

Potensi Kombinasi Teknologi Mutan Padi Toleran Kekeringan dan Polimer Superabsorben: Peran IPTEK Nuklir dalam Peningkatan Produksi Padi Lahan Kering

The Potential of The Technologies Combination of Drought Tolerant Rice Mutants and Superabsorbent Polymers: The Role of Nuclear Science and Technology in Enhancement of Dryland Rice Production

Bagus Herwibawa dan Florentina Kusmiyati

Laboratorium Fisiologi dan Pemuliaan Tanaman, Universitas Diponegoro
Kompl. drh. R. Soejono Koesoemowardojo, Tembalang, Semarang 50275
Email : bagus.herwibawa@live.com

ABSTRAK

Padi merupakan sumber bahan pangan pokok, yang dikonsumsi lebih dari 95% penduduk Indonesia. Kebutuhannya terus meningkat tiap tahun, namun belum berhasil dicukupi dari produksi sendiri, sehingga masih bergantung impor hingga 1.347.856 ton per tahun. Upaya yang dapat dilakukan selain impor, adalah peningkatan produksi padi melalui ekstensifikasi dan intensifikasi pertanian. Namun 72,98% daratan Indonesia yang sesuai untuk pertanian merupakan lahan kering, tentu akan menghambat peningkatan produksi padi. IPTEK Nuklir dapat berperan dalam optimalisasi pemanfaatan lahan kering, dimana keterbatasan keragaman alami dalam pemuliaan tanaman padi toleran kekeringan, dan polimerasi serta *grafting* polimer superabsorben, keduanya dapat diperbaiki melalui radiasi pengion. Kombinasi teknologi mutan padi toleran kekeringan dan polimer superabsorben sangat potensial sebagai satu diantara upaya-upaya untuk meningkatkan produksi padi. Namun, upaya penerapan teknologi tersebut tentu akan menimbulkan masalah karena lemahnya diseminasi teknologi inovatif, dan lambatnya adopsi teknologi. Diperlukan perhatian yang lebih besar dari peneliti, pengambil kebijakan, dan masyarakat pengguna.

Kata kunci : iradiasi, kekeringan, mutasi, padi, superabsorben

ABSTRACT

Rice is the main source of staple food, which is consumed by more than 95% of Indonesia's population. Its needs continue to increase each year, but has not been successfully fulfilled from its own production, so it still depends on imports up to 1347785 tonnes per year. Efforts can be made other than imports are the increase of rice production through agricultural extensification and intensification. However, 72.98% of Indonesia's land suitable for agriculture is dry land, it will inevitably increase rice production. Nuclear science and technology can play a role in optimizing the use of dryland, where the limitations of natural diversity in drought tolerant rice breeding, and polymeration and grafting of superabsorbent polymers, both can be improved through ionizing radiation. Technologies combination of drought tolerant rice mutant and superabsorbent polymer are great potential as one of the efforts to increase rice production. However, the application of such technologies will certainly lead to problems due to weak dissemination of innovation technologies, and slow the adoption of technologies. Greater attention is required from researchers, policy makers, and user communities.

Keywords : drought, irradiation, mutation, rice, superabsorbent

PENDAHULUAN

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan satu diantara tanaman penting di dunia, terutama karena lebih dari 50% populasi dunia [1], bahkan lebih dari 95% penduduk Indonesia [2], menjadikannya sebagai sumber bahan pangan pokok (*staple food*). Tingkat konsumsi padi

(beras) yang tinggi menjadikan kebutuhan nasional akan terus meningkat, seiring dengan laju pertumbuhan penduduk yang mencapai rata-rata 1,49% per tahun [3]. Bila diasumsikan konsumsi beras per kapita sebesar 139 kg per tahun [4], maka Indonesia harus mampu menyediakan beras minimal 36.477.396.966 ton pada tahun 2017, atau 36.969.575.916 ton pada tahun 2018.

Angka kebutuhan beras nasional yang sangat tinggi, menyebabkan Indonesia masih bergantung impor dari negara lain, seperti Vietnam, Thailand, Tiongkok, India dan Pakistan [5]. Impor terjadi karena produksi nasional belum berhasil mencukupi kebutuhan beras, meskipun telah lebih dari 70 tahun merdeka, namun swasembada beras hanya dapat dicapai pada tahun 1984 dan 2009 [6]. Berdasarkan latar belakang tersebut, maka upaya-upaya menuju swasembada beras, tentu saja masih menjadi permasalahan yang mendesak untuk diselesaikan secepatnya.

Upaya yang dapat dilakukan antara lain peningkatan produksi padi melalui ekstensifikasi dan intensifikasi [7]. Namun, wilayah Indonesia yang sebagian besar merupakan lahan kering, tentu akan menjadi satu faktor yang menghambat peningkatan produksi padi. IPTEK Nuklir dapat berperan dalam optimalisasi pemanfaatan lahan kering, dimana keterbatasan keragaman alami dalam pemuliaan tanaman padi toleran kekeringan, dan polimerisasi serta pencangkokan (*grafting*) polimer superabsorben, keduanya dapat diperbaiki melalui radiasi pengion. Dalam tulisan ini akan dikemukakan tentang potensi ekstensifikasi dan intensifikasi pertanian tanaman padi di Indonesia, karakteristik lahan kering di Indonesia, peran IPTEK Nuklir dalam optimalisasi perbaikan sifat padi toleran kekeringan, peran IPTEK Nuklir dalam optimalisasi perbaikan polimer superabsorben, dan kombinasi teknologi mutan padi toleran kekeringan dan polimer superabsorben, yang tentu akan sangat potensial untuk dikembangkan, sebagai suatu upaya peningkatan produksi padi di lahan kering.

POTENSI EKSTENSIFIKASI DAN INTENSIFIKASI PERTANIAN TANAMAN PADI DI INDONESIA

Tanaman padi hingga saat ini, sebagian besar masih diproduksi di lahan sawah beririgrasi teknis dengan tingkat kesuburan tanah yang tinggi. Teknologi budidaya padi modern yang dikembangkan, tentu menjadi pembatas upaya peningkatan produksi melalui perluasan areal sawah [8]. Perluasan areal sawah dikenal dengan istilah ekstensifikasi, sebagai usaha untuk meningkatkan produksi yang dilakukan dengan merambah wilayah non pertanian (misalnya: hutan, rawa-rawa, pantai dsb.) yang dikonversi menjadi lahan pertanian, atau upaya perluasan

areal dengan mengkonversi lahan bukan pertanian menjadi lahan pertanian.

Ekstensifikasi semakin sulit dan mahal untuk dilakukan, terutama di pulau Jawa dan Bali, karena luas wilayah pertanian cenderung menyusut dengan adanya pembangunan sektor non pertanian, alih fungsi lahan dari sawah ke perumahan, industri dan perkantoran. Selain itu, daratan Indonesia sebagian besar merupakan lahan kering (148 juta ha; 78%), dan hanya sedikit lahan basah (40,20 juta ha; 22%) [9]. Fakta-fakta tersebut tentu saja memperkecil peluang perluasan lahan untuk pertanian, sehingga modifikasi lahan kering sebagai bagian dari intensifikasi pertanian, dapat dipandang sebagai langkah penting dan mendesak dalam rangka meningkatkan produksi padi nasional.

Intensifikasi merupakan usaha untuk meningkatkan produksi per unit lahan melalui modifikasi teknis. Upaya intensifikasi antara lain penggunaan benih bermutu kultivar unggul, dan aplikasi beberapa pupuk [10]. Benih bermutu merupakan satu faktor penting yang menentukan produktivitas, karena penggunaan benih bermutu dapat meningkatkan daya hasil [11], sementara kultivar unggul dikembangkan melalui teknik pemuliaan tanaman [12]. Selain itu, intensifikasi juga berkaitan dengan modifikasi lingkungan tumbuh tanaman, seperti penggunaan pembenah tanah (*soil conditioner*). Pembenah tanah berfungsi memperbaiki agregat tanah, meningkatkan kapasitas tanah menahan air (*water holding capacity*), meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), dan memperbaiki ketersediaan unsur hara [13]. Kombinasi kedua teknologi tersebut berpotensi untuk dikembangkan, sebagai suatu upaya dalam pemanfaatan lahan kering.

Produktivitas lahan kering tidak semata-mata hanya dipengaruhi oleh kekeringan, tetapi juga sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, serta iklim dan organisme pengganggu tanaman. Kajian yang lebih luas juga dipengaruhi oleh sarana produksi yang tepat waktu, kesadaran petani dan pemangku kepentingan lainnya dalam menerapkan pola tanam yang ideal, dan kemandirian petani yang didukung dengan harga jual produk yang baik. Namun paling tidak upaya-upaya pemanfaatan lahan kering melalui penerapan kombinasi teknologi (intensifikasi), merupakan suatu langkah awal yang menuntut untuk dikembangkan secara komprehensif, sehingga dapat diterapkan secara luas pada lahan kering marginal (ekstensifikasi).

KARAKTERISTIK LAHAN KERING DI INDONESIA

Lahan kering merupakan satu diantara agroekosistem yang sangat potensial untuk usaha pertanian. Namun, faktor pembatas tanah seperti lereng yang sangat curam, solum tanah dangkal dan berbatu, menyebabkan tidak semua lahan kering sesuai untuk pertanian. Di Indonesia, lahan kering yang sesuai untuk budidaya pertanian hanya sekitar 76,22 juta ha (52%), dimana 23,26 juta ha (16%) sesuai untuk pertanian tanaman pangan [14].

Permasalahan dalam pengelolaan lahan kering untuk budidaya tanaman pangan, berbeda-beda pada setiap wilayah. Secara umum lahan kering memiliki tingkat kesuburan yang rendah, terutama pada tanah-tanah dengan lapisan olah tipis dan kadar bahan organik rendah atau sangat rendah. Secara alami kadar bahan organik di daerah tropis cepat menurun, mungkin diakibatkan oleh erosi air dan pemadatan tanah [15]. Bahan organik sangat penting karena mendukung karakteristik lahan kering, berkaitan dengan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah [16]. Selain itu 102,80 juta Ha (69,46%) lahan kering di Indonesia merupakan tanah masam, dengan ciri-ciri pH rendah ($< 5,5$), kadar Al tinggi, fiksasi P tinggi, kandungan basa-basa dapat tukar dan KTK rendah, kandungan besi dan mangan tinggi, peka erosi, dan miskin unsur biotik [17]. Tanah masam didominasi oleh ordo Inceptisols, Ultisols, dan Oxisols [18].

Lahan kering sebagian besar terdapat di dataran tinggi (pegunungan) yang ditandai dengan topografi bergelombang, dan merupakan daerah penerima dan peresap air hujan [19]. Namun lahan kering memiliki potensi degradasi lahan yang tinggi, terutama bila curah hujan tinggi, peka erosi, lereng curam, dan kurang adanya upaya konservasi, meskipun pada kenyataannya banyak diusahakan untuk usahatani [20]. Ketersediaan air juga merupakan faktor pembatas utama usahatani, terutama disebabkan oleh perbedaan curah hujan yang berkaitan dengan jumlah bulan basah dalam satu tahun [21]. Indonesia bagian barat lebih basah dibandingkan bagian timur, dan secara temporal terdapat perbedaan pola distribusi hujan pada musim hujan dan kemarau [22].

Lahan kering yang belum dimanfaatkan (ditumbuhi semak belukar, alang-alang, dan rerumputan) dapat diketahui penyebarannya secara spasial (GIS), melalui tumpang tepat

(*overlay*) peta penggunaan lahan dengan peta lainnya [23]. Selain itu, *overlay* peta penggunaan lahan skala 1:250.000 dengan peta arahan tata ruang pertanian, menunjukkan terdapat cadangan lahan kering seluas 22,39 juta ha (7,08 juta ha untuk tanaman semusim, dan 15,31 juta ha untuk tanaman tahunan), namun secara riil lahan cadangan tersebut sulit ditemukan, terutama karena status kepemilikannya belum jelas, apakah tergolong tanah negara, HGU, HPH, tanah ulayat, atau tanah masyarakat yang diterlantarkan [17]. Oleh sebab potensi lahan kering yang sangat luas tersebut, maka diperlukan upaya serius dalam pengembangannya guna mendukung peningkatan produksi padi nasional.

PERAN IPTEK NUKLIR DALAM OPTIMALISASI PERBAIKAN SIFAT PADI TOLERAN KEKERINGAN

Budidaya padi toleran kekeringan, merupakan satu diantara upaya-upaya untuk meningkatkan produktivitas lahan kering. Kultivar padi toleran kekeringan dapat dirakit melalui teknik pemuliaan tanaman [24]. Pemuliaan tanaman yang dilakukan secara konvensional, misalnya persilangan, membutuhkan observasi keragaman alami untuk mendapatkan sifat yang diinginkan, sehingga dapat digunakan sebagai tetua persilangan [25]. Upaya tersebut hanya dapat dilakukan bila tersedia sumber genetik dan metode seleksi yang efektif. Meskipun demikian, sumber genetik dapat ditingkatkan keragamannya melalui teknik mutasi induksi [26].

Mutasi merupakan perubahan struktur dan posisi gen pada kromosom, menghasilkan perubahan fenotip dengan munculnya karakter baru, sehingga dapat digunakan dalam seleksi [27]. Kemampuan induksi perubahan permanen urutan asam deoksiribonukleat (ADN) tersebut dikenal dengan mutagenesis, disebabkan beberapa faktor eksternal yang disebut mutagen (termasuk agen kimia dan fisik) [28]. Mutagen fisik yang banyak digunakan merupakan radiasi pengion, antara lain kosmik, gamma (γ) dan sinar X, selain itu terdapat partikel pengion energi tinggi yaitu alpha (α), beta (β), dan neutron, sementara cahaya ultra violet (UV) juga merupakan mutagen fisik meskipun bukan pengion [29].

Tabel 1. Karakteristik beberapa mutagen fisik

Mutagen	Tipe Frekuensi (s ⁻¹)	Tipe Energi (kJ/mol)	Tipe Energi Foton (eV)
Partikel	-	-	-
Alpha (α)	-	4.1 x 10 ⁸	-
Beta (β)	-	1.5 x 10 ⁷	-
Radiasi elektromagnetik	-	-	-
Sinar Kosmik	6 x 10 ²¹ s ⁻¹	2.4 x 10 ⁹	-
Sinar Gamma (γ)	3 x 10 ² s ⁻¹	1.2 x 10 ⁸	1 MeV
Sinar-X	3 x 10 ¹⁷ s ⁻¹	1.2 x 10 ⁵	100 keV
Ultra violet (UV)	3 x 10 ¹⁵ s ⁻¹	1200	4 eV

Sumber: [29]

Karakteristik beberapa mutagen fisik disajikan pada Tabel 1. Mutagen-mutagen tersebut secara umum merupakan sumber radioaktif berenergi tinggi yang dihasilkan dari reaksi nuklir [30]. Energi dilepaskan ketika melewati materi akibat proses ionisasi, berperan sebagai pengion atom dengan menghilangkan elektron dari atom. Proses tersebut membentuk molekul air terionisasi (H₂O^o) dan elektron bebas (e⁻), kemudian membentuk radikal ^oOH dan H^o, bila berikatan dengan oksigen menghasilkan hidrogen peroksidase (H₂O₂). Sementara elektron bebas (e⁻) mempolarisasi molekul air menjadi elektron terhidrasi (e^{-aq}), dan bila berikatan dengan oksigen menghasilkan anion superoksida (O₂^o). Radikal bebas primer (^oOH, H^o) dan radikal bebas sekunder (H₂O₂, O₂^o), keduanya disebut senyawa oksigen reaktif (SOR) [31].

Radiasi pengion juga dapat menstimulasi aktivitas sintetase oksidase nitrat, yang membentuk oksidase nitrat (⁺NO), dan bila berikatan dengan oksigen menghasilkan anion peroksinitrat (ONOO⁻), dan disebut senyawa nitrogen reaktif (SNR). SOR dan SNR dapat merusak ADN, menghasilkan beberapa perubahan, termasuk pemutusan ADN, kerusakan basa, pemecahan gula, pertautan silang, disfungsi telomer, dan bila terjadi kesalahan berpasangan, maka kerusakan akan menimbulkan mutasi, dan transformasi neoplastis, atau kematian sel [32]. Sel-sel dan individu-individu yang membawa mutasi disebut mutan [33]. Namun, kualitas mutasi (proporsi mutasi berguna) tidak berkorelasi positif dengan besar dosis, sehingga diperlukan pencarian mutasi yang diinginkan melalui seleksi [34].

Dosis iradiasi diukur dalam satuan Gray (Gy) (1 Gy = 0,10 krad = 1 J energi per kilogram iradiasi), dan dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu dosis tinggi (> 10 kGy), dosis sedang (1-10 kGy),

dan dosis rendah (< 1 kGy) [35]. Selain dosis iradiasi, faktor internal (genotip tanaman) dan faktor lingkungan selama dan sesudah radiasi, berpengaruh pada ekspresi generasi pertama dan selanjutnya (tidak berubah, berkurang, atau bertambah) [36].

PERAN IPTEK NUKLIR DALAM OPTIMALISASI PERBAIKAN POLIMER SUPERABSORBEN

Lingkungan pertumbuhan tanaman padi sangat menentukan produksi, terutama karena banyak faktor pembatas yang dimiliki lahan kering. Penggunaan pembenah tanah (*soil conditioner*) merupakan satu diantara upaya-upaya pemulihan kualitas tanah [37]. Polimer superabsorben merupakan satu contoh bahan pembenah tanah yang mulai dikomersialisasikan sejak tahun 1980-an, terutama karena fungsinya untuk mempertahankan air dalam tanah, dan membawa nutrisi (tanaman dan tanah), lebih khusus karena memiliki karakter hidrofilik yang baik (*high swelling capacity; high swelling rate*), dan biokompatibilitas serta biodegradabilitas yang baik [38].

Ikatan silang menyebabkan polimer superabsorben tidak larut dalam air atau pelarut, meskipun terdapat ikatan utama yang menyebabkannya mudah menyerap air, yaitu gugus hidrofilik yang terdiri dari gugus asam karboksilat (-COOH). Peristiwa tersebut menyebabkan ion dari zat terlarut dalam polimer, misalnya COO⁻ dan Na⁺ akan tertarik dengan molekul air (Gambar 1), sehingga terjadi interaksi antara polimer dengan molekul air sebagai mekanisme hidrasi [39]. Selain itu polimer superabsorben dapat diklasifikasikan berdasarkan morfologinya (serbuk, partikel, bola, serat,

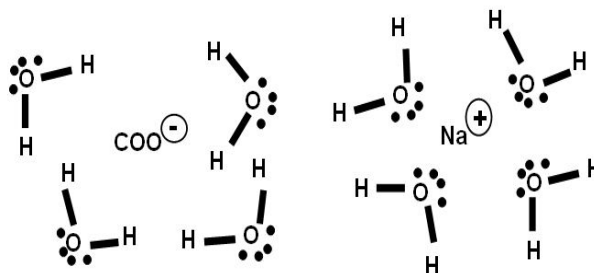
membran, dan emulsi), berdasarkan bahan penyusunnya (makromolekul alam, semi polimer sintesis, dan polimer sintesis), dan berdasarkan proses pembuatannya (polimer ikatan silang dan polimer cangkakan) [40]. Polimer-polimer superabsorben tersebut dibuat melalui proses pencangkakan (*grafting*) diikuti dengan kopolimerisasi menggunakan radiasi pengion [41].

Sumber radiasi yang sering digunakan dalam pengembangan polimer superabsorben adalah berkas elektron dan sinar gamma [42]. Proses polimerisasi dengan radiasi pengion dibagi menjadi tiga tahapan, yaitu: (1) tahap inisiasi, radikal bebas dihasilkan radiasi pengion lalu bereaksi dengan monomer belum jenuh; (2) tahap propagasi, pertumbuhan rantai polimer dengan adanya ikatan radikal propagasi dan monomer; (3) tahap terminasi, pertumbuhan radikal propagasi sudah mengalami kejenuhan lalu terjadi reaksi penggabungan hingga setimbang dan reaksi berhenti [39].

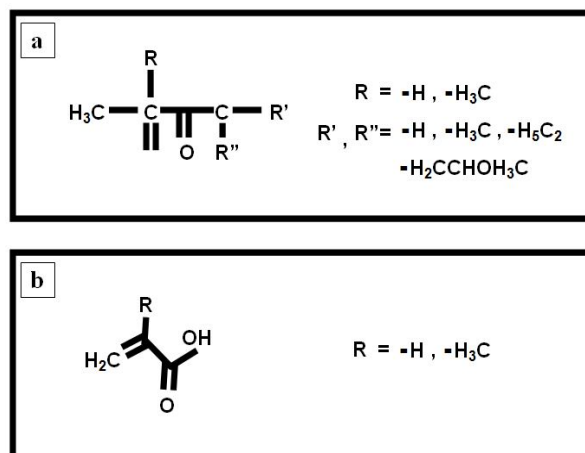
Peran radiasi pengion hanya pada tahap inisiasi [43], dimana serapan energi radiasi umumnya menginisiasi radikal bebas yang memiliki banyak keuntungan dibanding metode

konvensional [44]. Radikal bebas berikatan silang diinisiasi oleh sistem inisiator atau iradiasi energi tinggi, sehingga menghasilkan gel kopolimer yang memiliki kapasitas hidrofilik yang baik [45]. Selain proses polimerisasi, radiasi pengion juga digunakan saat proses pencangkakan. Namun pencangkakan hanya dapat dilakukan pada polimer tertentu, misalnya pada poliakrilamida dan asam poliakrilat yang memiliki gugus rantai aktif (R) (Gambar 2) [39].

Grafting dengan berkas elektron mengharuskan rasio energi yang diberikan pada material per unit panjang lebih tinggi dibanding sinar gamma [46]. Performa berkas elektron yang lebih baik juga didukung dengan kapasitas yang besar dalam pemrosesan, pengendalian luasan bahan yang akan dicangkakan lebih mudah, efisiensi pemanfaatan energi yang tinggi, dan penggunaan radiasi yang tergolong aman [47]. Selain itu dosis iradiasi berpengaruh pada fraksi gel, penyerapan air (*swelling ratio*), dan persentase *grafting* [41]. Persentase ketiga parameter tersebut tentu berpengaruh terhadap perubahan karakteristik polimer superabsorben.



Gambar 1. Mekanisme hidrasi polimer superabsorben



Gambar 2. a) Poliakrilamida dan b) Asam poliakrilat

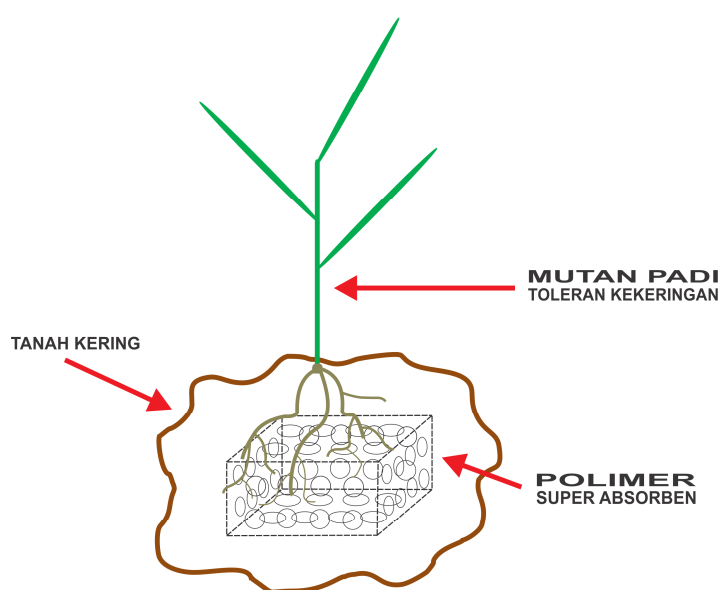
KOMBINASI TEKNOLOGI MUTAN PADI TOLERAN KEKERINGAN DAN POLIMER SUPERABSORBEN

Kedua teknologi, yaitu mutan padi toleran kekeringan dan polimer superabsorben, sebagai hasil IPTEK nuklir merupakan teknologi yang aman. Keamanan teknologi didasarkan pada batas dosis iradiasi, dan batas maksimum energi, sehingga materi tidak akan menjadi radioaktif [48]. Residu zat radioaktif dari sumber radiasi juga tidak ada, karena radionuklida sumber radiasi tersimpan rapat dalam kapsul logam berlapis, dan selama proses berlangsung materi tidak menempel pada sumber [49]. Selain itu, polimer superabsorben juga tersusun dari materi yang dapat terurai, misalnya hidroksietil selulosa dan diatomit, sehingga ramah lingkungan [50]. Berdasarkan potensi mutan padi toleran kekeringan dan polimer superabsorben yang aman dan ramah lingkungan tersebut, maka diperlukan upaya-upaya sehingga mendukung pengembangannya, dalam rangka optimalisasi pemanfaatan lahan kering untuk budidaya tanaman padi.

Teknologi pertama yaitu mutan padi toleran kekeringan, bisa didapatkan melalui teknik pemuliaan mutasi. Pemuliaan mutasi dilakukan dengan mengoptimalkan keragaman sumber genetik, melalui radiasi pengion (induksi mutasi). Secara teknis, materi reproduksi diiradiasi, terjadi

proses ionisasi yang menyebabkan perubahan pada jaringan, sel, genom, kromosom, dan ADN. Mutan-mutan yang didapatkan kemudian diseleksi sesuai prosedur pemuliaan tanaman [34]. Hasil penelitian menunjukkan dosis iradiasi gamma sebesar 0,35 kGy, meningkatkan toleransi padi terhadap cekaman kekeringan hingga -0,67 MPa [51], sementara dosis sebesar 0,02-0,1 kGy, mampu meningkatkan toleransi padi terhadap cekaman kekeringan hingga -0,99 MPa [52]. Selain itu, dosis iradiasi gamma sebesar 0,02-0,3 kGy juga dilaporkan mampu meningkatkan kualitas padi toleran kekeringan, misalnya intensitas aroma [53].

Teknologi kedua yaitu polimer superabsorben. Hasil penelitian menunjukkan dosis iradiasi berkas elektron sebesar 10 kGy menghasilkan *swelling ratio* hingga 250% [54], sementara dosis 50 kGy menghasilkan *swelling ratio* hingga 500% [47]. Selain itu, dosis iradiasi gamma sebesar 40 kGy menghasilkan *swelling ratio* 44,41% [55], dosis sebesar 6 kGy menghasilkan *swelling ratio* 404-469% [56], dosis 4 kGy menghasilkan *swelling ratio* 2.026% [57], dan dosis sebesar 2 kGy menghasilkan *swelling ratio* 5.212% [58]. Pengaruh dosis iradiasi terhadap *swelling ratio* yang beragam tersebut, dipengaruhi oleh bahan dasar polimer superabsorben (makromolekul alam, semi polimer sintesis, atau polimer sintesis).



Gambar 3. Ilustrasi sederhana kombinasi teknologi

Penelitian tentang kombinasi teknologi mutan padi toleran kekeringan, dan polimer superabsorben, perlu mendapat perhatian yang lebih besar oleh peneliti, pengambil kebijakan, dan masyarakat pengguna. Penelitian juga hendaknya dilaksanakan secara komprehensif, yaitu dalam satu tim terdiri dari beberapa disiplin ilmu, seperti pemuliaan tanaman, teknologi benih, agronomi, teknik nuklir, teknik kimia, agribisnis, dan komunikasi pertanian, sehingga dapat menghasilkan teknologi yang efektif, efisien, dan ekonomis (Gambar 3).

KESIMPULAN

IPTEK Nuklir dapat berperan dalam optimalisasi pemanfaatan lahan kering. Keterbatasan keragaman alami dalam pemuliaan tanaman padi toleran kekeringan, dan polimerisasi serta *grafting* polimer superabsorben, keduanya dapat diperbaiki melalui radiasi pengion. Kombinasi teknologi mutan padi toleran kekeringan dan polimer superabsorben dengan *swelling ratio* tinggi, tentu sangat potensial untuk dikembangkan dalam rangka meningkatkan produksi padi di lahan kering. Namun, penerapan teknologi tersebut tentu akan menimbulkan masalah berupa lemahnya diseminasi teknologi inovatif, dan lambatnya adopsi teknologi. Oleh sebab itu diperlukan perhatian yang lebih besar dari peneliti, pengambil kebijakan, dan masyarakat pengguna.

DAFTAR PUSTAKA

1. Xu, S., Xu, Y., Gong, L., Zhang, Q., Metabolomic prediction of yield in hybrid rice, *The Plant J.*, vol. 88, no. 2, pp. 219-227, 2016.
2. Timotiwi, P.B., Dewi, M.M., The effect of silica and manganese application on rice growth and yield, *Agrivita J. of Agricultural Science*, vol. 36, no. 2, pp. 182-188, 2014.
3. Badan Pusat Statistik (BPS), Laju pertumbuhan penduduk per tahun, <https://www.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/1268>, Diakses November, 2016.
4. Kusnadi, N., Tinaprilla, N., Indonesia rice supply and demand dynamic model, *Asian Forum on Business Education J.*, vol. 4, no. 3, pp. 502-520, 2011.
5. Badan Pusat Statistik (BPS), Impor beras menurut negara asal utama, 2000-2015, <https://www.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/1043>, Diakses November, 2016.
6. Suryana, R.N., Swasembada beras yang berkelanjutan untuk mendukung ketahanan pangan nasional, *Agrimedia*, vol. 17, no. 2, pp. 28-35, 2012.
7. Suwarno, Meningkatkan produksi padi menuju ketahanan pangan yang lestari, *Pangan*, vol. 19, no. 3, pp. 233-243, 2010.
8. Wahyunto, Lahan sawah di Indonesia sebagai pendukung ketahanan pangan nasional, *Informatika Pertanian*, vol. 18, no. 2, pp. 133-152, 2009.
9. Abdurachman, A., Dariah, A., Mulyani, A., Strategi dan teknologi pengelolaan lahan kering mendukung pengadaan pangan nasional, *J. Litbang Pertanian*, vol. 27, no. 2, pp. 43-49, 2008.
10. Nijbroek, R.P., Andelman, S.J., Regional suitability for agricultural intensification: a spatial analysis of the Southern Agricultural Growth Corridor of Tanzania, *International J. of Agricultural Sustainability*, vol. 14, no. 2, pp. 231-247, 2016.
11. Hutabarat, T.G., Gs, S., Situmorang, S., Analisis loyalitas petani terhadap benih padi unggul di kecamatan Seputih Raman kabupaten Lampung Tengah, *J. Ilmu-Ilmu Agribisnis*, vol. 1, no. 3, pp. 254-263, 2013.
12. Sitaresmi, T., Wening, R.H., Rakhmi, A.T., Yunani, N., Susanto, U., Pemanfaatan plasma nutfah padi varietas lokal dalam perakitan varietas unggul, *Iptek Tanaman Pangan*, vol. 8, no. 1, pp. 22-30, 2013.

13. Rajiman, Pengaruh bahan pembenah tanah di lahan pasir pantai terhadap kualitas tanah, Prosiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal 2014, 147-154, 2014.
14. Kartiwa, B., Dariah, A., Teknologi Pengelolaan Air Lahan Kering, In: Dariah, A., Kartiwa, B., Sutrisno, N., Suradisastra, K., Sarwani, M., Soeparno, H., Pasandaran, E. (Eds.), *Prospek Pertanian Lahan Kering dalam Mendukung Ketahanan Pangan*, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (BPPP), Kementerian Pertanian, Jakarta, 2012.
15. Piccolo, G.A., Andriulo, A.E., Mary, B., Changes in soil organic matter under different land management in Misiones province (Argentina), *Scientia Agricola*, vol. 65, no. 3, pp. 290-297, 2008.
16. Margolang, R.D., Jamilah, Sembiring, M., Karakteristik beberapa sifat fisik, kimia, dan biologi tanah pada sistem pertanian organik, *J. Online Agroekoteknologi*, vol. 3, no. 2, pp. 717-723, 2015.
17. Abdurachman, A., Dariah, A., Mulyani, A., Strategi dan teknologi pengelolaan lahan kering mendukung pengadaaan pangan nasional, *J. Litbang Pertanian*, **27**, (2), 43-49, 2008.
18. Amisnaipa, Susila, A.D., Susanto, S., Nursyamsi, D., Calibration of soil p test and phosphorus fertilizer requirement for peper (*Capsicum annum L.*) in inceptisols soil, *J. of Agronomy*, vol. 13, pp. 65-71, 2014.
19. Devani, V., Optimasi pola tanam pada lahan kering di kota Pekanbaru dengan menggunakan metoda *multi objective (goal) programming*, *J. Ilmiah Teknik Industri*, vol. 11, no. 2, pp. 165-172, 2012.
20. Katharina, R., Adopsi konservasi sebagai bentuk investasi usaha jangka panjang, *J. Manajemen Agribisnis*, vol. 4, no. 1, pp. 32-45, 2007.
21. Dariah, A., Heryani, N., Pemberdayaan lahan kering suboptimal untuk mendukung kebijakan diversifikasi dan ketahanan pangan, *J. Sumberdaya Lahan Edisi Khusus*, 1-16, 2014.
22. Prihatiningrum, A.E., Uji produktivitas model PKP 240 pada tanaman tebu varietas BL di lahan kering Mumbul kabupaten Jember, *J. Agrofiah*, vol. 7, no. 1, pp. 28-36, 2010.
23. Mulyani, A., Sarwani, M., Karakteristik dan potensi lahan sub optimal untuk pengembangan pertanian di Indonesia, *J. Sumberdaya Lahan*, vol. 7, no. 1, pp. 47-55, 2013.
24. Kumar, A., Dixit, S., Ram, T., Yadaw, R.B., Mishra, K.K., Mandal, N.P., Breeding high-yielding drought-tolerant rice: genetic variations and conventional and molecular approaches, *J. of Experimental Botany*, vol. 65, no. 21, pp. 6265-6278, 2014.
25. Breseghello, F., Traditional and modern plant breeding methods with examples in rice (*Oryza sativa L.*), *J. of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 61, pp. 8277-8286, 2013.
26. Herwibawa, B., Haryanto, T.A.D., Sakhidin, The effect of gamma irradiation and sodium azide on germination of some rice cultivars, *Agrivita J. of Agricultural Science*, vol. 36, no. 1, pp. 26-32, 2014.
27. Ambavane, A.R., Sawardekar, S.V., Sawantdesai, S.A., Gokhale, N.B., Studies on mutagenic effectiveness and efficiency of gamma rays and its effect on quantitative traits in finger millet (*Eleusine coracana L. Gaertn.*), *J. of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 120-125, 2015.
28. Sloczyriska, K., Powroznik, B., Pekala, E., Waszkielewicz, A.M., Antimutagenic compounds and their possible mechanisms of action, *J. of Applied Genetics*, vol. 55, no. 2, pp. 273-285, 2014.

29. MBA, C., Induced mutations unleash the potentials of plant genetic resources for food and agriculture, *Agronomy*, vol. 3, no. 1, pp. 200-231, 2013.
30. Pasangka, B., Refly, The application of multigamma radiation as a physical mutagen for breeding of local soybean, *J. of Agricultural Science*, vol. 5, no. 6, pp. 201-210, 2013.
31. Rosmala, A., Khumaida, N., Sukma, D., Alteration of leaf anatomy of *Handeuleum (Graptophyllum pictum L. Griff)* due to Gamma Irradiation, *Hayati J. of Biosciences*, vol. 23, no. 3, pp. 138-142, 2016.
32. Azzam, E.I., Gerin, J.P.J., Pain, D., Ionizing radiation - induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury, *Cancer Letters*, vol. 327, no. 1-2, pp. 48-60, 2012.
33. Zuhrah, A., Aini, N., Wardiyati, T., Respon morfologi tanaman sedap malam (*Polianthes tuberosa L. cv. Roro Anteng*) terhadap pemberian colchicine, *Buana Sains*, vol. 10, no. 2, pp. 153-158, 2010.
34. Oladosu, Y., Rafii, M.Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H.A., Miah, G., Usman, M., Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review, *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, vol. 30, no. 1, pp. 1-16, 2016.
35. Soedjono, S., Aplikasi mutasi induksi dan variasi somaklonal dalam pemuliaan tanaman, *J. Litbang Pertanian*, vol. 22, no. 2, pp. 70-78, 2003.
36. Ozerinia, O.V., Tsydendambaev, V.D., Effect of pre-sowing γ -irradiation of sea buckthorn seeds on the content and fatty acid composition of total lipids in the seeds of the first plant generation, *Russian J. of Plant Physiology*, vol. 58, no. 2, pp. 370-374, 2011.
37. Dariah, A., Sutono, S., Nurida, N.L., Hartatik, W., Pratiwi, E., Pembenhah tanah untuk meningkatkan produktivitas lahan pertanian, *J. Sumberdaya Lahan*, vol. 9, no. 2, pp. 67-84, 2015.
38. Guilherme, M.R., Aouada, F.A., Fajardo, A.R., Martins, A.F., Paulino, A.T., Davi, M.F.T., Rubira, A.F., Muniz, E.C., Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: a review, *European Polymer J.*, vol. 72, pp. 365-385, 2015.
39. Swantomo, D., Megasari, K., Saptaji, R., Pembuatan komposit polimer superabsorben dengan mesin berkas elektron, *J. Forum Nuklir*, vol. 2, no. 2, pp. 143-156, 2008.
40. Utami, U.B.L., Irwan, A., Mahmudah, M., Uji pengaruh pengikat silang metilenbisakrilamida (MBA) terhadap karakteristik polimer superabsorben kitosan tercampok asam akrilat (AA), *Sains dan Terapan Kimia*, vol. 8, no. 1, pp. 37-46, 2014.
41. Sutradhar, S.C., Khan, M.M.R., Rahman, M.M., Dafadar, N.C., The synthesis of superabsorbent polymers from carboxymethylcellulose/ acrylic acid blend using gamma radiation and its application in agriculture, *J. of Physical Science*, vol. 26, no. 2, pp. 23-39, 2015.
42. Ahmed, E.M., Hydrogel: preparation, characterization, and applications: a review, *J. of Advanced Research*, vol. 6, no. 2, pp. 105-121, 2015.
43. Craciun, G., Manaila, E., Stelescu, M.D., Electron beam synthesis and characterization of acrylamide/ acrylic acid hydrogels using trimethylolpropane trimethacrylate as cross-linker, *J. of Chemistry*, 2016, Article ID 1470965, 2016.
44. Bhuyan, M.M., Dafader, N.C., Hara, K., Okabe, H., Hidaka, Y., Rahman, M.M., Khan, M.M.R., Rahman, N., Synthesis of potato starch-acrylic-acid hydrogels by gamma radiation and their application in dye adsorption,

- International J. of Polymer Science*, 2016, Article ID 9867859, 2016.
45. Fekete, T., Borsa, J., Takacs, E., Wojnarovits, L., Synthesis of carboxymethylcellulose/ starch superabsorbent hydrogels by gamma irradiation, *Chemistry Central J.*, 2017, 11:46, 2017.
 46. Kakati, D.K., Bora, M.M., Deka, C., Cellulose graft copolymerization by gamma and electron, In: THAKUR, V.K., *Cellulose Based Graft Copolymer*, CRC Press, Boca Raton, 2015.
 47. Andriyanti, W., Suyanti, Ngasifudin, Pembuatan dan karakterisasi polimer superabsorben dari ampas tebu, *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*, 13, 1-7, 2012.
 48. Irawati, Z., Pengembangan teknologi nuklir untuk meningkatkan keamanan dan daya simpan bahan pangan, *J. Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, vol. 3, no. 2, pp. 41-52, 2007.
 49. Sutanto, J., Komparasi tingkat keasaman pada kopi arabika, kopi luwak dan kopi hasil iradiasi BATAN, *Prosiding SEMIRATA Bidang MIPA 2016, BKS-PTN Barat*, 1078-1085, 2016.
 50. Mukerabigwi, J.F., Lei, S., Fan, L., Wang, H., Luo, S., Ma, X., Qin, J., Huang, X., Cao, Y., Eco-friendly nano-hybrid superabsorbent composite from hydroxyethyl cellulose and diatomite, *RSC Advances*, vol. 6, pp. 31607-31618, 2016.
 51. Kadhimi, A.A., Radziah, C., Zain, C.M., Alhasnawi, A.N., Isahak, A., Ashraf, M.F., Mohamad, A., Doni, F., Yusoff, W.M.W., Effect of irradiation and polyethylene glycol on drought tolerance of MR269 genotype rice (*Oryza sativa* L.), *Asian J. of Crop Science*, vol. 8, pp. 52-59, 2016.
 52. Falahati, A., Kazemitabar, S.K., Bahrami, A.R., Lahouti, M., Rahimi, M.F., The study of gamma irradiation effects on drought tolerance in rice (*Oryza sativa* L.), *Indian J. of Crop Science*, vol. 2, no. 1, pp. 155-158, 2007.
 53. Sansenya, S., Hua, Y., Chumanee, S., Phasai, K., Sricheewin, C., Effect of gamma irradiation on 2-acetyl-1-pyrroline content, GABA content and volatile compounds of germinated rice (Thai upland rice), *Plants*, vol. 6, no. 2, pp. 18, 2017.
 54. Suliwarno, A., Hydrogel based on crosslinked methylcellulose prepared by electron beam irradiation for wound dressing application, *Indonesian J. of Chemistry*, vol. 14, no. 3, pp. 262-268, 2014.
 55. Tamat, S.R., Erizal, Gunawan, C., Sintesis hidrogel poli (n-vinil-2-pirolidon - asam tartrat) secara iradiasi gamma dan karakterisasinya, *J. Ilmu Kefarmasian Indonesia*, vol. 6, no. 1, pp. 7-14, 2008.
 56. Kiatkamjornwong, S., Chomsaksakul, W., Sonsuk, M., Radiation modification of water absorption of cassava starch by acrylic acid/ acrylamide, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 59, pp. 413-427, 2000.
 57. Kiatkamjornwong, S., Mongkolsawat, K., Sonsuk, M., Synthesis and property characterization of cassava starch grafted poly [acrylamide-co-(maleic acid)] superabsorbent via γ -irradiation, *Polymer*, vol. 43, pp. 3915-3924, 2002.
 58. Karadag, E., Uzum, O.B., Saraydin, D., Guven, O., Swelling characterization of gamma-radiation induced crosslinked acrylamide/maleic acid hydrogels in urea solutions, *Materials and Design*, vol. 27, no. 7, pp. 576-584, 2006.