel, biosintesis karbohidrat, sedangkan faktor-faktor terkait cekaman lainnya, seperti enzim-enzim yang terlibat dalam produksi etilen menurun (Tabel 4.1).

Tabel 4.1 Daftar mikroba yang menurunkan efek cekaman kekeringan pada beberapa tanaman

Microbes	Crop plants	Reference
PGPRs		
<i>Pseudomonas putida</i> strain FBKV2	<i>Zea mays</i> L.	Vurukonda <i>et al.</i> (2016)
<i>Klebsiella</i> sp., <i>Enterobacter ludwigii</i> , <i>Flavobacterium</i> sp.	<i>Triticum</i> sp.	Gontia-Mishra <i>et al.</i> (2016)
<i>Bacillus cereus</i>	<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench	Saad & Abo-Kura (2018)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Enterobacter cloacae</i> , <i>Achromobacter xylooxidans</i> , <i>Leclercia adecarboxylata</i>	<i>Zea mays</i> L.	Danish <i>et al.</i> (2020)
Endophytes		
<i>Piriformospora indica</i>	<i>Oryza sativa</i> L. <i>Hordeum vulgare</i> L.	Saddique <i>et al.</i> (2018) Ghaffari <i>et al.</i> (2019)
<i>Bacillus lentus</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Bacillus cereus</i>	<i>Oryza sativa</i> L.	Meenaksi <i>et al.</i> (2019)
<i>Ochrobactrum</i> sp. strain EB-165, <i>Microbacterium</i> sp. strain EB-65, <i>Enterobacter</i> sp. strain EB-14, <i>Enterobacter cloacae</i> strain EB-48	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	Govindasamy <i>et al.</i> (2020)
Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)		
<i>Glomus mosseae</i>	<i>Triticum</i> sp.	Bernando <i>et al.</i> (2017)
<i>Glomus versiforme</i>	<i>Zea mays</i> L.	Begum <i>et al.</i> (2019)
<i>Funneliformis mosseae</i> , <i>F. geosporus</i> , <i>Claroideoglomus claroideum</i> , <i>Glomus microaggregatum</i> , <i>Rhizophagus irregularis</i>	<i>Oryza sativa</i> L.	Charesri <i>et al.</i> (2020)

BAB V.

STRUKTUR KOMUNITAS MIKROBA RIZOSFER PADA PADI LOKAL SULAWESI UTARA SAAT KEKERINGAN

Air merupakan bahan baku fotosintesis yang menyediakan oksigen dan makanan untuk keberlangsungan hidup semua organisme yang ada di bumi. Perubahan iklim akibat pemanasan global berdampak luas terhadap berbagai aspek kehidupan, termasuk sektor pertanian, khususnya subsektor tanaman pangan yang sensitif terhadap kekurangan air. Kejadian iklim ekstrem berupa kekeringan dan banjir yang tidak menentu mengakibatkan peningkatan puso pada tanaman.

Padi dapat tumbuh di daerah dengan rata-rata curah hujan 200 mm per bulan atau lebih, dengan suhu optimum 23°C dan pH tanah berkisar antara empat sampai dengan tujuh (Salman, 2014). Tiga varietas padi yang dikenal ialah padi hibrida, padi unggul, dan padi lokal. Padi lokal merupakan varietas yang dapat beradaptasi di daerah tertentu, umumnya memiliki umur panen yang lebih lama dengan hasil produksi yang rendah (3-5 t/ha) dibandingkan dengan varietas padi lainnya (Irawan et al., 2008). Tanaman padi memiliki tiga fase pertumbuhan, antara lain fase vegetatif (awal pertumbuhan sampai terbentuknya bakal malai/primordia), fase reproduktif (primordia sampai pembungaan),

dan pematangan (pembungaan sampai gabah matang) (Salman, 2014). Varietas padi lokal Sulawesi Utara yang digunakan adalah Superwin dan perlakuan kekeringan diberikan pada fase vegetatif.

5.1 Perlakuan Kekeringan pada Padi Lokal Sulawesi Utara

Penelitian dalam Rancangan Acak Lengkap dengan dua perlakuan dan tiga ulangan ini dilakukan di rumah tanaman dengan menggunakan varietas padi lokal Sulawesi Utara, yaitu Superwin. Penelitian ini mengidentifikasi mikroba rizosfer di daerah perakaran padi lokal Superwin saat kekeringan sebagai bagian dari mekanisme resistensi tanaman terhadap kekeringan untuk melengkapi hasil penelitian terdahulu yang mengevaluasi karakter morfofisiologis.

Tahap penelitian ini mencakup persiapan, perlakuan serta pengambilan data dan analisis data. Kegiatan persiapan meliputi penyiapan bibit padi dan media di polybag, penanaman bibit serta pemeliharaan tanaman. Padi ditanam di media campuran tanah taman, kompos dan sekam (5:1:1) dalam polybag dan dipelihara sampai tanaman padi mempunyai empat daun yang berkembang penuh sebelum perlakuan kekeringan selama 14 hari diaplikasikan (Gambar 5.1). Kekeringan pada fase vegetatif dilakukan selama 14 hari yang meliputi kontrol (diairi sampai 100% kapasitas lapang) dan tidak diairi (0% kapasitas lapang) (Nio *et al.*, 2018b). Tanaman padi kontrol dan diberi perlakuan

kekeringan setelah 14 hari perlakuan dapat dilihat pada Gambar 5.2. Respons pada Superwin terhadap kekeringan dievaluasi secara molekuler dengan analisis metagenomik yang menggunakan sampel akar. Analisis metagenomik dilakukan untuk memperoleh struktur komunitas mikroba rizosfer tanaman (daerah di sekitar akar tanaman) yang merupakan tempat berkumpulnya berbagai mikroba tanaman yang menguntungkan dan merugikan yang ditarik secara kimia oleh eksudat akar yang mengandung gula, asam amino dan nutrisi lainnya (Glick, 2012). Pengambilan sampel akar tanaman kontrol dan perlakuan kekeringan dilakukan setelah perlakuan kekeringan berakhir (Gambar 5.3). Sebelum mengambil sampel akar, batu, sampah atau rumput harus dibersihkan dari permukaan tanah. Selanjutnya, sampel tanah topsoil pada kedalaman 0-20 cm diambil dengan menggunakan sekop yang steril atau mengambil sampel akar dengan cara mencabut tanaman. Akar dikibas-kibaskan dengan kuat dengan tangan untuk menghilangkan *bulk soil* (Romano *et al.*, 2020). Keragaman mikroba rizosfer pada sampel akar dianalisis dengan metode NGS (*next-generation sequencing*) di PT Genetika Science Indonesia, Jakarta. Metode NGS yang digunakan ialah *amplicon sequencing* berdasarkan amplifikasi gen-gen marker filogenetik, yakni gen-gen RNA dari subunit kecil ribosom (16S rRNA), dan diikuti dengan analisis

bioinformatika (Romano *et al.*, 2020). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada bagan penelitian di bawah ini (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Bagan penelitian yang menunjukkan tahap-tahap penelitian

Kegiatan	Metode	Referensi Metode
Persiapan	<ul style="list-style-type: none"> • Penyiapan bibit padi • Pengisian media dalam pot • Penanaman bibit • Pemeliharaan tanaman sampai tahap 4 daun (4 minggu) 	Nio <i>et al.</i> (2018b)
Perlakuan	<p>Kekeringan</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tidak diiri • Diiri 100% kapasitas lapang (kontrol) 	Nio <i>et al.</i> (2018b)
Pengambilan dan analisis data	<ul style="list-style-type: none"> • Analisis keragaman mikroba di rizosfer dengan metode NGS (next-generation sequencing) menggunakan sampel akar 	Romano <i>et al.</i> (2020)
<p>Desain penelitian: 1 varietas x 2 perlakuan x 3 ulangan Varietas: padi Superwin, Perlakuan: kontrol dan kekeringan Pengambilan sampel: 14 hari setelah perlakuan</p>		



Gambar 5.1 Tanaman padi pada tahap empat daun yang berkembang penuh.



Gambar 5.2 Tanaman padi Superwin yang tidak diairi (kanan) dan diairi sampai 100% kapasitas lapang (kiri).



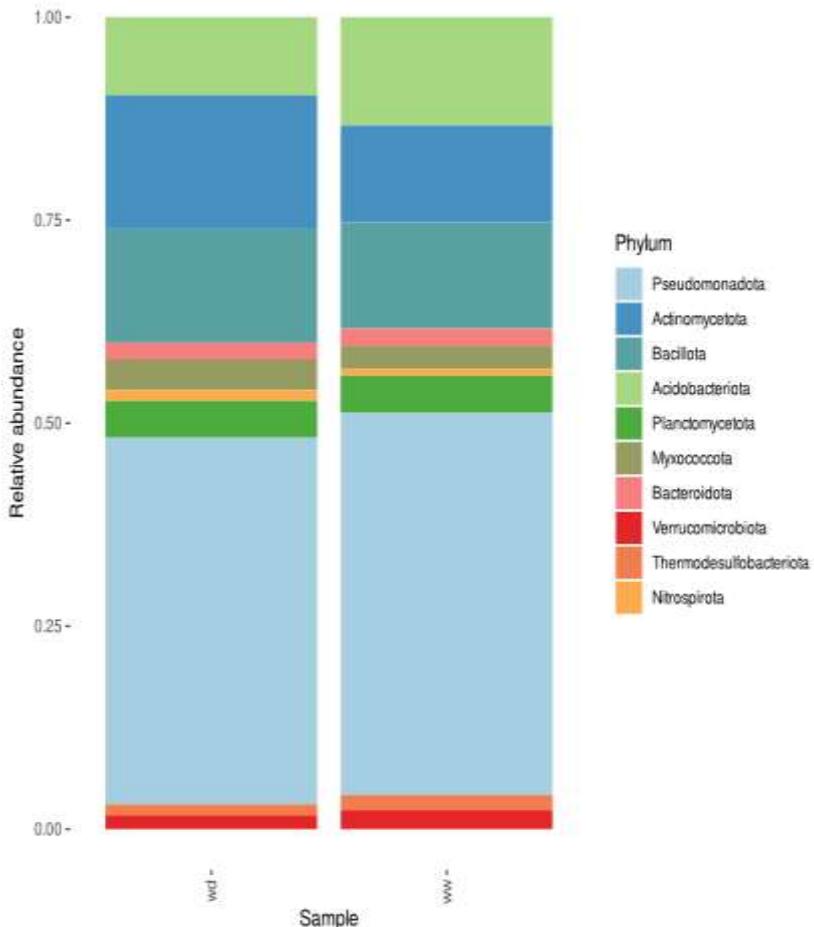
Gambar 5.3 Sampling akar tanaman padi Superwin setelah 14 hari perlakuan

5.2 Struktur Komunitas Filum Mikroba Rizosfer pada Padi Lokal Sulawesi Utara Saat Kekeringan

Analisis metagenomik pada akar tanaman padi lokal Sulawesi Utara kultivar Superwin yang tidak diairi selama 14 hari (wd) menunjukkan perbedaan kelimpahan relatif pada tingkat filum jika dibandingkan dengan tanaman yang diairi 100% kapasitas lapang atau kontrol (ww). Analisis menunjukkan adanya 10 filum mikroba dominan baik pada tanaman yang kekeringan dan tanaman kontrol dengan kelimpahan relatif yang diurutkan dari yang tertinggi sampai terendah, yakni Pseudomonadota, Actinomycetota, Bacillota, Acidobacteriota, Planctomycetota, Myxococcota, Bacterioidota, Verrucomicrobiota, Thermodesulfobacteriota dan Nitrospirota

(Gambar 4.4). Kelimpahan relatif mikroba filum Pseudomonadota, Acidobacteriota, Verrucomicrobiota dan Thermodesulfobacteriota pada akar tanaman padi Superwin yang mengalami kekeringan berturut-turut 4,23; 38,57; 34,68 dan 39,84% lebih kecil dibandingkan dengan tanaman kontrol. Sebaliknya kelimpahan relatif mikroba filum Actinomycetota, Myxococcota dan Nitrospirota pada akar tanaman padi Superwin yang mengalami kekeringan berturut-turut 38,26; 35,71 dan 55,81% lebih besar dibandingkan dengan tanaman kontrol (Tabel 5.2). Penurunan Acidobacteria akibat kekeringan juga dilaporkan oleh Matur dan Roy (2020). Kelimpahan relatif untuk keenam filum lainnya, yakni Bacillota, Planctomycetota dan Bacterioidota, hampir tidak berbeda antara akar tanaman padi Superwin yang mengalami kekeringan dan tanaman kontrol. Perlakuan kekeringan selama 14 hari menyebabkan perbedaan struktur komunitas mikroba yang ditunjukkan dengan adanya perbedaan kelimpahan relatif mikroba yang merupakan anggota dari sepuluh filum mikroba yang dominan. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengevaluasi struktur komunitas mikroba rizosfer pada tanaman padi Superwin yang mengalami cekaman kekeringan pada tahap reproduktif dan tahap pematangan dengan durasi cekaman kekeringan yang lebih panjang. Struktur komunitas mikroba di *bulk soil* dan *rhizosphere* juga perlu dievaluasi pada tanaman padi saat mengalami kekeringan. Hasil

analisis metagenomik tersebut dapat dimanfaatkan untuk perbaikan sifat tahan kering pada tanaman padi dan tanaman sumber pangan lainnya, sehingga memperkecil dampak kekeringan terhadap penurunan hasil panen.



Gambar 5.4 Kelimpahan relatif mikroba rizosfer pada tanaman padi Superwin yang tidak diairi (wd) dan yang diairi 100% kapasitas lapang (ww) pada tingkat filum

Tabel 5.2 Perbandingan kelimpahan relatif phylum mikroba rizosfer pada tanaman padi Superwin yang tidak diairi (wd) dan yang diairi 100% kapasitas lapang (ww)

Phylum	Kelimpahan relatif (%)	
	wd	ww
Pseudomonadota	45,15	47,06
Actinomycetota	16,48	11,92
Bacillota	13,96	13,08
Acidobacteriota	9,62	13,33
Planctomycetota	4,52	4,60
Myxococcota	3,80	2,80
Bacteroidota	2,07	2,15
Verrucomicrobiota	1,73	2,33
Thermodesulfobacteriota	1,33	1,86
Nitrospirota	1,34	0,86

BAB VI.

APLIKASI MIKROBA TOLERAN KEKERINGAN DI MASA DEPAN

Potensi mikroba toleran kekeringan dalam resistensi tanaman saat kekeringan di laboratorium diaplikasikan di lapangan dengan pengembangan biofertilizer berbahan dasar mikroba. Pengembangan biofertilizer ini sejalan dengan tuntutan untuk mengurangi penggunaan pupuk kimia dan pestisida dalam sistem pertanian pangan yang berkelanjutan. Input berbagai senyawa kimia ke lingkungan biasanya mengubah keseimbangan fisikokimia dan biologi di tanah.

Penggunaan biofertilizer akan mengembalikan tanah ke kondisi alamiahnya (Romano *et al.*, 2020). Formulasi fertilizer yang baik seharusnya mengandung mikroorganisme yang aktif secara metabolik dengan umur hidup yang lebih panjang dan sekaligus bersifat ramah lingkungan dan biodegradable (Kour *et al.*, 2020). Walaupun beberapa mikroba menunjukkan potensi untuk memperbaiki produksi tanaman pangan dan kesehatan pada kondisi yang tidak menguntungkan, tetapi pengembangan dan komersialisasi biofertilizer berbahan dasar mikroba yang toleran kekeringan masih jauh dari realita. Tetapi upaya pengembangan biofertilizer yang dapat membantu tanaman untuk menghadapi

cekaman kekeringan telah banyak dilakukan (Matur dan Roy, 2020).

Plant growth-promoting microbes (PGPM) merupakan mikroba yang paling banyak dipakai sebagai biofertilizer dibandingkan jamur dan bakteri lain. PGPM mempengaruhi penampilan tanaman baik secara langsung maupun tidak langsung. Mekanisme langsung dilakukan dengan cara produksi senyawa-senyawa spesifik yang dapat merangsang pertumbuhan tanaman, meningkatkan ketersediaan dan pengambilan unsur-unsur hara (solubilisasi fosfat, produksi *siderophore*, asam indol-3-asetat, fiksasi nitrogen). Mekanisme tidak langsung dilakukan dengan menekan patogen tanaman. Beberapa *plant growth-promoting rhizobacteria* (PGPR) berdampak menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman saat mengalami cekaman nutrisi dan cekaman abiotik lainnya atau selama restorasi tanah yang tercemar. Selain itu tanaman juga dapat membentuk simbiosis dengan *arbuscular mycorrhizal fungi* (AMF) yang dapat memperluas bidang permukaan akar untuk penyerapan unsur-unsur hara (Romano *et al.*, 2020).

Gholiloo *et al.* (2019) merekomendasikan aplikasi mikoriza yang dikombinasikan dengan *Azotobacter* dan *Azospirillum* sebagai biofertilizer. Aplikasi ketiga macam mikroba tersebut secara efisien meningkatkan biomassa akar dan tajuk, kandungan prolin, karotenoid, minyak essensial, nitrogen

dan kalium pada *Valeriana officinalis* saat cekaman kekeirngan. Khajeeyan *et al.* (2019) melaporkan aplikasi kombinasi antara *Glomus mosseae* dengan 2 strain PGPR (*Pseudomonas putida* dan *Pantoea agglomerans*) sebagai biofertilizer secara signifikan meningkatkan berat basah daun, kandungan klorofil, dan laju fotosintesis *Aloe vera* yang ditanam pada kondisi kekurangan air.

Efek menguntungkan strain PGPR yang dikombinasikan dengan fertiliser lain telah dievaluasi. Suatu penelitian yang memberikan perlakuan kombinasi *Bacillus cereus* dengan kalium silikat pada biji *Sorghum bicolor* sebelum disemai, memperbaiki pertumbuhan vegetatif, kandungan air relatif, kebocoran elektrolit, dan potensial osmotik pada tanaman yang tercekam kekeringan (Saad dan Abo-koura, 2018). Di samping itu kombinasi *Bacillus cereus* dan kalium silikat menyehatkan mikroflora rizosfer tanah. Aplikasi kombinasi strain PGPR yang menghasilkan ACC deaminase (*Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter cloacae*, *Achromobacter xylosoxidans*, dan *Leclercia adecarboxylata*) dan *timber waste biocharcoal* secara signifikan memperbaiki kemampuan toleransi tanaman jagung terhadap kekeringan berdasarkan peningkatan laju pertumbuhan, produksi, rasio pertukaran gas dan konsentrasi pigmen fotosintetik pada tanaman yang mengalami cekaman kekeringan dan diinokulasi dengan bioformulasi tersebut (Danish *et al.*, 2020). Selanjutnya kombinasi PGPR dan zat pengatur tumbuh

meningkatkan toleransi tanaman *chickpea* terhadap kekeringan. Varietas *chickpea* yang sensitif terhadap kekeringan yang diberikan perlakuan kombinasi PGPR dan zat pengatur tumbuh (SA dan putresin) saat kekeringan mengalami peningkatan kandungan klorofil, konsentrasi gula, kandungan prolin dan aktivitas enzim antioksidan. Aplikasi bioformulasi ini juga merangsang akumulasi berbagai metabolit seperti L-asparagin, gliserol, riboflavin, aspartat dan 3-hydroxy-3methylglutarate pada daun *chickpea* (Khan *et al.*, 2019). Efek kombinasi *arbuscular mychorrhizal fungi* dan *biocharcoal* secara signifikan akan mengurangi cekaman kekeringan pada tanaman *chickpea* dengan cara meningkatkan biomassa, efisiensi fotosintetik dan kandungan air daun serta meningkatkan kemampuan fiksasi nitrogen pada tanaman yang mengalami stress (Hashem *et al.*, 2019).

Keberhasilan inokulan mikroba sebagai biofertilizer ditentukan oleh kemampuannya untuk membentuk koloni di bagian eksternal atau internal jaringan tanaman, menciptakan interaksi yang baik dengan inang dan tetap berkembang di tanah bersama dengan mikroorganisme *autochthonous* secara rhizokompetensi. Secara umum kolonisasi mikroba rizosfer terjadi melalui beberapa mekanisme, seperti perpindahan bakteri, kesintasan di rizosfer dengan berkompetisi melawan mikroba lain, pelekatan dan kolonisasi di permukaan akar (misalnya

dengan pembentukan biofilm) serta berinteraksi dengan tanaman inang secara sinergis (Romano *et al.*, 2020).

DAFTAR PUSTAKA

Azarbad H, Constant P, Giard-Laliberté C, Bainard L, Yergeau É. 2018. Water stress history and wheat genotype modulate rhizosphere microbial response to drought. *Soil Biol Biochem* 126: 228–236. DOI:10.1016/j.soilbio.2018.08.017.

Bartlett MK, Klein T, Jansen S, Choat B, Sack L. 2016. The correlations and sequence of plant stomatal, hydraulic, and wilting responses to drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113(46): 13098-13103. DOI:10.1073/pnas.1604088113.

Begum N, Ahanger MA, Su Y, Lei Y, Mustafa NSA, Ahmad P et al. 2019. Improved drought tolerance by AMF inoculation in maize (*Zea mays*) involves physiological and biochemical implications. *Plants* 8: 579. DOI:10.3390/plants8120579.

Bernardo L, Morcia C, Carletti P, Ghizzoni R, Badeck FW, Rizza F et al. 2017. Proteomic insight into the mitigation of wheat root drought stress by arbuscular mycorrhizae. *J Proteomics* 169: 21–32. DOI:10.1016/j.jprot.2017.03.024.

Chareesri A, De Deyn GB, Sergeeva L, Polthanee A, Kuyper TW. 2020 Increased arbuscular mycorrhizal fungal colonization reduces yield loss of rice (*Oryza sativa* L.) under drought. *Mycorrhiza* 30: 315–328. DOI:10.1007/s00572-020-00953-z

Danish S, Zafar-ul-Hye M, Mohsin F, Hussain M. 2020. ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize

growth. PLoS One 15(4): e0230615.
DOI:10.1371/journal.pone.0230615.

Egamberdieva D, Wirth SJ, Alqarawi AA, Abd Allah EF, Hashem A. 2017. Phytohormones and beneficial microbes: essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in Microbiol* 8: 2104. DOI:10.3389/fmicb.2017.02104.

Glick BR. 2012. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica* 2012: 963401.
DOI:10.6064/2012/963401.

Ghaffari MR, Mirzaei M, Ghabooli M, Khatabi B, Wu Y, ZabetMoghaddam M, et al. 2019. Root endophytic fungus *Piriformospora indica* improves drought stress adaptation in barley by metabolic and proteomic reprogramming. *Environ Exp Bot* 157: 197–210. DOI:10.1016/j.envexpbot.2018.10.002.

Gholiloo MJ, Yarnia M, Ghorttapeh AH. 2019. Evaluating effects of drought stress and bio- fertilizer on quantitative and qualitative traits of valerian (*Valeriana officinalis* L.). *J Plant Nutr* 42: 1417–1429. DOI:10.1080/01904167.2019.1628972.

Ghosh D, Gupta A, Mohapatra S. 2019. A comparative analysis of exopolysaccharide and phytohormone secretions by four drought tolerant rhizobacterial strains and their impact on osmotic – stress mitigation in *Arabidopsis thaliana*. *World J Microbiol and Biotech* 35: 1–15. DOI: 10.1007/s11274-019-2659-0.

Gontia-Mishra I, Sapre S, Sharma A, Tiwari S. 2016. Amelioration of drought tolerance in wheat by the interaction of plant growthpromoting rhizobacteria. *Plant Biol* 18: 992–1000. DOI:10.1111/plb.12505.

Govindasamy V, George P, Kumar M, Aher L, Raina SK, Rane J et al. 2020. Multi-trait PGP rhizobacterial endophytes alleviate drought stress in a senescent genotype of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. *Biotech* 10: 13. DOI:10.1007/s13205-019-2001-4.

Hashem A, Kumar A, Al-Dbass AM, Alqarawi AA, Al-Arjani ABF, Singh G et al. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi J Biol Sci* 26(3): 614-624. DOI:10.1016/j.sjbs.2018.11.005.

Hartman K, Tringe SG. 2019. Interactions between plants and soil shaping the root microbiome under abiotic stress. *The Biochem J* 476: 2705–2724. DOI:10.1042/BCJ20180615.

Irawan B, Purbayanti K. 2008. Karakterisasi dan Kekerabatan Kultivar Padi Lokal di Desa Rancakalong, Kecamatan Rancakalong, Kabupaten Sumedang. Makalah dipresentasikan pada Seminar Nasional PTTI, 21-23 Oktober 2008

Khajeeyan R, Salehi A, Dehnavi MM, Farajee H, Kohanmoo, MA. 2019. Physiological and yield responses of *Aloe vera* plant to biofertilizers under different irrigation regimes. *Agric Water Manag* 225: 105768. DOI:10.1016/j.agwat.2019.105768.

Khan N, Bano A, Rahman MA, Guo J, Kang Z, Babar M. 2019. Comparative physiological and metabolic analysis reveals a complex mechanism involved in drought tolerance in chickpea (*Cicer arietinum* L.) induced by PGPR and PGRs. *Scientific Reports* 9(1): 1-19. DOI:10.1038/s41598-019-38702-8.

Kour D, Rana KL, Yadav AN, Sheikh I, Kumar V, Dhaliwal HS, Saxena AK. 2020. Amelioration of drought stress in Foxtail millet

(*Setaria italica* L.) by P-solubilizing drought-tolerant microbes with multifarious plant growth promoting attributes. Environ Sustainability 3: 23-34. DOI:10.1007/s42398-020-00094-1.

Lata R, Chowdhury S, Gond SK, White JF. 2018. Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes. Letters in Appl Microbiol 66: 268–276. DOI:10.1111/lam.12855.

Liang X, Erickson JE, Vermerris W, Rowland DL, Sollenberger LE, Silveira ML. 2017. Root architecture of sorghum genotypes differing in root angles under different water regimes. J Crop Improvement 31(1): 39-55. DOI:10.1080/15427528.2016.1258603.

Ludong DPM, Nanlohy FN, Nio SA. 2020. Physiological responses to drought in six rice (*Oryza sativa* L.) cultivars cultivated in North Sulawesi, Indonesia. Pakistan J Biol Sci. 23(12):1666-75. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.1666.1675>

Luo Y, Wang F, Huang Y, Zhou M, Gao J, Yan T et al. 2019. *Sphingomonas* sp. Cra20 increases plant growth rate and alters rhizosphere microbial community structure of *Arabidopsis thaliana* under drought stress. Frontier of Microbiol 8 (10): 1221. DOI:10.3389/fmicb.2019.01221.

Matur P, Roy S. 2020. Insight into the plant responses to drought and decoding the potential of root associated microbiome for inducing drought tolerance. Physiol Plant 172(2):1016-1029. DOI:10.1111/ppl.13338.

Meenakshi AK, Govindasamy V, Ajit V, Choudhary DK. 2019. Mitigation of drought stress in wheat crop by drought tolerant endophytic bacterial isolates. Vegetos 32: 486–493. DOI:10.1007/s42535-019-00060-1.

Moreno-Galván AE, Cortés-Patiño S, Romero-Perdomo F, UribeVélez D, Bashan Y, Bonilla RR. 2020. Proline accumulation and glutathione reductase activity induced by drought-tolerant rhizobacteria as potential mechanisms to alleviate drought stress in Guinea grass. *Applied Soil Ecol* 147: 103367. DOI:10.1016/j.apsoil.2019.103367.

Mukami A, Ngetich A, Mweu C, Oduor RO, Muthangya M, Mbinda WM. 2019. Differential characterization of physiological and biochemical responses during drought stress in finger millet varieties. *Physiol and Mol Biol Plants* 25: 837-846. DOI:10.1007/s12298-019-00679-z.

Nio SA, Cawthray GR, Wade LJ, Colmer TD. 2011. Pattern of solutes accumulated during leaf osmotic adjustment as related to duration of water deficit for wheat at the reproductive stage. *Plant Physiol and Biochem* 49(10):1126-1137. DOI:10.1016/j.plaphy.2011.05.011.

Nio SA, Ludong DPM, Wade LJ. 2018a. Comparison of leaf osmotic adjustment expression in wheat (*Triticum aestivum* L.) under water deficit between the whole plant and tissue levels. *Agric Nat Resources* 52 (1):33-38. DOI:10.1016/j.anres.2018.03.003.

Nio SA, Siahaan R, Ludong DPM. 2018b. Shoot elongation rate in North Sulawesi local rice (*Oryza sativa* L.) under flooding and drought stress at the vegetative phase was different from the reproductive phase. *Bioscience Research* 15(3): 1712-1717.

Nio SA, Pirade M, Ludong DPM. 2019. Leaf chlorophyll content in North Sulawesi (Indonesia) local rice cultivars subjected to polyethylene glycol (PEG) 8000-induced water deficit at the

vegetative stage. Biodiversitas 20(9):2462-2467.
DOI:10.13057/biodiv/d200905

Nio SA, Mereh RJ, Ludong, DPM. 2021. Physiological response to drought in North Sulawesi (Indonesia) local rice (*Oryza sativa*) cultivars at the tissue level in hydroponic culture. Biodiversitas 22(1):58-64. DOI:10.13057/biodiv/d220108.

Raheem A, Shaposhnikov A, Belimov AA, Dodd IC, Ali B. 2018. Auxin production by rhizobacteria was associated with improved yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress. Agron and Soil Sci 64: 574–587. DOI:10.1080/03650340.2017.1362105.

Romano I, Ventorino V, Pepe O. 2020. Effectiveness of plant beneficial microbes: overview of the methodological approaches for the assessment of root colonization and persistence. Frontiers in Plant Sci 11: 6. DOI:10.3389/fpls.2020.00006.

Saad MMAH, Abo-Koura HA. 2018. Improvement of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) growth and yield under drought stress by inoculation with *Bacillus cereus* and foliar application of potassium silicate. Environ, Biodiversity & Soil Security 2: 205–220. DOI:10.21608/jenvbs.2019.6790.1045.

Saddique MAB, Ali Z, Khan AS, Rana IA, Shamsi IH. 2018. Inoculation with the endophyte *Piriformospora indica* significantly affects mechanisms involved in osmotic stress in rice. Rice 11: 34. DOI:10.1186/s12284-018-0226-1.

Salman. 2014. Pengolahan Tanah Tanaman Padi. Pusat Pengembangan dan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan Pertanian. Cianjur.

Santos-Medellín C, Edwards J, Liechty Z, Nguyen B, Sundaresan V. 2017. Drought stress results in a compartment-specific restructuring of of the rice root-associated microbiomes. *mBio* 8: e00764-17. DOI:10.1128/mbio.00764-17.

Surmaini E, Runtunuwu E, Las I. 2011. Upaya sektor pertanian dalam menghadapi perubahan iklim. *Jurnal Litbang Pertanian* 30:1-7. Ullah A, Sun H, Yang X, Zhang X. 2017. Drought coping strategies in cotton: increased crop per drop. *Plant Biotech J* 15(3): 271-284. DOI:10.1111/pbi.12688.

Vurukonda SSKP, Vardharajula S, Shrivastava M, SkZ A. 2016. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiol Res* 184: 13–24. DOI:10.1016/j.micres.2015.12.003.

Yu K, Pieterse CMJ, Bakker PAHM, Berendsen RL. 2019. Beneficial microbes going underground of root immunity. *Plant, Cell & Environ* 42: 2860–2870. DOI:10.1111/pce.13632.

Zhang Y, Du H, Xu F, Ding Y, Gui Y, Zhang J, Xu W. 2020. Root-bacteria associations boost rhizosheath formation in moderately dry soil through ethylene responses. *Plant Physiol* 183(2): 780-792. DOI: 10.1104/pp.19.01020.

Zahoor R, Zhao W, Dong H, Snider JL, Abid M, Iqbal B, Zhou Z. 2017. Potassium improves photosynthetic tolerance to and recovery from episodic drought stress in functional leaves of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Plant Physiol and Biochem* 119: 21-32. DOI: j.plaphy.2017.08.011.

DAFTAR ISTILAH (GLOSARIUM)

- Asam jasmonat** senyawa organik yang terbentuk melalui biosintesis dari asam linoleat bebas oleh enzim lipoksigenase dan berfungsi menghambat pertumbuhan beberapa bagian tumbuhan tertentu dan sangat kuat mendorong terjadinya penuaan daun
- Brasinosteroid** hormon endogen berupa steroid yang dapat memacu pertumbuhan dan dapat ditemukan pada biji, serbuk sari, dan jaringan vegetatif, serta berfungsi pada konsentrasi nanomolar untuk memengaruhi perbesaran dan memperbanyak sel
- Cekaman** kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan bagi tanaman dan mengakibatkan respons tanaman terhadap faktor lingkungan tertentu lebih rendah daripada respons optimumnya pada kondisi normal
- Eksopolisakarida** polisakarida hasil sekresi dari bakteri asam laktat yang dilepaskan pada ekstraseluler di sekitar sel
- Eksudat** cairan yang dikeluarkan oleh suatu organisme melalui pori-pori atau luka
- Endofit** kelompok organisme khusus dalam jaringan tanaman seperti akar, tajuk atau daun yang tidak berdampak negatif pada tanaman inang
- Fitohormon** sekumpulan senyawa organik bukan hara (nutrien), baik yang terbentuk secara alami maupun dibuat oleh manusia, yang dalam kadar sangat kecil mampu mendorong, menghambat, atau mengubah pertumbuhan, perkembangan, dan pergerakan (taksis) tumbuhan
- Inokulasi** kegiatan pemindahan mikroorganisme baik berupa bakteri maupun jamur dari tempat atau sumber asalnya ke medium baru yang telah dibuat dengan tingkat ketelitian yang sangat tinggi dan aseptis

- Kapasitas lapang** keadaan tanah dalam kondisi jenuh, menunjukkan jumlah air maksimum yang dapat ditahan oleh tanah terhadap gaya tarik gravitasi
- Konduktivitas** kemampuan bahan untuk mengirim air
- Mikrobiom rizosfer** mikroba tanah yang berasosiasi secara kolektif di rizosfer (bakteri, archaea, fungi, virus dan oomycetes) beserta keseluruhan genom yang berasosiasi
- Polietilen glikol** sekelompok polimer sintetik yang larut air dan memiliki kesamaan struktur kimia berupa adanya gugus hidroksil primer pada ujung rantai polieter yang mengandung oksietilen ($-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$)
- Prolin** asam organik yang tergolong asam amino proteinogenik (digunakan dalam biosintesis protein), meskipun tidak mengandung gugus amino $-\text{NH}_2$, melainkan merupakan amina sekunder
- Reproduktif** perkembangan bunga, buah dan biji pada tumbuhan
- Resistensi** kemampuan tanaman untuk bertahan hidup terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan ini dan bahkan tetap tumbuh dengan adanya cekaman tersebut
- Rizosfer** fraksi tanah yang langsung dipengaruhi oleh sekresi akar secara biokimia yang meliputi lapisan tanah sekitar 1-5 mm dari permukaan akar
- Siderophore** molekul-molekul pengkelat dengan berat molekul rendah dan afinitas tinggi yang dihasilkan sebagai respon terhadap defisiensi besi
- Sinyal** besaran elektrik terukur yang berubah dalam waktu dan atau dalam ruang, serta membawa informasi
- Stomata** pori-pori kecil di daun yang jika membuka secara maksimal hanya selebar 0,0001 mm yang diapit oleh sepasang sel penjaga dan berfungsi dalam pertukaran gas
- Transporter** alat pengangkut yang berperan dalam memindahkan bahan-bahan dari satu tempat ke tempat lainnya
- Trehalose** gula yang terdiri dari dua molekul glukosa yang disintesis oleh beberapa bakteri, jamur, dan tumbuhan

dan dipakai sebagai sumber energi serta untuk bertahan hidup dalam cuaca beku dan kekurangan air.

Vegetatif cara reproduksi makhluk hidup secara aseksual (tanpa adanya peleburan sel kelamin jantan dan betina)

PROFIL PENULIS



Prof. Dra. Nio Song Ai, MSi. PhD. dilahirkan di Malang, Jawa Timur pada tanggal 4 Februari 1969. Penulis menyelesaikan program sarjananya pada tahun 1992 di Jurusan Pendidikan Biologi, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, IKIP Malang (sekarang Universitas Negeri Malang).

Pada tahun 1992 penulis mengikuti program pra S2 di Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Bandung dan dinyatakan lulus untuk mengikuti program Magister Biologi di perguruan tinggi yang sama pada tahun 1993. Gelar Master Sains (MSi) diperoleh dari Institut Teknologi Bandung pada tahun 1996, sedangkan gelar PhD di bidang Plant Biology diperoleh pada tahun 2010 dari School of Plant Biology, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, The University of Western Australia.

Sejak tahun 1995 penulis diangkat menjadi dosen di Universitas Sam Ratulangi (UNSRAT) Manado dan saat ini penulis bertugas sebagai Guru Besar di Program Studi Biologi Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sam Ratulangi. Penulis mengampu beberapa mata kuliah, di antaranya Fisiologi Tumbuhan, Ekofisiologi Tumbuhan, Metabolisme Tumbuhan, Fitohormon, Struktur dan Perkembangan Tumbuhan, Morfologi Tumbuhan, Anatomi

Tumbuhan, Embriologi Magnoliophyta, Metode Penelitian Biologi, Biologi Sel dan Molekular serta Biologi Dasar. Sejak tahun 1994 sampai sekarang penulis aktif melakukan berbagai penelitian (mandiri, didanai oleh DIKTI Kemendikbud dan Kemenristekdikti serta pembimbing tugas akhir dan magang mahasiswa) dan pengabdian kepada masyarakat serta menulis berbagai artikel ilmiah yang berkaitan dengan respons tanaman, terutama gandum, padi dan puring terhadap kekurangan air atau kekeringan, banjir atau genangan air, naungan dan salinitas.

Dalam menjalankan tugas sebagai dosen, penulis diberi kepercayaan untuk menjabat beberapa jabatan akademis, yakni Koordinator Bidang Biologi FMIPA UNSRAT (1998-2000), Sekretaris Jurusan Biologi FMIPA UNSRAT (2000-2002), Kepala Bioteknologi FMIPA UNSRAT (2002-2004), Ketua Unit Penjamin Mutu FMIPA UNSRAT (2012-2015). Di samping itu penulis juga pernah menjadi Ketua Redaksi Jurnal Ilmiah SAINS terbitan FMIPA UNSRAT (2000-2004), Ketua Redaksi Jurnal Bios Logos terbitan Jurusan Biologi FMIPA UNSRAT (2011-2019), dan Anggota Redaksi Jurnal MIPA Online UNSRAT (2017-sekarang). Penulis diberi kepercayaan oleh institusi untuk menjalankan tugas tambahan sebagai Ketua Jurusan Biologi dan merangkap sebagai Koordinator Program Studi Biologi di FMIPA UNSRAT sejak tahun 2015-2019. Pada saat ini penulis diberi tugas sebagai Kepala Unit Pelaksana Teknis Laboratorium Terpadu Universitas Sam Ratulangi periode 2022-2026.

Penulis juga memperoleh beberapa penghargaan, yaitu Tanda Kehormatan Satyalancana Karya Satya X dari Presiden RI pada tahun 2013, Dosen Berprestasi I Tingkat Fakultas dari Dekan FMIPA UNSRAT, Dosen Berprestasi I Tingkat Universitas dari

Rektor UNSRAT pada tahun 2014 dan Tanda Kehormatan Satyalancana Karya Satya XX dari Presiden RI pada tahun 2017. Di samping itu pada tahun 2022 memperoleh HKI untuk jenis paten sederhana dengan judul Metode Seleksi Bibit Padi Tahan Banjir berdasarkan Konsentrasi Klorofil Daun. HKI untuk jenis Hak Cipta juga diperoleh untuk beberapa buku yang sudah diterbitkan, di antaranya Biologi Dasar dalam Praktek pada tahun 2020, Biologi Tumbuhan dalam Praktek pada tahun 2022 dan Fisiologi Tumbuhan pada tahun 2023.

Penulis telah menulis sebelas buah buku, yaitu Fisiologi Tanaman pada Saat Kekeringan yang diterbitkan pada tahun 2015, Fisiologi Tanaman pada Saat Kekeringan Edisi Revisi yang diterbitkan pada tahun 2016, Fisiologi Tumbuhan dalam Praktek dan Ekofisiologi Tumbuhan yang diterbitkan pada tahun 2017, Peran Hormon dalam Perkembangan Tumbuhan yang diterbitkan pada tahun 2019, Fisiologi Fotosintesis dan Biologi Dasar dalam Praktek yang diterbitkan pada tahun 2020, Konsep-konsep Dasar Biologi Tumbuhan pada tahun 2021, Bunga, Buah dan Biji pada Tanaman Khas Sulawesi Utara dan Biologi Tumbuhan dalam Praktek pada tahun 2022 serta Fisiologi Tumbuhan pada tahun 2023.

Penulis menikah dengan Ir. Daniel Peter Mantilen Ludong, MSc. dan dikaruniai seorang putri, Benedicta Chryzilla Mantilen Ludong, SKG.



Ir. Daniel Peter Mantilen Ludong, MSc. dilahirkan di Tondano, Sulawesi Utara pada tanggal 12 Agustus 1964. Penulis menyelesaikan program sarjananya pada tahun 1989 di Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi. Pada tahun 2009, penulis menyelesaikan program magister di bidang pengelolaan tanah dan air di Curtin University of Technology, Perth, Australia.

Sejak tahun 2000 penulis diangkat menjadi dosen di Universitas Sam Ratulangi (UNSRAT) Manado dan saat ini penulis bertugas sebagai Lektor di Program Studi Teknik Pertanian Jurusan Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi. Penulis mengampu beberapa mata kuliah, di antaranya Biofisika Tanah dan Tanaman, Teknik Konservasi Tanah dan Air, Hidrologi Teknik serta Irigasi dan Drainase. Sejak tahun 2000 sampai sekarang penulis aktif melakukan berbagai penelitian (mandiri, didanai oleh DIKTI Kemendikbud dan Kemenristekdikti serta pembimbing tugas akhir dan magang mahasiswa), kegiatan pengabdian kepada masyarakat dan menulis berbagai artikel ilmiah yang berkaitan dengan hidrologi dan irigasi.

Dalam menjalankan tugas sebagai dosen, penulis diberi kepercayaan untuk menjabat beberapa jabatan akademis, yakni Sekretaris Prodi Teknik Pertanian (2010 - 2014) dan Kepala Laboratorium Keteknikan (2015 - 2022). Penulis juga memperoleh penghargaan, yaitu Tanda Kehormatan

Satyalancana Karya Satya X dari Presiden RI pada tahun 2016. Di samping itu pada tahun 2022 memperoleh HKI untuk jenis paten sederhana dengan judul Rancangan Alat Pemotong Semak Berputar yang Didorong dengan Traktor Tangan pada Lahan Berlereng. HKI untuk jenis Hak Cipta juga diperoleh untuk buku yang sudah diterbitkan dengan judul Fisiologi Tumbuhan pada tahun 2023.

Penulis telah menulis tiga buah buku yang berjudul Ekofisiologi Tumbuhan yang diterbitkan pada tahun 2017, Peran Hormon dalam Perkembangan Tumbuhan yang diterbitkan pada tahun 2019 serta Fisiologi Tumbuhan pada tahun 2023.

Penulis menikah dengan Prof. Dra. Nio Song Ai, MSi. PhD. dan dikaruniai seorang putri, Benedicta Chrysilla Mantilen Ludong, SKG.

Buku referensi yang berjudul **“Mikroba Rizosfer pada Tanaman Saat Kekeringan”** menyajikan informasi yang berkaitan dengan sifat resistensi kekeringan pada tanaman berdasarkan pendekatan metagenomik. Informasi tentang struktur komunitas mikroba rizosfer pada tanaman saat kekeringan merupakan sumber daya genetik yang bermanfaat dalam perbaikan resistensi tanaman. Buku ini dapat dipakai sebagai salah satu referensi dalam kegiatan pembelajaran bidang biologi yang berkaitan dengan mekanisme resistensi tanaman terhadap kekeringan yang melibatkan mikroba rizosfer yang dominan hidup di sekitar perakaran tanaman.



Prof. Dra. Nio Song Ai, MSi. PhD. menyelesaikan studi S1 di IKIP Malang, S2 di Institut Teknologi Bandung dan S3 di University of Western Australia, Perth Australia di bidang biologi. Saat ini penulis bekerja sebagai tenaga pendidik di Program Studi Biologi, Jurusan Biologi Fakultas MIPA Universitas Sam Ratulangi.



Ir. Daniel Peter Mantilen Ludong, MSc. menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknologi Pertanian Universitas Sam Ratulangi dan S2 di Curtin University of Technology, Perth Australia di bidang pengelolaan tanah dan air. Saat ini penulis bekerja sebagai tenaga pendidik di Program Studi Teknik Pertanian, Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Pertanian Universitas Sam Ratulangi.