

TEKNOLOGI PEMULIAAN MOLEKULER DUKUNG OPTIMALISASI PERTANIAN LAHAN RAWA

Dwinita W Utami

*Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Bioteknologi dan Sumber
Daya Genetik Pertanian*

Jl. Tentara Pelajar 3A, Bogor 16111, Indonesia

PENDAHULUAN

Terwujudnya ketahanan pangan nasional adalah salah satu prioritas pembangunan nasional pada setiap periode pemerintahan. Berbagai program pertanian senantiasa difokuskan untuk meningkatkan kemandirian pangan melalui pencapaian swasembada pangan, meskipun capaian masih di bawah harapan. Sasaran utama pembangunan pertanian pangan adalah peningkatan produksi beras nasional menuju swasembada beras. Pencapaian sasaran ini menghadapi beberapa tantangan dan ancaman antara lain: degradasi sumber daya lahan dan air, variabilitas perubahan iklim, tanah dan air di beberapa tempat di Indonesia, perubahan perkembangan hama dan penyakit tanaman akibat perubahan iklim global serta meningkatnya risiko gagal panen akibat banjir dan kekeringan (Balitbangtan 2014).

Keberhasilan pencapaian swasembada pangan adalah dengan pemanfaatan sumber daya pertanian secara optimal dengan penerapan teknologi maju dan kebijakan serta arah investasi

pertanian yang tepat, yaitu harus diarahkan pada sektor krusial yang memiliki potensi terbesar dalam jangka panjang. Berdasarkan pada potensi ketersediaan lahan dan pola pemanfaatannya, saat ini pengembangan pertanian pada lahan kering, lahan rawa pasang surut, rawa lebak dan optimalisasi lahan pertanian lainnya merupakan alternatif dalam upaya peningkatan produksi pangan nasional (Pasandaran *et al.* 2015).

Gerakan Revolusi Hijau di Indonesia di tahun 1970-an telah meningkatkan produksi padi nasional hingga tiga kali lipat (289 persen) selama 30 tahun, sehingga pemenuhan pangan tercapai dan mampu merubah Indonesia dari pengimpor beras menjadi negara yang berswasembada. Namun, dalam dua dasawarsa terakhir dirasakan dampak negatif dari revolusi hijau, karena ternyata tidak mampu menghantarkan Indonesia berswasembada pangan secara berkelanjutan. Upaya peningkatan produksi beras melalui upaya revolusi hijau menerapkan teknologi non-tradisional seperti penyediaan air melalui sistem irigasi, pemakaian pupuk kimia, penerapan pestisida sesuai tingkat serangan OPT dan penggunaan varietas unggul sebagai bahan tanam yang berkualitas. Namun dalam jangka panjang berdampak negatif, seperti penurunan keanekaragaman hayati karena pengembangan varietas unggul monokultur secara luas, kemampuan daya produksi tanah yang makin menurun karena pencemaran oleh penggunaan pupuk buatan yang berlebihan, munculnya jenis ras/strain/biotipe penyakit dan hama yang baru karena besarnya tekanan seleksi akibat pemakaian varietas unggul dan pestisida yang berkelanjutan. Dengan kondisi tersebut, seiring dengan peningkatan jumlah penduduk serta menurunnya kualitas dan luas lahan pertanian, penerapan revolusi hijau sudah tidak sesuai lagi (Las 2009).

Salah satu cara untuk menghadapi tantangan di atas adalah dengan menggunakan teknologi yang ramah lingkungan, tetapi tetap dapat meningkatkan produktivitas tanaman, misalnya

dengan memperbaiki produktivitas varietas lokal. Varietas lokal yang telah teradaptasi pada kondisi lingkungan tercekam sangat berpotensi sebagai sumber genetik, potensi genetik tersebut dapat dimanfaatkan secara optimal untuk peningkatan produksi padi nasional melalui pembentukan atau perbaikan varietas padi terutama dengan menggunakan teknologi molekuler (Jamil *et al.* 2015).

Varietas lokal rawa sebagai komponen penting sumber keragaman genetik memiliki susunan gen-gen fungsional yang membentuk tanaman padi dapat teradaptasi di lingkungan rawa. Akumulasi gen-gen unggul ini adalah hasil evolusi dan seleksi alam selama berjuta tahun yang membentuk daya hidup, kompetisi dan adaptasi yang tinggi (Sumarno 2014). Pemanfaatan gen-gen unggul untuk mendukung program pemuliaan padi rawa dapat ditempuh melalui teknologi molekuler. Pemuliaan molekuler dapat meningkatkan presisi seleksi dengan mendasarkan pada gen-gen unggul tersebut. Pemuliaan molekuler juga menentukan arah seleksi, misalnya dapat meminimalisir kekurangan dari padi lokal, yaitu daya hasil yang rendah dan umur yang dalam atau justru dipertahankan karena terkadang karakter ini memudahkan petani untuk menanam. Namun demikian pemuliaan molekuler tidak dapat berdiri sendiri, tetapi hanya sebagai *tools* tambahan dalam seleksi yang masih memerlukan seleksi berdasarkan fenotipe.

Makalah ini mengulas pemanfaatan teknologi pemuliaan molekuler dalam pembentukan varietas unggul padi lahan rawa, sebagai bagian dari paket teknologi pertanian spesifik lokasi.

EKOREGION LAHAN RAWA, POTENSI SERTA KENDALA PENGEMBANGANNYA

Topografi

Faktor topografi lahan rawa bukanlah merupakan pembatas. Hal ini karena topografi lahan rawa relatif datar dengan perbedaan sekitar 1-3 cm untuk wilayah pantai. Topografi dari pinggir sungai ke pedalaman cenderung naik, namun demikian faktor topografi penting dalam hal pengaturan air, yaitu untuk pembuatan jaringan saluran irigasi dan drainase lahan rawa (Noor 1996).

Iklm

Curah hujan dan suhu merupakan faktor penting yang berpengaruh ke pengembangan lahan rawa untuk pertanian. Sebagian besar kawasan lahan rawa termasuk dalam kawasan cukup hujan dengan curah hujan antara 2.000-4.000 mm/tahun. Rata-rata curah hujan bulanan >200 mm, dengan jumlah bulan basah 7-10 bulan/ tahun, pada bulan September/Okttober sampai April/Mei. Berdasarkan jumlah dan pola hujan yang cukup merata tersebut maka memungkinkan untuk bertanam padi di lahan rawa sepanjang tahun (Noor 1996).

Tata air

Tata kelola air merupakan faktor penting budi daya padi di lahan rawa. Berdasarkan jangkauan pengaruh pasang dan intrusi air laut maka bentang lahan rawa dapat dibagi ke dalam 3 zone, yaitu:

Zone I: Rawa pantai/perairan payau

Lahan rawa pantai adalah daerah rawa yang dipengaruhi oleh pasang surut harian air payau atau asin. Fisiografi utama terdiri atas gambut dan/atau marine. Pada wilayah ini tanahnya mengandung garam-garam yang tinggi dan dikategorikan sebagai tipologi lahan salin dan tidak sesuai untuk lahan pertanian.

Zone II: Rawa pasang surut/perairan air tawar

Lahan rawa pasang surut adalah daerah rawa yang mendapatkan pengaruh langsung atau tidak langsung oleh ayunan pasang surut air laut atau sungai di sekitarnya. Luas wilayahnya didasarkan pada satuan hidrologi (kekuatan dan jangkauan pasang) dan ketebalan gambut. Berdasarkan daya jangkau, kekuatan pasang dan hidrotopografi wilayah rawa pasang surut dapat dibagi ke dalam 4 tipe luapan: tipe A, B, C dan D. Lahan dengan tipe luapan A: adalah lahan yang terluapi oleh pasang besar maupun kecil. Lahan dengan tipe luapan B: adalah lahan yang terluapi air pasang pada saat pasang besar tetapi tidak pasang kecil sehingga drainase terjadi secara harian. Lahan dengan tipe luapan C: adalah lahan yang tidak terluapi air pasang besar maupun kecil, tetapi terpengaruh oleh air tanah dalam kedalaman <50 cm dari permukaan tanah. Sedangkan lahan dengan tipe luapan D: adalah lahan yang tidak terluapi air pasang besar maupun kecil, tetapi terpengaruh oleh air tanah pada kedalaman >50 cm dari permukaan tanah.

Lahan rawa pasang surut terbentuk dari endapan fluviomarin (sungai dan laut) dan dicirikan oleh adanya lapisan tanah yang mengandung pirit (FeS_2), sebagai lapisan sulfidik yang memiliki profil tanah berwarna kelabu (*grey layer*). Lapisan ini akan menjadi penentu tingkat produktivitas lahan pasang surut. Berdasarkan tipologinya, lahan pasang surut terdiri atas lahan potensial dan lahan sulfat masam (Widjaja-Adhi *et al.* 1992; Harjowigeno & Sarwono 2002).

- Lahan potensial adalah lahan rawa yang mempunyai jenis tanah sulfat masam potensial dengan kadar pirit <2% pada kedalaman >50 cm dari permukaan tanah. Kendala sebagai lahan pertanian tergolong kecil karena tanah termasuk tidak bermasalah. Perlakuan drainase pada lahan potensial akan menghasilkan perbaikan kondisi lahan sehingga dapat dimanfaatkan untuk pertanian.
- Lahan sulfat masam adalah lahan rawa yang mempunyai kandungan pirit >2% pada kedalaman <50 cm. Lahan sulfat masam pada umumnya memiliki lapisan sulfidik dangkal akan semakin bermasalah bila dilakukan drainase. Lapisan sulfidik sangat rentan mengalami oksidasi yang menghasilkan peningkatan kemasaman tanah. Proses oksidasi karena perlakuan drainase akan menyebabkan oksigen masuk ke dalam pori tanah dan akan mengoksidasi pirit membentuk asam sulfat, ion hydrogen dan Fe^{3+} . Apabila oksidasi pirit berlangsung cepat maka akan terbentuk mineral jarosit berupa bercak-bercak karatan berwarna kuning jerami (Dent 1986). Kendala utama pemanfaatan tanah sulfat masam actual adalah karena memiliki reaksi masam ekstrim dan banyak kandungan ion-ion yang bersifat racun/toksik, sehingga tidak sesuai untuk perkembangan tanaman karena akan menghambat perkembangan akar yang selanjutnya akar akan diselimuti oleh deposit besi oksida sehingga proses penyerapan hara dan air terganggu. Pada kondisi seperti ini, pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme tanah juga terhambat.

Ekosistem lahan gambut juga memungkinkan terbentuk di kawasan rawa pasang surut. Tanah gambut menempati cekungan yang luas dan mempunyai ketebalan yang bervariasi. Tipologi penciri utama lahan gambut adalah ketebalan, kematangan dan atau kadar bahan organiknya. Di bagian pinggir ditempati gambut dangkal dengan ketebalan 0,5-1 m dan gambut sedang dengan ketebalan 1-2 m, seringkali mengandung sisipan-sisipan

lapisan tanah mineral. Keduanya biasanya merupakan gambut topogen yang relative subur (*eutrofik*) sampai agak subur (*mesotrofik*). Semakin ke bagian tengah depresi, lapisan gambut semakin tebal dan kesuburannya cenderung makin menurun. Tanah gambut dalam (2-3 m) dan gambut sangat dalam (>3 m) disebut sebagai gambut *ombrogen* dengan tingkat kesuburan rendah (*oligotrofik*). Bagian tengah kawasan gambut seringkali permukaan gambut meninggi membentuk semacam kubah (*peat dome*) (Subagyo 2002).

Kendala utama pemanfaatan lahan gambut untuk pertanian adalah kemasaman tanah yang tinggi, kejenuhan basa dan ketersediaan hara yang sangat rendah dan asam-asam organik dari golongan fenolat yang beracun bagi pertumbuhan tanaman (Kononova-, 1968). Tanah gambut memerlukan input yang relatif tinggi, karena adanya kelatiasi unsur hara mikro oleh bahan organik (Rachim 1995). Oleh karenanya tanah gambut memerlukan ameliorant yang cukup untuk menetralisasi asam-asam organik beracun agar pertumbuhan tanaman tidak terganggu. Dibandingkan dengan lahan mineral, lahan gambut menyimpan 10 kali lebih banyak karbon atas permukaan dan bawah permukaan. Karbon tersebut sangat rentan mengalami emisi akibat proses dekomposisi dan kebakaran. Oleh karenanya, ekosistem gambut dianggap sebagai sumber emisi gas rumah kaca terbesar dari sektor pertanian (Subiksa 2015).

Zone III: Rawa lebak/perairan air tawar pedalaman

Lahan rawa lebak adalah daerah rawa yang merupakan daerah cekungan (depresi) suatu daratan, tidak dipengaruhi gerakan pasang surut tetapi mengalami genangan. Hujan di bagian hulu (daerah atas) mengalir menuju hilir yang kemudian tertampung tanpa ada saluran drainase di lahan rawa lebak sebagai genangan air sepanjang tahun. Ketinggian genangan berkisar 25-100 cm dengan lama genangan berkisar 3-6 bulan. Ber-

dasarkan ketinggian dan lama genangannya, rawa lebak dapat dipilah ke dalam 4 tipologi: lebak dangkal (tinggi genangan 25-50 cm, selama minimal 3 bulan/ tahun); menengah (tinggi genangan 50-100 cm, selama 3-6 bulan/ tahun); dalam (tinggi genangan >100 cm, selama >6 bulan/tahun).

Lahan padi rawa lebak adalah lahan dengan frekuensi genangan yang relatif lama. Sehingga expose tanaman terhadap Fe^{2+} terjadi secara terus menerus. Hasil pengujian tingkat toleransi tanaman terhadap cekaman keracunan Fe^{2+} pada beberapa varietas padi rawa menunjukkan bahwa pada umumnya mengalami gejala *bronzing* sedang sampai peka (skor 3-4), seperti pada varietas Inpara3, IR42, Banyuasin, Batanghari dan Mahsuri. Diantara varietas-varietas tersebut, varietas Mahsuri menunjukkan skor *bronzing* yang paling rendah.

PEMULIAAN MOLEKULER VARIETAS UNGGUL PADIRAWA

Varietas unggul merupakan komponen teknologi utama dalam pembangunan pertanian. Melalui penanaman varietas unggul maka produktivitas lahan dapat dioptimalkan dengan hasil panen lebih berkualitas, seragam dan stabilitas produksi lebih terjaga (Haryono 2014). Dalam rangka pembentukan varietas unggul maka kekayaan koleksi sumber daya genetik (SDG) merupakan faktor penting. Pengungkapan dan pemanfaatan segala potensi genetik SDG dilakukan melalui kegiatan pemuliaan. Pengembangan teknologi marka molekuler diperlukan di samping untuk pengungkapan potensi genetik suatu aksesi SDG juga untuk meningkatkan tingkat presisi seleksi dari kegiatan pemuliaan. Beberapa tahapan yang dilakukan dalam kegiatan pemuliaan molekuler adalah meliputi:

PRE BREEDING MATERIAL GENETIK

Indonesia sebagai bagian dari *secondary center of origin* tanaman padi, memiliki sumber genetik untuk pengembangan varietas unggul padi, termasuk diantaranya varietas unggul padi untuk lahan rawa. Hal ini menjadi dasar justifikasi yang kuat perlunya pengembangan *bank gene* nasional sebagai upaya pelestarian SDG padi di Indonesia (Suwarno 2014). Koleksi SDG padi di *bank gene* BB Biogen menurut ekosistem dan golongannya seperti ditmpilkan pada Tabel 3.2.

Sebagian aksesori SDG di bank gen BB Biogen tersebut telah dikarakterisasi berdasarkan beberapa karakter penting, diantaranya karakterisasi karakter toleran terhadap keracunan Fe. Karakterisasi ini ditujukan untuk menggambarkan keragaman genetik SDG baik berdasarkan keragaan genotipe ataupun fenotipnya. Studi keragaman genetik yang telah dilakukan adalah terhadap 288 aksesori SDG padi menggunakan 384 set marka SNP yang diasosiasikan dengan karakter toleran terhadap keracunan Fe. Total 288 SDG yang dianalisis terdiri dari varietas lokal, varietas unggul padi sawah dan gogo dan varietas unggul padi rawa. Hasil dari analisis PCA ini seperti tergambar pada Gambar 3.1.

Secara garis besar 288 aksesori plasma nutfah mengelompok menjadi 2 kelompok, yaitu: (i). Kelompok SDG, yang terdiri dari varietas unggul padi sawah dan gogo seperti golongan varietas *IR based*, Inpari, dan Inpago; (ii) Kelompok varietas/ galur padi rawa, termasuk didalamnya aksesori padi lokal (Utami *et al.*

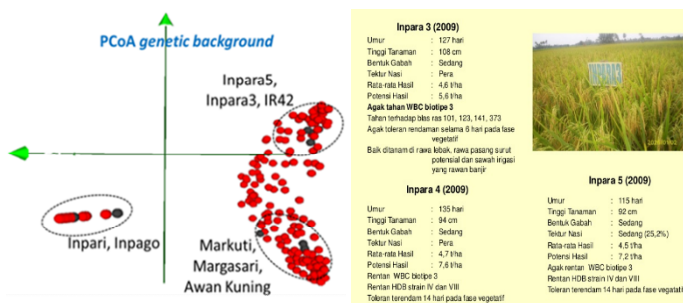
Tabel 3.2. Koleksi SDG padi di bank gene BB Biogen, menurut kelompok ekosistem dan jenisnya (Suwarno 2014)

Kelompok ekosistem	Jumlah aksesori	Kelompok jenis/golongan	Jumlah aksesori
Padi sawah	2.623	Cere	3.793
Padi gogo	750	Gundil	105
Padi rawa	681	Bulu	156
Jumlah	4.054	Jumlah	4.054

Submitted 2017). Kedekatan hubungan total 288 aksesori berdasarkan karakter toleransi terhadap keracunan Fe, terdeteksi berdasarkan analisis PCA *clustering* dan menunjukkan adanya 2 kelompok. Satu kelompok besar merupakan kelompok galur-galur *Fe-breeding lines*, yang terdiri atas 2 subgrup, yaitu sub-grup yang berlatar belakang genetik varietas unggul (Inpara3, Inpara5 dan IR42) dan subgrup lainnya adalah kelompok yang berlatar belakang genetik padi lokal (Markuti, Margasari dan Awan kuning). Kelompok yang lainnya, yang terlihat terpisah adalah kelompok SDG varietas unggul padi sawah dan padi gogo (Inpari dan Inpago).

Gambar 3.1 juga menunjukkan, hasil studi keragaman SDG menggunakan teknologi marka molekuler untuk karakter toleransi terhadap keracunan Fe ini dapat mengidentifikasi pengelompokan SDG berdasarkan kedekatan alel/gen yang berkontribusi terhadap cekaman keracunan Fe. Informasi ini sangat diperlukan dalam pembentukan populasi untuk perakitan varietas unggul padi rawa, sedangkan marka-marka molekuler yang memiliki tingkat deferensiasi (polimorphis) tinggi dapat dimanfaatkan untuk membantu seleksi.

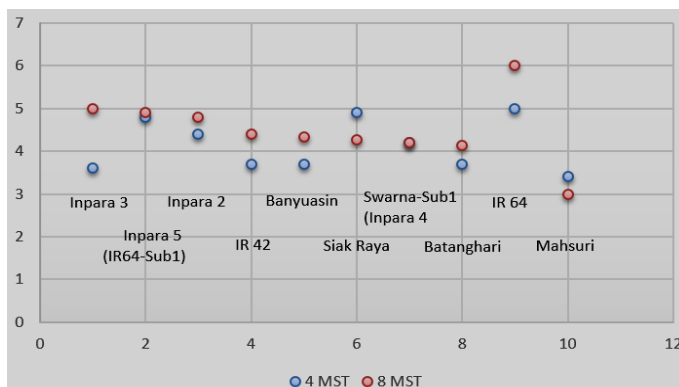
Saat ini telah ada 25 varietas padi rawa yang dilepas oleh Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian (Koesrini *et al.*



Gambar 3.1. PCA clustering kesamaan tingkat respon toleransi keracunan Fe dan keragaman deskripsi beberapa varietas Inpara

2014). Pada umumnya varietas padi rawa pasang surut berumur antara 117-145 hari dengan rata-rata hasil 3-6,5 t/ha dan beradaptasi baik pada lahan dengan tingkat kemasaman dan keracunan besi dengan skala rendah sampai sedang (Subiksa 2015). Di antara varietas-varietas padi rawa yang dilepas, beberapa di antaranya telah banyak digunakan sebagai tetua persilangan dalam program perakitan galur baru padi rawa, yaitu: Inpara 2, Inpara 3, Inpara 4, Inpara 5, IR42, Banyuasin, Siak Raya dan Batanghari. Di samping itu padi lokal (introduksi) yang juga banyak digunakan sebagai tetua persilangan di antaranya Mahsuri. Keragaan toleransi beberapa varietas padi rawa tersebut terhadap cekaman keracunan Fe, di lahan rawa lebak pada stadia tanaman yang berbeda, seperti ditampilkan pada Gambar 3.1.

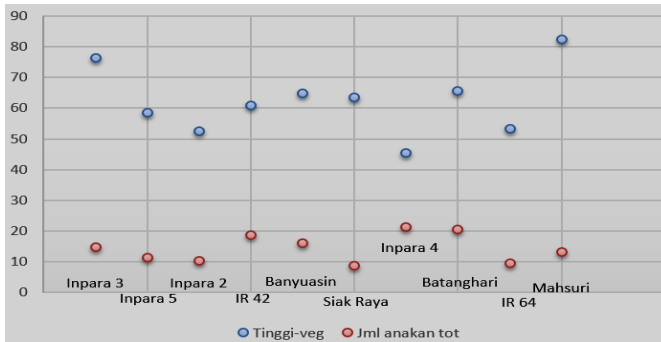
Lahan padi rawa lebak adalah lahan dengan frekuensi genangan yang relatif lama, sehingga *expose* tanaman terhadap Fe^{2+} terjadi secara terus menerus. Hasil pengujian tingkat toleransi tanaman terhadap cekaman keracunan Fe^{2+} pada beberapa varietas padi rawa menunjukkan bahwa pada umumnya mengalami gejala *bronzing* sedang sampai peka (skor 3-4), seperti pada



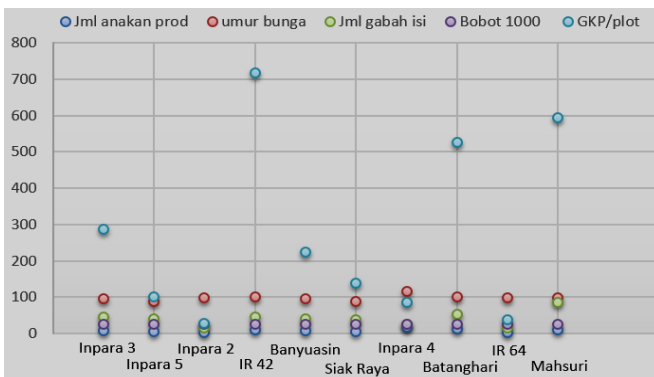
Gambar 3.2. Tingkat bronzing beberapa varietas padi rawa berdasarkan pengujian di lahan rawa lebak, Taman Bogo, Lampung, MH2015/2016

varietas Inpara3, IR42, Banyuasin, Batanghari dan Mahsuri. Diantara varietas-varietas tersebut, varietas Mahsuri menunjukkan skor *bronzing* yang paling rendah.

Adanya cekaman keracunan Fe akan berpengaruh pada perkembangan tinggi tanaman (Abu *et al.* 1989) dan jumlah anakan total dari varietas padi rawa seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Di samping tinggi tanaman dan perkembangan vegetatif lainnya, cekaman keracunan Fe juga akan berpengaruh pada



Gambar 3.3. Keragaan tinggi tanaman dan jumlah anakan beberapa varietas padi rawa berdasarkan pengujian di lahan rawa lebak, Taman Bogo, Lampung, MH2015/2016



Gambar 3.4. Keragaan karakter generatif beberapa varietas padi rawa berdasarkan pengujian di lahan rawa lebak, Taman Bogo, Lampung, MH2015/2016

karakter-karakter stadia generatif, seperti umur berbunga, jumlah anakan produktif, jumlah gabah isi, bobot 1000 dan gabah kering panen (GKP/plot). Keragaan karakter-karakter tersebut pada varietas-varietas padi rawa di lahan rawa lebak seperti pada Gambar 3.4.

PEMANFAATAN MARKA MOLEKULER UNTUK SELEKSI BERBASIS GEN TOLERAN KERACUNAN FE

Pemanfaatan teknologi marka molekuler dapat diaplikasikan untuk mengidentifikasi faktor genetik (gen) penentu keragaman karakter toleran terhadap keracunan Fe. Pemahaman aspek genetik dari mekanisme toleransi tanaman padi terhadap cekaman keracunan Fe sangat diperlukan dalam mendisain marka molekuler yang akan diaplikasikan. Terdapat beberapa hipotesis mengenai mekanisme sifat toleran keracunan Fe (Fe^{2+}) pada tanaman padi, yaitu (Utami *et al.* 2014):

1. Tanaman mampu mendistribusikan Fe yang bersifat racun ke dalam bagian tanaman yang berbeda sehingga mengurangi efek racun dari ion ini (*partitioning mechanism*). Ion Fe^{2+} yang telah terserap akan ditransportasikan oleh suatu gen transporter iron regulator transporter (IRT1) (Eide *et al.* 1996) dan IRT2 (Vert *et al.* 2001) ke bagian sel-sel tanaman yang lain. Gen ini berperan dalam mekanisme *partitioning* Fe^{2+} ke beberapa bagian tanaman yang berbeda sehingga tanaman dapat lebih toleran pada kondisi Fe^{2+} yang berlebihan.
2. Tanaman mampu mencegah terserapnya Fe oleh akar (*uptake mechanism*). Penyerapan ion fero (Fe^{2+}) dari tanah ke dalam sel akar diperankan oleh suatu protein transporter. Penyerapan ini terjadi setelah ion feri (Fe^{3+}) direduksi menjadi ion fero (Fe^{2+}) pada membran plasma sel akar (Eide *et al.*, 1996; Robinson *et al.* 1999). Proses reduksi ini diperankan oleh gen Fe^{3+} *chelate reductase* (FRO2, FRO1, dan FRO3). Akar tanaman

tersebut mampu membebaskan proton untuk mereduksi ion Fe^{3+} dalam tanah menjadi ion Fe^{2+} sehingga dapat terserap tanaman.

3. Tanaman mempunyai kemampuan untuk bertahan dari efek racun radikal O_2 yang terbentuk setelah Fe terserap oleh akar dan ditranslokasikan ke daun (*tissue tolerant mechanism*) (Asch *et al.* 2005; Becker *et al.* 2005). Jadi tanaman memiliki 2 mekanisme, baik mekanisme strategi 1 dan strategi 2. Beberapa gen yang berperan di strategi 1 dan strategi 2, diduga membentuk mekanisme toleransi strategi 3 ini. Gen OsIRT1 dan OsIRT2 bersifat homolog dengan protein zinc transporter (zinc regulated transporter/ZRT) (Zhao dan Eide, 1996).

Perkembangan teknologi genomik, yang meliputi pemetaan *quantitative trait locus* (QTL), penemuan gene (*gene discovery*), dan sekuen genom secara lengkap, telah memungkinkan untuk melakukan pencarian alel yang berguna dalam koleksi plasma nutfah padi yang melimpah untuk perbaikan varietas melalui suatu strategi yang disebut sebagai *allele mining* (Utami *et al.* 2009), termasuk dimungkinkannya pencarian alel dari gen yang berkontribusi membentuk sifat toleran terhadap keracunan Fe, melalui pendisainan marka molekuler untuk membantu seleksi.

Disain marka molekuler dilakukan atas dasar posisi genetik (*genetic map*) dari gen/alel/kelompok gen (QTL) yang telah teridentifikasi terpetakan dalam genom padi. Penelitian pemetaan genetik menggunakan marka SNP telah teridentifikasi LD blok di beberapa kromosom terpetakannya gen/alel/QTL yang berperan membentuk sifat toleran terhadap keracunan Fe. LD blok tersebut terpetakan di beberapa kromosom, yaitu: LD blok 1 (kromosom 1); LD blok 2 (kromosom 2 dan 3); dan LD blok 3 (kromosom 4 dan 7) (Utami *et al.* 2017), *Submitted*) (Gambar 2.16).

- LD blok 1 yang terdapat di kromosom 1, terpetakan pada gen *IRT1*, *qFETOX1* (Dufrey *et al.*, 2009) dan *qFETOX1-3* (Wu *et al.*

1997; 1998). Gen *IRT1* (*Iron Regulation Transporters*) adalah satu gen yang berperan dalam mekanisme toleransi keracunan Fe strategi I (Bennett *et al.* 2011; Rout *et al.* 2015). Gen ini berperan dalam transport Fe^{2+} dari jaringan epidermal akar melawati membran plasma masuk ke dalam sitosol (Robinson *et al.* 1999; Rout *et al.* 2015). Sedangkan Vert *et al.*, (2001) menyebutkan bahwa gen *IRT1* berperan dalam mekanisme *partitioning* Fe^{2+} ke beberapa bagian tanaman yang berbeda, sehingga tanaman dapat lebih toleran pada kondisi Fe^{2+} yang berlebihan. Ekspresi dari gen *IRT* ini terjadi salah satunya pada daun (Ishimaru *et al.* 2006), sehingga dapat teramati sebagai gejala *bronzing* akibat cekaman keracunan Fe. Kelompok alel yang terdapat pada LD blok 1 ini diduga berperan dalam aktivitas *partitioning* Fe^{2+} sebagai bagian dari mekanisme strategi 1, toleransi tanaman padi terhadap keracunan Fe. Tanaman yang memiliki mekanisme toleran strategi 1 ini dimungkinkan ditanam di lahan rawa pasang surut, khususnya tipe B atau C dimana lahan tergenang saat pasang air laut, sehingga memungkinkan proses oksidasi Fe^{2+} , sehingga tanaman untuk sesaat terbebas dari cekaman keracunan Fe^{2+} . Selama tergenang Fe^{2+} yang terserap, dimungkinkan untuk didistribusikan ke beberapa bagian organ tanaman melalui mekanisme *partitioning*, sehingga tanaman terhindar dari efek keracunan Fe^{2+} . Marka-marka yang terpetakan pada posisi LD blok 1 dapat diaplikasikan sebagai marka seleksi melalui analisis gabungan (*association test*) dengan keragaan data fenotipe.

- LD blok 2 yang terdapat di kromosom 2 dan 3, Hasil analisis pemetaan asosiasi, diketahui bahwa pada kromosom 2 dan 3 masing-masing terdapat 2 kelompok alel yang signifikan terhadap tingkat *bronzing* dari SDG yang diuji (Gambar 3.5). Posisi genetik kelompok alel di kromosom 2, terpetakan pada posisi 26,3 kb, sesuai dengan peta genetik qFE-TOX-2-1 (Shimizu *et al.* 2009) dan 31,8 kb, sesuai dengan qFETOX-2 (Wu *et al.* 2014). Wu *et al.* (2014) menyebutkan bahwa

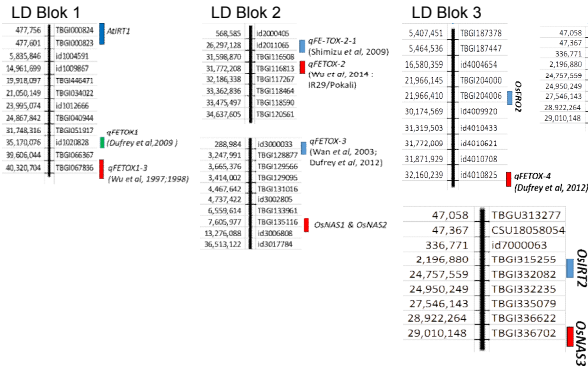
qFETOX-2 turut berperan dalam pengaturan ukuran jaringan *aerenchym* akar. Jaringan *aerenchym* adalah jaringan parenkim penyimpan udara dengan struktur ruang antar sel yang besar. Jaringan ini berkontribusi dalam proses oksidasi internal tanaman (Colmer 2002). Ukuran yang lebih besar akan meningkatkan kekuatan oksidasi akar yang juga akan lebih meningkatkan kemampuan *exclusion* Fe²⁺ pada akar tanaman toleran (Wu *et al.* 2014). Dengan demikian tanaman dapat membatasi penyerapan Fe²⁺. Mekanisme ini termasuk dalam mekanisme strategi toleransi. LD blok 2 yang lain juga terpetakan di kromosom 3, yang juga terdeteksi di 2 posisi genetik, yaitu pada posisi 3.2 kb (Wan *et al.* 2003; Dufrey *et al.* 2012) dan 10.9 kb (Inoue *et al.* 2003). Berdasarkan analisis kandidat loci, kelompok alel yang terdapat di kromosom 2 dan 3 diduga berperan dalam aktivitas *exclusion* Fe²⁺ sebagai bagian dari mekanisme strategi 2 toleransi tanaman padi terhadap keracunan Fe. Tanaman yang memiliki mekanisme toleransi strategi 2 dimungkinkan di-tanam di lahan rawa lebak, di mana genangan secara relatif terjadi dalam waktu yang lama. Minimnya proses oksidasi di lahan rawa lebak mengakibatkan tanaman tergenang dan terkspose dengan Fe²⁺ secara terus menerus. Melalui mekanisme *exclusion* Fe²⁺ tanaman dapat bertahan karena mampu membatasi penyerapan Fe²⁺. Marka-marka yang terpetakan pada posisi LD blok 2 dapat diaplikasikan sebagai marka seleksi melalui analisis gabungan (*association test*) dengan keragaan data fenotipe.

- LD blok 3 yang terdapat di kromosom 4 dan 7 terdeteksi masing-masing 2 kelompok alel, yaitu: di kromosom 4 terpetakan sesuai pada posisi gen *OsFRO2* (Gross *et al.* 2003) dan QTL, *qFETOX-4* (Dufrey *et al.* 2012); di kromosom 7 terpetakan sesuai dengan gen *OsIRT2* (Gross *et al.* 2003) dan *OsNAS3* (Inoue *et al.* 2003) (Gambar 2.15). Beberapa gen yang termasuk dalam LD blok di kromosom 4 dan 7 ini telah diketahui

berperan dalam mekanisme toleransi Fe, strategi I dan II (Kobayashi *et al.* 2012). Keragaan tanaman yang memiliki mekanisme strategi 3 ini memiliki keragaan akar (*root*) yang kokoh dan tanaman (*shoot*) yang unggul pada kondisi keracunan Fe. Diduga varietas ini memiliki mekanisme toleransi pada tingkat *root*, yaitu regulasi penyerapan Fe^{2+} sekaligus kemampuan *partitioning* pada bagian *shoot* (Utami *et al.* Submitted 2017). Saikia *et al.* (2012), menyebutkan bahwa salah satu contoh tanaman yang terindikasi mempunyai mekanisme toleransi strategi 3 ini adalah varietas Mahsuri, pada media Fe^{2+} 350 mg/l, varietas ini menunjukkan adanya pembatasan penyerapan Fe^{2+} uptake (mekanisme strategi 2/*exclude* Fe^{2+}) dan peningkatan aktivitas SOD (Superoksida Dismutase) antioksidan enzim (mekanisme strategi 1/*partitioning* Fe^{2+}) yang berfungsi mengurangi pengaruh cekaman keracunan Fe. Tanaman/varietas padi yang memiliki mekanisme strategi 3 ini dapat dikategorikan sebagai tanaman dengan tingkat toleransi yang luas (*broad mechanism tolerant*) yang dapat ditanam baik di lahan rawa pasang surut maupun lahan rawa lebak. Marka-marka yang terpetakan pada posisi LD blok 3 dapat diaplikasikan sebagai marka seleksi melalui analisis gabungan (*association test*) dengan keragaan data fenotipe.

KERAGAAN GALUR HARAPAN PADI RAWA HASIL PEMULIAAN MOLEKULER

Pemuliaan molekuler telah diaplikasikan dalam program pemuliaan, termasuk diantaranya pemuliaan untuk padi rawa. Beberapa galur harapan telah terpilih berdasarkan seleksi menggunakan marka molekuler berbasis gen. Galur-galur harapan ini dirakit melalui persilangan *multi-parents* dengan *background* genetik yang luas, yang menyertakan SDG varietas unggul dan padi lokal (Tabel 3.3).

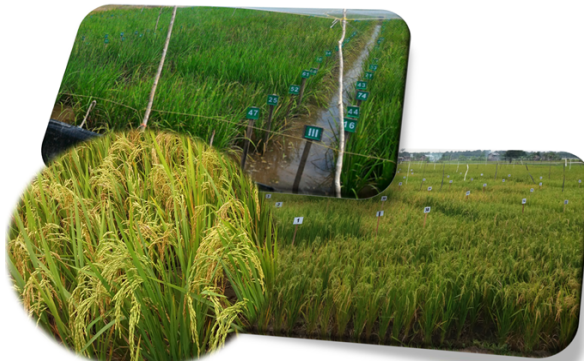


Gambar 3.5. Kelompok gen/alel/QTL untuk karakter toleran terhadap keracunan Fe, yang teridentifikasi terpetakan di LD blok 1, LD blok 2 dan LD blok 3 berdasarkan hasil analisis Genome Wide Assosiation Mapping (GWAS) (Utami et al. Submitted 2017)

Beberapa calon varietas hasil pemuliaan molekuler ini ditunjukkan untuk meningkatkan produktivitas dan perbaikan beberapa karakter varietas unggul rawa yang sudah dilepas sebelumnya, seperti IR42, Inpara 2, Inpara 3 dan Banyuasin. Hasil Uji Daya Hasil Pendahuluan dan Lanjutan beberapa galur memiliki tingkat produktivitas yang melebihi *benchmarking* untuk padi rawa yang telah ditetapkan secara nasional, berkisar antara 3,0-7,2 ton/ ha (GKP), yaitu mencapai 7,4 ton/ha (GKP). Namun demikian galur-galur terpilih masih perlu diuji secara multilokasi di beberapa macam lahan rawa. Analisis uji stabilitas produktivitas dari galur-galur harapan tersebut telah dilakukan, di antaranya menggunakan metode analisis AMMI. Diperoleh hasil bahwa terdapat 4 galur (galur nomor 1, 4, 6 dan 11) teridentifikasi sebagai galur yang bersifat *broad stability*. Lima galur (galur nomor 5, 12, 13, 14 dan 15) memiliki potensial hasil optimum untuk lahan rawa pasang surut (Kalsel dan Riau), sedangkan 2 galur (galur nomor 3 and 7) menunjukkan potensi hasil optimum di lahan rawa lebak (Taman Bogo, Lampung) (Gambar 3.6) (Utami et al. Submitted 2018).

Tabel 3.3. Galur harapan terseleksi menggunakan marka molekuler multi-parents sebagai tetuanya (Utami *et al.* 2018 (Submitted))

Galur/varietas	Tetua Persilangan
B1-17a	Kao Daok Mali-105-9/B13143-8-MR-3-KA-14//Inpara 5
B2-38	Setail/Inpara 2//Code
B3-1	B11844-MR-29-7-1/Inpara 3//Cisantana
B4-4	B11844-MR-29-7-1/Inpara 5//Code
B5-14	IR42/Ciherang
B6-4	Banyuasin/Ketan kutuk
B7-4-b	Siak raya/B13132-7-MR-1-KA-6
B8-1-a	Swarna Sub-1/Mekongga
B9-29-a	Swarna Sub-1/Ciherang
B10-50	Batanghari/Conde
B11-44	Inpari 9/Swarna Sub-1
B12-40	Cimelati/Inpara 3//Inpari 9/FR13A
I13-3	Mekongga/Inpara 3//Mekongga/Inpara 3
B14-5-B	Kebo/BR11 Sub-1
B-15-1-B	Ciherang/Swarna Sub-1//Ciherang//Inpara 3



Gambar 3.6. Keragaan galur harapan terpilih di 3 ekoregion lahan rawa yang berbeda

PENUTUP

Teknologi pemuliaan molekuler adalah salah satu metoda alternatif dalam perakitan galur/varietas unggul padi. Teknologi ini dimungkinkan untuk meningkatkan tingkat presisi seleksi karena berbasis dengan gen/alel/QTL dari suatu karakter ter-

tentu, namun demikian teknologi ini tetap memerlukan dukungan seleksi berdasarkan fenotipe dasar dari pemuliaan konvensional.

Sebagai bagian dari paket teknologi untuk lahan rawa maka varietas padi hasil pemuliaan molekuler siap mendukung program optimalisasi pemanfaatan lahan rawa untuk peningkatan produktivitas padi nasional, dengan dikomplementasikan dengan berbagai teknologi rawa yang lain, seperti:

- Sistem surjan, yaitu salah satu bentuk system pengelolaan air dengan melakukan modifikasi bentuk lahan agar tingkat kelembabannya lebih sesuai untuk tanaman padi.
- Sistem pengelolaan hara, yang meliputi : teknologi ameliorasi berupa pemberian kapur, pupuk dan bahan organik
- Pengaturan sistem tanam: perluasan indeks tanam; jarak legowo di lahan rawa dan pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT).

DAFTAR PUSTAKA

- Abu MB, Tucker ES, Harding SS, Sesay JS. 1989. Cultural practices to reduce iron toxicity in rice. *Int Rice Res Newsl.* 14:19.
- Asch F, Becker M, Kpongong DS. 2005. A quick and efficient screen for resistance to iron toxicity in lowland rice. *J Plant Nutr Soil Sci.* 168:764-773.
- Balitbangtan. 2014. Inovasi Pertanian untuk peningkatan daya saing bangsa. *Kinerja Balitbangtan 2010-2014.* Jakarta (Indonesia): Badan Litbang Pertanian. 222 hlm.
- Becker M, Asch F. 2005. Iron toxicity in rice-conditions and management concepts. *J. Plant Nutr Soil Sci.* 168:558-573.

- Bennett SA, Hansman RL, Sessions AL, Nakamura K, Edwards KJ. 2011. Tracing iron-fueled microbial carbon production within the hydrothermal plume at the Loihi Seamount. *Geochim Cosmochim Acta*. 75:5526-5539.
- Colmer TD. 2002. Aerenchyma and an inducible barrier to radial oxygen loss facilitate root aeration in upland, paddy and deep-water rice (*Oryza sativa* L.). *Ann Bot*. 91:301-309.
- Dent D. 1986. Acid sulphate soils : A baseline for research and development. 39, Wageningen (Netherlands): International Land Reclamation Institute Pbl.
- Dufey I, Hiel MP, Hakizimana P, Draye X, Lutts S, Koné B, Dramé KN, Konaté KA, Sie M, Bertin P. 2012. Multi-environment quantitative trait loci mapping and consistency across environments of resistance mechanisms to ferrous iron toxicity in rice. *Crop Sci*. 52:539-550.
- Eide D, Broderius M, Fett J, Guerinot ML. 1996. A novel iron-regulated metal transporter from plants identified by functional expression in yeast. *Proc Natl Acad Sci*. 93:5624-5628.
- Gross J, Stein RJ, Fett-Neto AG, Fett JP. 2003. Iron homeostasis related genes in rice. *Genet Mol Biol*. 26:477-497.
- Hardjowigeno, Sarwono H. 2002. Ilmu tanah. Jakarta (Indonesia): Akademika Pressindo.
- Inoue H, Higuchi K, Takahashi H, Mori S, Nishiawa NK. 2003. Three rice nicotianamine synthase genes, OsNAS1, OsNAS2, and OsNAS3 are expressed in cells involved in long-distance transport of iron and differentially regulated by iron. *Plant J*. 36:366-381.

- Ishimaru K. 2003. Identification of a locus increasing rice yield and physiological analysis of its function. *Plant physiology*. 133:1083-1090.
- Jamil A, Abdulrachman S, Zaeni Z, Baliadi Y. 2015. Pembangunan pertanian berbasis persawahan dalam perspektif ekoregion. Dalam: Pasandarana E, Nursyamsi D, Suradisastra K, Mardianto S, Haryono, penyunting. *Pembangunan Pertanian Berbasis Ekoregion*. Jakarta (Indonesia): IAARD Press.
- Kobayashi T, Nishizawa NK. 2012. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. *Annu Rev Plant Biol*. 63:131-152.
- Koesrini El William, I. Khairullah. 2014. Varietas padi adaptif lahan pasang surut, In: Nursyamsi *et al.*, editors. *Teknologi inovasi lahan rawa pasang surut mendukung kedaulatan pangan nasional*. Jakarta (Indonesia): Badan Litbang Pertanian.
- Las I. 2009. Revolusi Hijau Lestari untuk Ketahanan Pangan ke Depan Badan Litbang Pertanian. Dimuat dalam *Tabloid Sinar Tani*, 14 Januari 2009.
- Pasandaran E. 2015. Politik pembangunan pertanian inovatif berwawasan ekoregion. Dalam: Pasandarana E, Nursyamsi D, Suradisastra K, Mardianto S, Haryono. *Pembangunan pertanian berbasis ekoregion*. Jakarta (Indonesia): IAARD Press.
- Rachim A. 1995. Penggunaan kation-kation polivalen dalam kaitannya dengan ketersediaan fosfat untuk meningkatkan produksi jagung pada tanah gambut. [Disertasi]. Bogor (Indonesia): Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.

- Robinson NJ, Procter CM, Connolly EL, Guerinot ML. 1999. A ferric-chelate reductase for iron uptake from soil. *Nature*. 397:694-697.
- Rout GR, Sahoo S. 2015. Role of iron in plant growth and metabolism. *Rev Agric Sci*. 3:1-24.
- Saikia T, Baruah KK. 2012. Iron toxicity tolerance in Rice (*Oryza sativa* L.) and its anti-oxidative enzyme activity. *Crop Sci*. 3:90-94.
- Shimizu A. 2009. QTL analysis of genetic tolerance to iron toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by quantification of bronzing score. *J New Seeds*. 10:171-179.
- Subiksa IGM. 2015. Evaluasi kinerja pembangunan pertanian dalam perspektif ekoregion rawa pasang surut. Dalam: Pasandarana E, Nursyamsi D, Suradisastra K, Mardianto S, Haryono, penyunting. *Pembangunan Pertanian Berbasis Ekoregion*. Jakarta (Indonesia): IAARD Press.
- Suwarno. 2014. Sumber daya genetik padi: Peluang dan pemanfaatan. Dalam: Sumarno, Hasnam, Mustika I, Bahagiawati. *Sumber daya genetik pertanian Indonesia. Tanaman Pangan-Perkebunan-Hortikultura*. Jakarta (Indonesia): Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Utami DW, Septiningsih EM, Kadir TS, Fatimah, Yuriyah S. 2010. Pencarian alel untuk identifikasi gen ketahanan penyakit hawar daun bakteri, Xa7 pada plasma nutfah padi lokal Indonesia. *J AgroBiogen*. Vol 6, No 1.
- Utami DW, Hanarida I. 2014. Evaluasi lapang dan identifikasi molekuler plasma nutfah padi sifat toleransi keracunan Fe. *J AgroBiogen*. 10:9-17.
- Utami DW, I Rosdianti, L Chrisnawati, Subardi, S. Nurani, Suwarno. 2017. Genetic model estimation of Fe tolerance

- mechanism in Rice (*Oryza sativa*) determined through genome wide association study (GWAS). Agrivita Submitted.
- Utami DW, Rosdianti I, Khairullah I, Sinaga P, Subardi, Muarepey A. 2018. Yield stability and agronomical performance of inland swampy selected rice lines developed based on molecular breeding. Proceeding ICGRB submitted.
- Vert G, Briat JF, C Curie. 2001. Arabidopsis IRT2 gene encodes a root periphery iron transporter. *Plant J.* 26:181-189.
- Wan JL, Zhai HQ, Wan JM, Ikehashi H. 2003. Detection and analysis of QTLs for ferrous iron toxicity tolerance in rice, *Oryza sativa* L. *Euphytica.* 131:201-206.
- Widjaya A, Suriadikarta DA, Sutriadi MT, Subiksa IGM, Suastika IW. 2000. Pengelolaan, pemanfaatan dan pengembangan lahan rawa. Dalam: Adimihardjo A *et al.* penyunting. Sumber daya lahan Indonesia dan pengelolaannya. Bogor (Indonesia): Puslittanak. hlm. 127-164.
- Wu P, Luo A, Zhu J, Yang J, Huang N, Senadhira D. 1997. Molecular markers linked to genes underlying seedling tolerance for ferrous iron toxicity. *Plant Soil.* 196:317-320.
- Wu P, Hu B, Liao CY, Zhu JM, Wu YR, Senadhira D, Paterson AH. 1998. Characterization of tissue tolerance to iron by molecular markers in different lines of rice. *Plant Soil.* 203:217-226.
- Wu LB, Shhadi MY, Gregorio G, Matthus E, Becker M, Frei M. 2014. Genetic and physiological analysis of tolerance to acute iron toxicity in rice. *Rice.* 7(1):8.
- Zhao H, Eide D. 1996. The ZRT2 gene encode the low affinity zinc transporter in *Saccharomyces cerevisiae*.