

PEMANFAATAN TEKNIK NUKLIR PADA TANAMAN PADI

Mugiono, Ita Dwimahyani, dan Haryanto

Pusat Aplikasi Teknologi Isotop dan Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional

1. PENDAHULUAN

Berbagai kelompok masyarakat beranggapan bahwa nuklir adalah teknologi yang berbahaya sehingga penggunaannya ditentang. Kebakaran reaktor nuklir Chernobyl di Uni Soviet pada tahun 1986 yang menimbulkan banyak korban jiwa, kerugian materi, dan pencemaran lingkungan oleh radiasi nuklir menambah jumlah kelompok masyarakat yang menentang penggunaan teknologi nuklir. Meskipun berbahaya bagi manusia, sifat-sifat hakiki tenaga nuklir sebenarnya dapat dimanfaatkan untuk maksud-maksud damai, seperti untuk meningkatkan mutu kehidupan dan kesejahteraan masyarakat. Melalui pemanfaatan sifat-sifat inti atom yang tidak stabil, teknologi nuklir dapat digunakan dalam bidang pertanian, peternakan, pengawetan makanan, hidrologi, industri, kedokteran, dan lain-lain.

Teknologi nuklir merupakan salah satu teknologi yang dapat dimanfaatkan dalam bidang pertanian. Comar pada tahun 1955 menerbitkan buku tentang dasar-dasar dan manfaat radioisotop dalam bidang biologi dan pertanian. Teknik nuklir memanfaatkan radioisotop dan radiasi yang berorientasi pada pendayagunaan dan pemanfaatan sifat-sifat inti atom, yaitu suatu unsur yang tidak stabil. Pemanfaatan teknik nuklir pada tanaman padi, antara lain untuk perbaikan sifat genetik varietas melalui mutasi dengan radiasi, perbaikan kesuburan tanah, dan nutrisi tanaman.

Mutasi adalah suatu proses berubahnya struktur atau segala macam tipe perubahan dari bahan keturunan yang mengakibatkan perubahan fenotipe yang diwariskan dari satu generasi ke generasi berikutnya. Gen atau faktor keturunan yang berubah karena mutasi disebut mutan. Ada dua macam mutasi, yaitu mutasi alam atau spontan dan mutasi buatan. Radiasi alam yang berasal dari radioaktif dan sinar kosmik serta pengaruh temperatur dan kimiawi adalah penyebab terjadinya mutasi spontan. Mutasi buatan adalah mutasi yang terjadi karena penggunaan mutagen. Dengan menggunakan mutagen, pemuliaan tanaman dapat memperbesar atau membuat keragaman baru dalam mendapatkan varietas unggul yang sesuai dengan tujuan pemuliaan.

2. MUTAGEN

Mutagen memunculkan sifat-sifat atau bentuk-bentuk baru yang diketahui setelah Muller memperlihatkan hasil mutasi buatan dengan sinar X pada tahun 1927. Perlakuan radiasi sinar X pada lalat *Drosophila* jantan dapat memperbesar laju mutasi sampai lebih dari 100 kali dibandingkan dengan yang tidak diradiasi. Muller kemudian mendapat hadiah Nobel pada tahun 1946 karena penemuannya ini.

Mutagen dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu mutagen fisis dan kimia. Berikut ini penjelasan mengenai mutagen fisis dan kimia.

2.1 Mutagen Fisis

Mutagen fisis menimbulkan mutasi secara fisika, yaitu gelombang elektro magnetik atau partikel radioaktif menabrak gen dalam kromosom dan biasanya disebut radiasi. Macam dan tipe mutagen fisis yang sering digunakan dalam pemuliaan mutasi adalah sebagai berikut.

- **Sinar X.** Dihasilkan dari tabung X, tegangannya relatif rendah dengan panjang gelombang $150-0,15 \text{ \AA}$, disebut juga sinar lemah.
- **Sinar gamma (γ).** Dipancarkan dari isotop radioaktif, panjang gelombang lebih pendek daripada sinar X, dan daya tembusnya lebih kuat daripada sinar X. Dikenal sebagai sinar kuat.
- **Sinar ultraviolet (UV).** Panjang gelombangnya ($3800-150 \text{ \AA}$) terletak antara sinar X ($150-0,15 \text{ \AA}$) dan cahaya yang terlihat ($7.800-3.800 \text{ \AA}$). Panjang gelombang yang paling efektif untuk membuat mutasi adalah $2.000 \text{ \AA}$.
- **Sinar alfa (α).** Partikel yang berasal dari inti beberapa isotop yang tidak stabil bermuatan positif dengan daya tembus rendah.
- **Sinar beta (β).** Partikel yang berasal dari isotop yang tidak stabil, bermuatan negatif, dengan daya tembus lebih besar daripada partikel alfa.
- **Neutron.** Dipancarkan dari inti isotop radioaktif tertentu dengan daya tembus kuat dan mempunyai arti penting dalam pemuliaan mutasi sebagai mutagen.

2.2 Mutagen Kimia

Mutagen kimia adalah senyawa kimia yang mudah terurai dan membentuk radikal aktif yang dapat bereaksi dengan asam amino dalam DNA sehingga dapat menyebabkan perubahan sifat. Zat-zat kimia penyebab mutasi ditemukan pada tahun 1941. Penelitian dengan menggunakan gas mustarat (asam nitrit) menunjukkan laju mutasi pada lalat buah meningkat dari 0,2% menjadi 24%. Sejak itu, penggunaan bahan-bahan mutagen kimia berkembang dengan pesat.

Senyawa kimia yang dapat dipakai sebagai mutagen dan bermanfaat dalam pemuliaan mutasi hanya beberapa, antara lain : etil metha sulfonat (EMS), dietil sulfat (DES), etil nitroso uretan (ENU), etilen amin (EA), etil nitroso urea (ENH), metil nitroso urea (MNH), dan Group Azida. Senyawa-senyawa tersebut sangat reaktif dan mudah terhidrolisis oleh air. Setelah terhidrolisis oleh air, senyawa tersebut tidak mutagenik lagi dan bersifat racun atau toksis. Kecepatan terhidrolisis ini dipakai untuk menentukan nilai paruhnya, yaitu waktu yang diperlukan untuk menurunkan jumlah pengakil aktif.

Mutagen kimia jarang digunakan dalam pemuliaan dengan teknik mutasi sebab harganya sangat mahal, berbahaya bagi manusia karena bersifat karsinogen, dan membutuhkan peralatan khusus, seperti kamar asam, masker gas, sarung tangan, dan sebagainya.

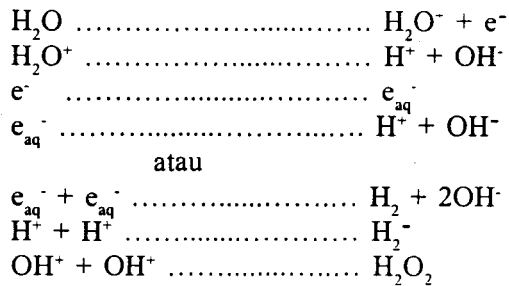
Zat-zat mutagenik lain, seperti giberelin, auksin atau garam mineral sering digunakan dalam pembuatan medium pada kultur jaringan. Zat-zat mutagenik tersebut ternyata dapat menyebabkan perubahan pada nukleotida.

3. PENYERAPAN SINAR PENGION DALAM MATERI TANAMAN

Sinar gamma dan sinar X adalah gelombang elektromagnetik yang protonnya meresap ke dalam materi dan sebagian atau seluruh energi proton ditransformasi ke energi kinetik atau elektron. Elektron ini kemudian kehilangan energinya karena berinteraksi dengan atom molekul materi kemudian melepaskan elektron lain. Beberapa elektron tersebut dapat menghasilkan energi untuk mengionisasi partikel sendiri. Proses ionisasi ini menghasilkan radikal ion positif dan elektron bebas.

Dalam sistem biologi, elektron tersebut akan terjebak di dalam lingkungan polar sehingga cukup waktu bagi ion radikal yang labil dan aktif untuk bereaksi dengan molekul lain atau masuk ke dalam susunan jaringan yang lebih dalam. Dalam air, elektron bebas dapat dipolarisasi oleh sejumlah molekul air menjadi elektron berair (e_{aq}^-). Radikal-radikal bebas yang terbentuk dalam larutan akhirnya saling bergabung membentuk senyawa yang mantap.

Materi biologi pada umumnya mengandung air. Oleh karena itu, penyerapan sinar pengion dalam materi biologi perlu mempertimbangkan peran proses fisika dan kimia sebagai penyebab kerusakan gen. Proses sinar pengion menimbulkan ionisasi air karena adanya oksigen pada waktu perlakuan radiasi yang akan menambah jumlah H_2O_2 , saat terkena radiasi H^+ akan ditemplei oleh O sehingga menjadi OH^+ , seperti dapat dilihat pada reaksi kimia berikut ini.



Terbentuknya peroksida dari radikal $\text{OH}^\cdot$ akan menambah kerusakan faktor genetik dan fisiologis dari materi biologi yang diperlakukan dengan radiasi. Keberadaan oksigen pada waktu perlakuan radiasi akan menambah jumlah peroksida H_2O_2 yang terbentuk karena radikal $\text{H}^\cdot$ dan oksigen akan membentuk radikal $\text{OH}^\cdot$ yang kemudian bergabung dengan dengan radikal $\text{OH}^\cdot$, sementara yang lain menjadi H_2O_2 .

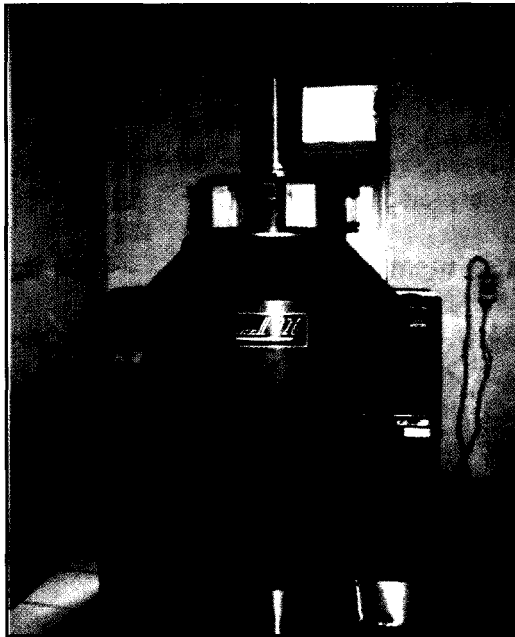
4. SATUAN BESARAN RADIASI DAN DOSIMETRI

Dalam proses radiasi, hanya energi radiasi yang benar-benar terserap dalam sistem biologis yang akan menimbulkan efek, sedangkan radiasi yang hanya sekedar melewati tidak akan menimbulkan efek. Besarnya radiasi yang ditujukan pada sistem biologis disebut dosis paparan atau kuantitas radiasi (*exposure dose*). Bagian dosis paparan yang benar-benar terserap oleh sistem biologis disebut dosis serap atau kuantitas tenaga radiasi terabsorpsi (*absorbed dose*). Dosis paparan bergantung pada sifat-sifat radiasi dan jarak antara sumber iradiasi dengan letak sasaran. Dosis serap tidak bergantung pada dosis paparan, tetapi pada sifat fisik sasaran tersebut. Satuan dosis radiasi adalah sebagai berikut.

- **Rad (radiation absorption dose)** adalah satuan dosis tenaga radiasi yang terabsorpsi. $1 \text{ Rad} = 100 \text{ erg/g} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 10^{-2} \text{ Gy}$. $1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$.
- **R (Rontgen)** adalah besarnya sinar X atau sinar gamma yang diperlukan untuk menghasilkan sejumlah pasangan ion-ion yang membawa muatan 1 ses (satuan elektrostatis) dari udara $0,001293 \text{ g}$. $1 \text{ Rontgen} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.
- **REM (Rontgen equivalent for man)** adalah dosis radiasi yang dapat menghasilkan efek biologis yang sama dengan efek biologis yang dihasilkan oleh dosis serap sinar X.
- **RBE (relative biological effectiveness)** adalah rasio terbalik terhadap banyaknya radiasi yang diserap yang diperlukan untuk menghasilkan suatu efek dibandingkan dengan radiasi standar untuk menghasilkan efek serupa.

4.1 Dosis Radiasi dan Bagian Tanaman Padi yang Dapat Diradiasi

Mutagen fisis yang sering digunakan sebagai sumber radiasi adalah sinar gamma karena mempunyai daya tembus atau daya penetrasi yang kuat. Sinar gamma adalah gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh isotop radioaktif ^{60}Co dari suatu sumber radiasi yang disebut irradiator (Gambar 1).



Gambar 1. Irradiator ^{60}Co sebagai sumber radiasi sinar gamma

Pada pemuliaan padi dengan teknik mutasi, bagian tanaman yang sering digunakan sebagai bahan untuk iradiasi adalah biji. Berdasarkan hasil penelitian, dosis optimal bagi radiasi biji padi Japonika adalah 0,20–0,30 kGy dan 0,25–0,35 kGy bagi padi Indika. Kepekaan terhadap radiasi pada setiap varietas padi dan bagian tanaman yang diradiasi tidak sama. Waktu yang dibutuhkan untuk meradiasi bergantung pada laju dosis sumber radiasi. Untuk mengukur laju dosis radiasi digunakan dosimeter Fricke (Fricke dan Hart, 1966).

Kemampuan dosimeter Fricke hanya terbatas pada dosis 40–400 Gy, sehingga dosis di bawah 40 Gy dan di atas 400 Gy diukur berdasarkan laju dosisnya. Dasar kerja dosimeter Fricke adalah di dalam dosimeter terdapat ion ferro yang apabila kena radiasi akan berubah menjadi ferri. Besarnya dosis radiasi diukur berdasarkan konsentrasi ferri dalam larutan.

Di samping biji, bagian tanaman padi yang dapat diradiasi adalah tepung sari atau pollen. Amano (1986) melakukan pemuliaan mutasi dengan cara meradiasi malai 1–2 jam sebelum penyerbukan menggunakan sinar UV, sinar

X, atau sinar gamma. Pollen yang telah diradiasi kemudian diserbukkan pada bunga betina yang digunakan sebagai bahan untuk persilangan pada pukul 10–12 siang hari. Untuk menghindari malai layu, sebaiknya setelah diradiasi malai dibungkus dengan kain basah. Pollen juga dapat ditempatkan dalam tabung gelas kecil kemudian diradiasi dengan sinar gamma. Dosis untuk meradiasi pollen tanaman padi yang paling tepat belum banyak dilaporkan. Dosis radiasi untuk pollen tanaman cabai adalah 5–15 Gy, untuk pollen jagung 10–20 Gy, dan untuk pollen tanaman kacang *Pisum sativum* 7,5 Gy (Harten, 1998).

4.2 Faktor yang Memengaruhi Hasil Radiasi Biji Padi

Faktor yang berpengaruh pada hasil radiasi sinar pengion pada biji padi adalah lingkungan dan biologis.

4.2.1 Faktor Lingkungan

Oksigen. Adanya oksigen pada saat radiasi akan memperbanyak timbulnya peroksida sehingga dapat menambah kerusakan fisiologis dan genetis. Untuk menghindari pengaruh oksigen disarankan agar kegiatan meradiasi dalam kondisi bebas oksigen, yaitu dalam suasana nitrogen.

Kadar air. Air mudah terionisasi oleh sinar pengion dan akan membentuk radikal bebas yang selanjutnya membentuk peroksida. Pada radiasi dengan sinar gamma, pengaruh kadar air dan oksigen sangat besar. Kadar air biji yang baik untuk radiasi sinar gamma adalah 12%–14%.

Penyimpanan biji setelah radiasi. Pengaruh penyimpanan setelah radiasi bergantung pada kadar air biji dan kesediaan oksigen saat radiasi. Pada biji yang terlalu kering, reaksi oksigen dan pembentukan radikal bebas akan berlangsung terus setelah perlakuan radiasi dan akan membentuk peroksida yang merusak. Oleh karena itu, untuk menghindari kerusakan, biji disimpan pada suhu rendah (0°C).

4.2.2 Faktor Biologis

Volume inti dan volume kromosom pada saat interfase. Volume inti dan volume kromosom pada saat interfase, merupakan faktor biologis yang penting dan erat kaitannya dengan kepekaan suatu varietas padi terhadap radiasi. Makin besar volume inti atau volume kromosom pada saat interfase, makin peka terhadap radiasi.

Genetis. Kepekaan suatu varietas atau suatu spesies terhadap radiasi telah banyak diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kepekaan varietas atau spesies berbeda-beda.

4.3 Teknik Pemuliaan Mutasi dengan Radiasi pada Tanaman Padi

Pada pemuliaan tanaman padi dengan teknik mutasi, pemilihan varietas yang akan digunakan sebagai tanaman induk adalah faktor yang sangat penting karena berkaitan dengan tujuan yang akan dicapai. Untuk mendapatkan mutan yang dapat segera dilepas sebagai varietas unggul disarankan menggunakan varietas unggul yang sudah ada, tetapi tetap mempunyai kelemahan satu atau dua sifat yang mungkin dapat diperbaiki dengan mutasi. Benih yang akan digunakan sebagai varietas induk harus murni atau mempunyai variabilitas genetik nol.

Setelah diradiasi, benih ditanam sebagai tanaman M₁. Jumlah benih yang akan diradiasi harus cukup banyak. International Atomic Energy Agency (1977) dalam buku *Manual on Mutation Breeding* menyebutkan suatu teori tentang hubungan antara jumlah sel yang diradiasi dengan kemungkinan timbulnya mutasi yang terjadi, dinyatakan dengan rumus:

$$N = \frac{\text{Log } (1 - P_1)}{\text{Log } (1 - m)}$$

Keterangan:

N = jumlah sel yang harus diperlakukan dengan radiasi

P₁ = peluang terjadinya mutasi

m = frekuensi mutasi

Berdasarkan rumus tersebut, dibuat daftar besar progeni sel yang diperlukan untuk mendapatkan frekuensi mutasi (Tabel 1).

Menurut Osone (1963), dalam embrio padi terdapat 5–6 progeni sel. Jika frekuensi mutasi yang terjadi diharapkan 1×10^{-3} dengan peluang 90%, jumlah progeni sel yang harus diradiasi adalah 2.326 sel. Karena dalam radiasi dosis yang digunakan menyebabkan kematian 50%, jumlah sel yang diradiasi harus 2×2.326 atau sekitar 5.000 sel. Jika dalam setiap embrio terdapat lima progeni sel, jumlah benih atau biji yang diradiasi adalah 5.000:5 atau 1.000 butir. Dari 1.000 biji yang ditanam, 50% akan mati karena pengaruh radiasi sehingga jumlah tanaman yang dapat dipanen hanya 500 tanaman

Selanjutnya, jumlah tanaman M₂ yang dibutuhkan bergantung pada perbandingan pemencarannya atau *segregation ratio* (a) dan kemungkinan munculnya mutan homosigot (p₂). Pada umumnya, biji mengandung lebih dari satu progeni sel, maka perbandingan pemencarannya untuk 1, 2, 3, 4, dan seterusnya adalah 1/4, 1/8, 1/12, 1/16, 1/20, dan seterusnya. Jumlah famili tanaman M₂ dapat dihitung berdasarkan rumus berikut:

Tabel 1. Jumlah progeni sel untuk menghitung frekuensi mutasi dan kemungkinan mutasi yang terjadi

Frekuensi mutasi (u)	Jumlah progeni sel (n)		Kemungkinan mutasi yang terjadi
	P ₁ = 0,90	P ₁ = 0,99	
1 x 10 ⁻²	233	465	Perubahan kromosom dan sifat kuantitatif
1 x 10 ⁻³	2.326	4.652	Beberapa gen resesif
1 x 10 ⁻⁴	23.260	46.520	Satu gen resesif
1 x 10 ⁻⁵	232.600	465.200	Satu gen dominant

Tabel 2. Jumlah tanaman M₂ untuk beberapa Nilai a dan p₂

Perbandingan pemencaran (a)	Jumlah tanaman setiap famili M ₂ untuk nilai	
	P ₂ = 0,90	P ₂ = 99
¼	8,00	16,00
1/8	17,20	34,50
1/12	26,30	52,60
1/16	35,70	71,40
1/20	45,50	91,00

$$M_2 = \frac{\log (1-p_2)}{\log (1-a)}$$

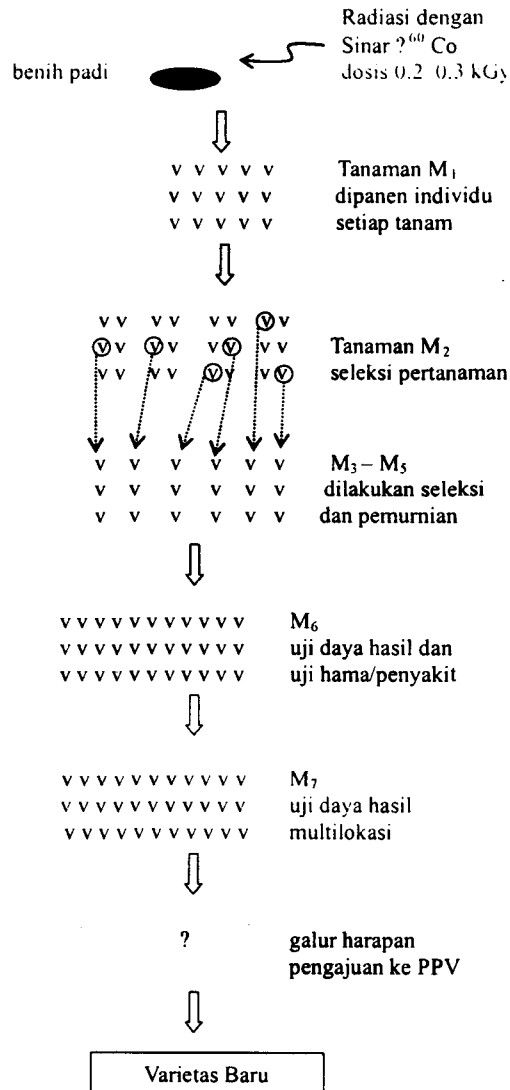
Besar nilai a dan p₂ dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari contoh perhitungan tersebut, jumlah tanaman M₁ yang dipanen adalah 500 tanaman. Ini juga merupakan jumlah famili M₂. Dalam embrio padi diduga terdapat lima progeni sel, perbandingan pemencarannya adalah 1/20. Dengan harapan munculnya mutan homosigot 90% dan setiap famili tanaman M₂ berjumlah 45,50 tanaman. Dengan demikian, jumlah tanaman M₂ yang harus ditanam adalah 500 x 45,50 tanaman atau sekitar 25.000 tanaman.

Pada populasi M₂, ini mulai diseleksi sesuai dengan tujuan program pemuliaan, kemudian dilanjutkan dengan seleksi dan pemurnian pada generasi M₃ dan seterusnya, sampai diperoleh galur tanaman yang homogen. Jika telah diperoleh galur yang homogen, kegiatan dilanjutkan dengan observasi daya hasil, uji daya hasil, uji ketahanan terhadap hama dan penyakit, uji rasa nasi, analisis kualitas dan mutu beras. Galur yang homogen dapat diperoleh pada generasi M₅. Skema dan prosedur pemuliaan dengan teknik mutasi dapat dilihat pada Gambar 2.

4.4 Hasil Pemuliaan Padi dengan Teknik Mutasi

Penggunaan teknik nuklir pada pemuliaan tanaman dimulai sejak 1940, yaitu sejak Freisleben dan Lein dari Jerman menemukan mutan barley yang tahan terhadap penyakit embun tepung (*mildew*). Dalam kurun waktu yang bersamaan,



Gambar 2. Skema prosedur pemuliaan mutasi dengan radiasi pada padi

Tolenaar juga berhasil memperoleh mutan klorina pada tembakau di Deli, Medan. Mutan tersebut merupakan hasil mutasi buatan yang pertama kali dibudidayakan.

Kegiatan pemuliaan tanaman dengan teknik mutasi terhenti karena meletusnya Perang Dunia II pada tahun 1942. Setelah perang berakhir, penggunaan sinar dan neutron dalam pemuliaan tanaman mulai berkembang. Setelah tahun 1950, berbagai pemuliaan tanaman dengan teknik mutasi mulai digiatkan di berbagai negara seperti Amerika, Swedia, Uni Soviet, Belanda, dan Jepang.

Teknik mutasi pada pemuliaan tanaman di Indonesia yang digunakan secara intensif sejak 1972, yaitu setelah BATAN memperoleh proyek penelitian mutasi dari IAEA. Proyek tersebut dilaksanakan selama 5 tahun dengan bantuan peralatan laboratorium dari UNDPO/IAEA (Ismachin dan Hendratno, 1972). Tujuan penelitian dari proyek tersebut adalah meningkatkan kadar protein dari biji padi. Varietas Pelita I/1 dan PB5 digunakan sebagai bahan penelitian, benih kedua radiasi tersebut diiradiasi dengan sinar gamma ^{60}Co dengan dosis 0,15–0,40 kGy. Kadar protein biji padi diseleksi dengan menggunakan metode analisis *Dye Binding Capacity*. Umur, tinggi tanaman, dan produktivitas juga diseleksi pada generasi M2. Dari penelitian tersebut diperoleh galur mutan A-13/PsJ, A-23/PsJ, dan A-33/PsJ yang berumur genjah (115 hari), serta beberapa galur mutan berkadar protein tinggi (10%–12%). Ketiga galur mutan genjah tersebut tidak dapat dilepas sebagai varietas baru karena tidak tahan hama wereng cokelat. Beberapa galur mutan berprotein tinggi juga tidak dapat dilepas karena kadar proteinnya tidak stabil dan banyak dipengaruhi oleh pemupukan nitrogen.

Setelah tahun 1975, pemuliaan dengan teknik mutasi pada tanaman padi diarahkan untuk perbaikan ketahanan terhadap hama wereng cokelat dan penyakit hawar daun, produksi tinggi, dan umur genjah. Dengan menggunakan varietas Pelita I/1 dan Cisadane sebagai bahan penelitian, benih padi diiradiasi dengan sinar gamma ^{60}Co dengan dosis 0,10–0,50 kGy. Radiasi varietas Pelita I/1 menghasilkan tiga galur mutan yang berdaya hasil tinggi, umur genjah, dan tahan terhadap hama wereng cokelat biotipe 1. Ketiga galur mutan tersebut kemudian dilepas oleh Menteri Pertanian dengan nama Atomita-1, Atomita-2, dan Atomita-3 masing-masing pada tahun 1982, 1983, dan 1990. Varietas Atomita-2, di samping mempunyai sifat produksi tinggi dan umur genjah, juga toleran salinitas (lahan asin). Maluszynski *et al.* (1994) melaporkan bahwa varietas Atomita-2 yang toleran salinitas telah digunakan sebagai tetua untuk persilangan IR42/Atomita-2 di Vietnam, dan dari persilangan tersebut dihasilkan varietas “6B” yang telah dilepas sebagai varietas unggul pada tahun 1986. Dari radiasi varietas Cisadane diperoleh satu galur mutan genjah Obs-108/PsJ yang kemudian dilepas sebagai varietas unggul dengan nama Atomita-4.

Menggunakan varietas Seratus Malam yang diradiasi sinar gamma ^{60}Co dengan dosis 0,20 kGy diperoleh galur mutan padi gogo MG-4/PsJ yang kemudian dilepas dengan nama varietas Situgintung pada tahun 1992. Dalam rangka penelitian pemanfaatan galur mutan sebagai bahan persilangan pada 1985, galur mutan pendek hasil radiasi varietas Seratus Malam, yaitu SM-268/PsJ disilangkan dengan varietas IR36. Dari persilangan ini diperoleh galur mutan Obs-1647/PsJ yang kemudian dilepas sebagai varietas Cilosari pada tahun 1996.

Pada tahun 1994 telah dilakukan radiasi dengan sinar gamma ^{60}Co dengan dosis 0,20 kGy. Radiasi benih F1 (Atomita-2/IR64) menghasilkan galur Obs-1650/PsJ yang kemudian dilepas sebagai varietas unggul baru dengan nama Woyla. Radiasi benih F1 (Atomita-4/IR64) menghasilkan galur Obs-1653/PsJ dan Obs-1656/PsJ yang kemudian dilepas sebagai varietas baru dengan nama Meraoke dan Kahayan, masing-masing pada tahun 2001 dan 2003. Radiasi benih F1 (Atomita-3/IR64) menghasilkan galur Obs-1658/PsJ yang kemudian dilepas sebagai varietas Winongo pada tahun 2003, sedangkan dari radiasi benih F1 (Obs-1647 PsJ/IR74) diperoleh galur Obs-1659/PsJ yang kemudian dilepas dengan nama Diah Suci pada tahun 2004. Pada tahun 1995 telah diradiasi benih varietas IR64 dengan sinar gamma ^{60}Co dengan dosis 0,10 kGy dan benih F1 dari persilangan Cilosari/IR64 dengan dosis 0,20 kGy. Dari radiasi benih IR64 dan iradiasi benih F1 (Cilosari/IR64) diperoleh galur mutan Obs-1678/PsJ dan galur Obs-1677/PsJ yang kemudian dilepas sebagai varietas baru masing-masing dengan nama Mayang dan Yuwono pada tahun 2004. Pada tahun 2000 benih varietas Cisantana diradiasi dengan sinar gamma ^{60}Co dengan dosis 0,20 kGy dan diperoleh galur mutan Obs-1688/PsJ, Obs-1692/PsJ, dan Obs-1695/PsJ. Galur Obs-1688/PsJ dilepas sebagai varietas unggul dengan nama Mira-1. Deskripsi dan sifat agronomi varietas tersebut dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4 (Mugiono, 2001; 2006).

5. TEKNIK NUKLIR UNTUK MEMPELAJARI KESUBURAN TANAH DAN NUTRISI TANAMAN PADI

Teknik nuklir dapat dimanfaatkan untuk mempelajari efisiensi pemupukan pada tanaman padi. Selain itu, jumlah pupuk yang diberikan juga dapat diurut efektivitas dan efisiensinya. Teknik nuklir yang dapat mengetahui unsur hara yang berasal dari pupuk dan tanah. Unsur hara berasal dari pupuk anorganik (urea, SP36, KCl), pupuk organik (pupuk kandang, pupuk hijau), dan pupuk hayati (mikoriza) yang diserap tanaman atau yang masih tersisa di dalam tanah dapat dilacak secara kualitatif maupun kuantitatif.

Penggunaan teknik nuklir untuk mempelajari kesuburan tanah dan nutrisi tanaman padi mempunyai kelebihan dan kekurangan. Kelebihan teknologi nuklir,

Tabel 3. Deskripsi varietas padi hasil litbang iptek nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional

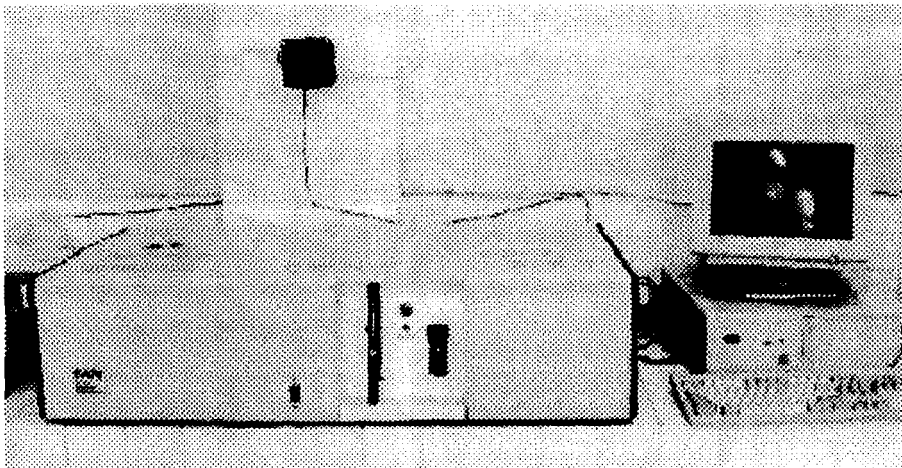
[illegible]

Tabel 4. Deskripsi varietas padi hasil litbang iptek nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional (lanjutan)

Asal dan Sifat	Merauke	Kahayan	Winongo	Diah Suci	Mayang	Yuwono	Mira-1
Nomor seleksi	Obs-1653/Ps.J	Obs-1656/Ps.J	Obs-1658/Ps.J	Obs-1659/Ps.J	Obs-1650/Ps.J	Obs-1650/Ps.J	Obs-1688/Ps.J
Asal	Radiasi sinar γ 0,2 kGy pada F_1 (AT-4/IR-64)	Radiasi sinar γ 0,2 kGy pada F_1 (AT-4/IR-64)	Radiasi sinar γ 0,2 kGy pada F_1 (AT-3/IR-64)	Radiasi sinar γ 0,2 kGy pada F_1 (Cilsari/IR-74)	Radiasi sinar γ 0,2 kGy pada F_1 (Cilsari/IR-64)	Radiasi sinar γ 0,2 kGy pada var.IR-64	Radiasi sinar γ 0,2 kGy pada var.Cisantana
Golongan	cere	cere	cere	cere	cere	cere	cere
Umur tanaman	105-115 hari	110-115 hari	115-120 hari	115-120 hari	105-115 hari	110-115 hari	115-120 hari
Tinggi tanaman	115-120 cm	95-105 cm	110-115 cm	110-115 cm	115-120 cm	95-105 cm	105-110 cm
Anakan produktif	banyak	banyak	banyak	banyak	banyak	banyak	banyak
Warna batang	hijau	hijau	hijau	hijau	hijau	hijau	hijau
Posisi daun	tegak	miring	miring	tegak	tegak	tegak	tegak
Daun bendera	tegak	miring	tegak	tegak	tegak	miring	miring
Bentuk gabah	ramping	gemuk	ramping	ramping	ramping	ramping	ramping
Rasa nasi	pulen	pulen	pulen	pulen	pulen	pulen	pulen
Kadar amilosa	22,10%	22%	19,50%	19%	20,38%	22,10%	19%
Berat 1000 butir	25,50 gram	27,50gram	28 gram	25 gram	26,50 gram	25,50 gram	26,50 gram
Rata-rata produksi	6 ton/ha gkg	6,5 ton/ha gkg	6 ton/ha gkg	6,5 ton/ha gkg	6 ton/ha gkg	6 ton/ha gkg	6,29 ton/ha
Ketahanan terhadap hama	T wc 1,2	T wc 1,2	T wc 1,2	T wc 1,2,AT 3	T wc 1,2,AT 3	T wc 1,2,AT 3	T wc 1,2, AT 3
Ketahanan terhadap penyakit	T blb 3, AT 4	T blb 3, AT 4	T blb 3, AT 4	T blb 3, AT 4	T blb 3, AT 4	T blb 3, AT 4	T blb 3, AT 4
Tahun dilepas	2001	2003	2003	2003	2004	2004	2006
Pemulia	Mugiono dkk	Mugiono dkk	Mugiono dkk	Mugiono dkk	Mugiono dkk	Mugiono dkk	Mugiono dkk

antara lain terdapat pada ketepatan dan ketelitiannya dibandingkan dengan teknik konvensional. Sebagai contoh, suatu penelitian yang ingin mempelajari pengaruh pemupukan urea terhadap serapan N. Dalam metode konvensional, untuk mempelajari serapan N dari pupuk urea digunakan perlakuan tanpa pupuk, dibandingkan dengan perlakuan yang menggunakan pupuk. Selisih serapan N total dari dua kondisi tersebut merupakan serapan N dari pupuk urea. Pada metode dengan menggunakan teknik nuklir, perlakuan tanpa pupuk tidak perlu. Proses yang terjadi di dalam tanah pada kondisi tanpa urea akan berbeda dengan proses yang terjadi pada kondisi yang diperlakukan dengan pupuk urea (*priming effect*) sehingga akan terjadi kesalahan dalam menentukan serapan N yang berasal dari urea. Dengan teknik nuklir, hal tersebut tidak akan terjadi karena N yang berasal dari pupuk urea yang telah ditandai/dilabel menggunakan isotop ^{15}N dapat dilacak secara langsung dengan spektrometer emisi (Gambar 3).

Namun demikian, teknik nuklir memiliki beberapa kelemahan, antara lain harga isotop dan alat analisisnya sangat mahal. Untuk isotop yang bersifat radioaktif seperti ^{32}P , di samping harganya mahal, radiasinya juga sangat berbahaya. Isotop radioaktif ^{14}C mempunyai waktu paruh sangat panjang, yaitu 5300 tahun. Isotop ini sangat berbahaya karena kalau terjadi kontaminasi di dalam tubuh manusia tidak bisa hilang dengan sendirinya. Isotop ini dapat digunakan untuk mempelajari laju dekomposisi bahan organik dalam tanah. Oleh karena itu, dalam penelitian dengan teknik nuklir, diperlukan keterampilan dan pendidikan khusus bagi pelaksananya.



Gambar 3. Spektrometer emisi

5.1 Metode Langsung dan Tidak Langsung

Unsur N dan P pada budi daya tanaman padi merupakan faktor yang sangat menentukan dalam meningkatkan produksi. Isotop ^{15}N dan ^{32}P masing-masing adalah isotop yang digunakan untuk merunut dinamika unsur N dan P pada penelitian yang berhubungan dengan kesuburan tanah dan nutrisi tanaman. Ada dua metode yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu metode langsung dan tidak langsung.

Metode langsung digunakan untuk mempelajari unsur hara, misalnya N yang terdapat dalam pupuk, seperti urea dan amonium sulfat (Za) serta unsur P yang terdapat dalam pupuk, seperti TSP dan SP36. Jenis-jenis pupuk tersebut dapat dilabel dengan isotop ^{15}N atau ^{32}P sehingga karakter dan dinamika unsur N atau P yang berasal dari pupuk di dalam tanah dan tanaman dapat dideteksi.

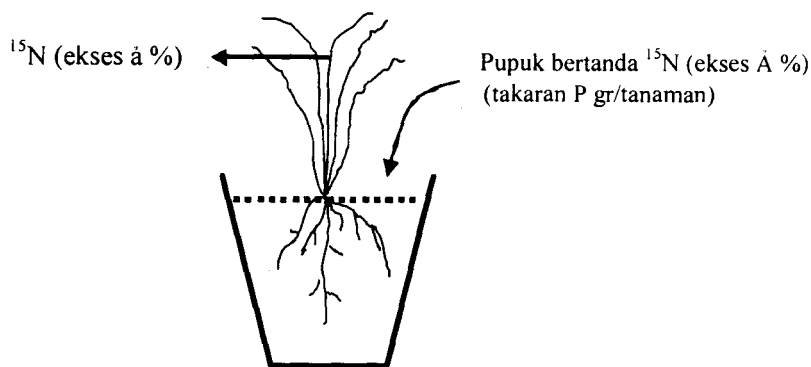
Metode tidak langsung digunakan untuk mempelajari unsur hara yang berasal dari pupuk yang tidak dapat dilabel, seperti pupuk organik, fosfat alam, dan pupuk guano. Pelabelan menggunakan isotop ^{15}N atau ^{32}P dilakukan pada tanah atau media yang digunakan untuk tanam. Untuk metode ini diperlukan tanaman referensi atau standar, yaitu tanaman yang ditanam pada media tanah yang telah dilabel dengan isotop, tetapi tidak diberi perlakuan dengan pupuk organik atau pupuk fosfat alam (perlakuan referensi). Pada media tanah yang diberi pemupukan dengan pupuk organik atau fosfat alam akan terjadi pengenceran isotop sehingga jumlah isotop yang terserap tanaman lebih rendah daripada yang terserap tanaman referensi. Penurunan konsentrasi isotop ini mencerminkan adanya kontribusi dari perlakuan uji coba yang dapat ditetapkan secara kuantitatif.

5.2 Metode untuk Mempelajari Unsur N pada Tanaman Padi

Di alam terdapat isotop ^{15}N dengan jumlah 0,3663% dari total N yang ada. Kandungan tersebut merupakan kelimpahan alami yang dikenal dengan *natural abundance* (IAEA, 1976). Oleh karena itu, untuk membuat pupuk yang bertanda ^{15}N , pupuk harus diperkaya sehingga memiliki kelimpahan atau eksek ^{15}N yang jumlahnya dinyatakan dalam persen. Selanjutnya, eksek (%) ini digunakan untuk menyatakan besaran bahan berlabel ^{15}N yang digunakan dalam analisis dan perhitungan untuk memperoleh serapan N dan efisiensi penggunaan pupuk (Axmann, 1990). Untuk penelitian kesuburan tanah dan nutrisi tanaman dengan metode langsung dapat digambarkan sebagai berikut.

Setelah tanaman diberi pupuk bertanda ^{15}N dengan takaran X g/tanaman, tanaman akan menyerap hara N yang berasal dari tanah maupun pupuk. Dalam penyerapan tersebut, tanaman tidak membedakan bentuk N yang diserap, baik

dalam bentuk ^{15}N maupun ^{14}N . Tanaman dipanen dan dianalisis menggunakan ^{15}N dengan eksek % dan serapan N yang berasal dari pupuk dapat diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut:



$$\text{Persentase serapan N berasal dari pupuk} = \frac{a \%}{A \%} \times 100\% = y \%$$

Serapan N berasal dari tanah juga dinyatakan dalam persen, yaitu: $(100 - y)\%$. Total kandungan N dalam tanaman (N total mg/tanaman) diperoleh dari hasil analisis N dengan menggunakan metode Kjedahl.

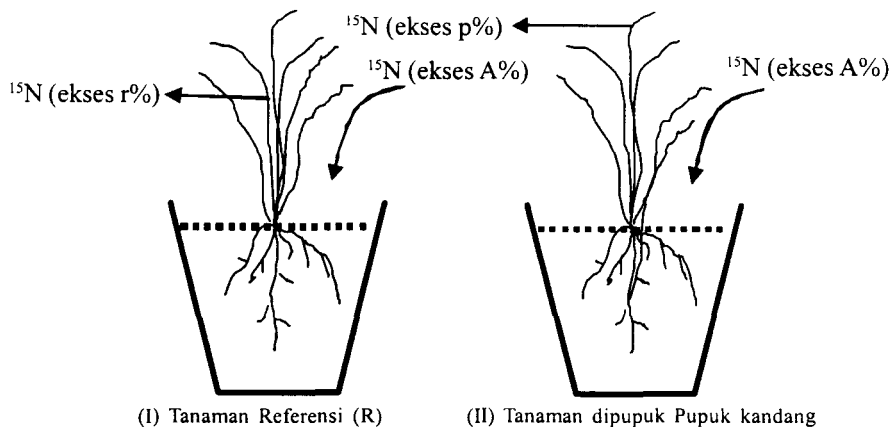
$$\text{Serapan N berasal dari pupuk} = \frac{y}{100} \times \text{N total (mg)} = z \text{ mg}$$

$$\text{Efisiensi penggunaan pupuk} = \frac{z \text{ mg}}{1000 \times X \text{ mg}} \times 100\% = e \%$$

Pada metode tidak langsung diperlukan tanaman referensi atau tanaman standard dan metode ini dapat digambarkan sebagai berikut. Misalnya akan diteliti kontribusi N dari pupuk kandang yang diberikan ke dalam tanah.

Pada metode tersebut, tanaman referensi maupun tanaman yang dipupuk dengan pupuk kandang (PK) diberi ^{15}N dengan eksek A%. Prinsip dari metode tidak langsung adalah sebagai berikut.

- Bila tanaman referensi (pot I) diberi pupuk bertanda ^{15}N , rasio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ hanya ditentukan oleh N yang berasal dari pupuk bertanda ^{15}N dan media tanah tempat tanaman tumbuh. Dengan kata lain, tanaman referensi akan



memperoleh N dari pupuk bertanda ^{15}N dan dari media tanah tempat tumbuh ^{14}N . Ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ yang terdapat pada tanaman hanya diencerkan dari N tanah.

- Pada tanaman yang diberi pupuk kandang (pot II), bila diberi pupuk bertanda ^{15}N , ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ditentukan oleh N yang berasal dari pupuk bertanda ^{15}N , ^{14}N dari media tanah tempat tumbuh dan ^{14}N dari pupuk kandang. Dengan kata lain, tanaman yang dipupuk dengan pupuk kandang akan memperoleh N dari pupuk bertanda ^{15}N , ^{14}N dari media tanah tempat tumbuh tanaman, dan ^{14}N dari pupuk kandang. Ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ yang terdapat pada tanaman diencerkan dari ^{14}N tanah dan ^{14}N dari pupuk kandang. Ini berarti ratio $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ tanaman referensi lebih besar daripada tanaman yang dipupuk dengan pupuk kandang dan ini digunakan untuk menghitung besar N yang dikontribusikan oleh pupuk kandang pada tanaman.

Cara perhitungan:

- Misal, pada tanaman referensi dan pupuk kandang diberikan pupuk urea bertanda ^{15}N dalam jumlah yang sama, yaitu 20 kg N/ha
- Atom eksis urea bertanda $^{15}\text{N} = \text{A}\%$
- Setelah dipanen, diproses, dan dianalisis bagian atas tanaman, maka diperoleh hasil atom eksis tanaman referensi = r %, dan atom eksis pupuk kandang = p%

Pada tanaman referensi (R):

- $\% \text{ N berasal dari urea } ^{15}\text{N} (\% \text{ N-bdu}) = \frac{r}{A} \times 100\% = m \%$
- $\% \text{ N-bdu} + \% \text{ N berasal dari tanah } (\% \text{ N-bdt}) = 100\%$
- $\% \text{ N-bdt} = (100 - m)\%$

Pada tanaman yang dipupuk dengan pupuk kandang (Pk):

- $\% \text{ N-bdu Pk} = \frac{P}{A} \times 100\% = k \%$
- $\% \text{ N-bdu} + \% \text{ N-bd tanah} + \% \text{ N dari pupuk kandang} = 100\%$ karena

$$\frac{\% \text{ N bdu R}}{\% \text{ N tanah R}} = \frac{\% \text{ N bdu Pk}}{\% \text{ N tanah Pk}}$$

maka:

$$\frac{m \%}{(100\% - m \%)} = \frac{k \%}{\% \text{ N tanah Pk}} \quad \% \text{ N tanah Pk} = \frac{(100\% - m \%)}{m \%} \times k \%$$

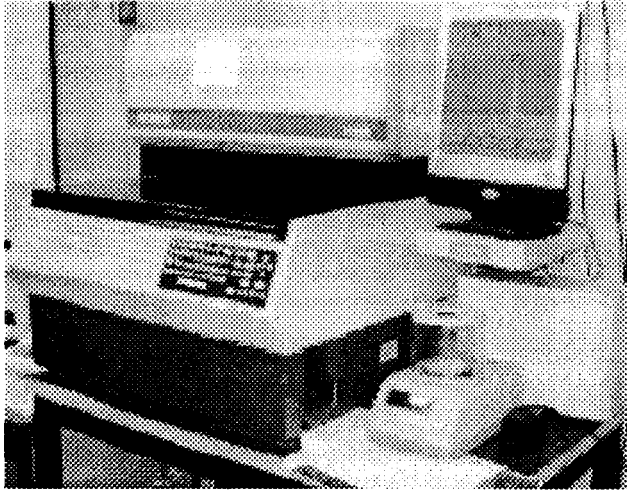
5.3 Metode untuk Mempelajari Unsur P pada Tanaman Padi

Berbeda dengan isotop ^{15}N yang stabil, isotop ^{32}P bersifat radioaktif yang memiliki waktu paruh 14,3 hari. Aktivitas radioaktif umumnya dinyatakan dalam satuan Curie (Ci) dan dalam penelitian pertanian sering digunakan μCi (mikro Curie) atau mCi (mili Curie). Namun saat ini, satuan aktivitas radioaktif yang digunakan oleh Standard International adalah Bacquerel (Bq). Satu Bacquerel adalah satu peluruhan per detik atau *disintegration per second* yang disingkat dengan dps. Pada alat pengukur atau pencacah aktivitas isotop radioaktif, satuan cacahan aktivitas ditunjukkan oleh cpm (cacahan per menit) atau *count per minute*. Alat pengukur atau pencacah aktivitas isotop radioaktif termasuk ^{32}P adalah *Liquid Scintillation Counter* atau pencacah pendar cair (Gambar 4).

Hubungan antara Bq, cpm, dan Ci dapat dilihat dalam Tabel 5. Tabel ini menunjukkan hubungan antara radioaktivitas yang dinyatakan dalam Curie atau Bacquerel dengan laju peluruhan (*disintegration*) yang dinyatakan dalam dps atau dpm. Karena alat pengukur aktivitas radioaktif umumnya tidak dapat memberikan efisiensi pengukuran 100%, misalnya untuk mencacah aktivitas isotop ^{32}P dengan metode Cerenkov hanya diperoleh efisiensi alat 40%, aktivitas yang ditunjukkan oleh alat tersebut dinyatakan dalam cps (cacahan per detik) atau cpm (cacahan per menit). Hubungan antara cpm, dpm, dan efisiensi adalah:

$$\text{Efisiensi} = \frac{\text{cpm}}{\text{dpm}} \times 100\%$$

Selanjutnya, dalam perhitungan serapan hara P yang berasal dari pupuk maupun efisiensi penggunaan pupuk, digunakan satuan radioaktivitas, baik untuk



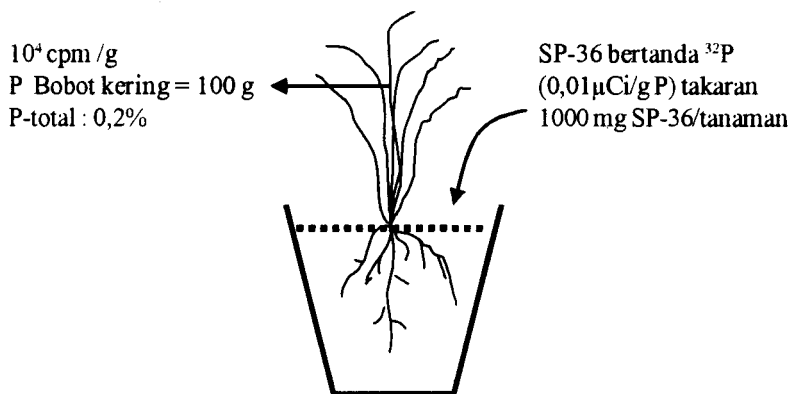
Gambar 4. Alat pencacah aktivitas isotop radioaktif (*Liquid Scintillation Counter*)

Tabel 5. Hubungan antara satuan radioaktivitas dan laju peluruhan

Radioaktivitas		Laju peluruhan	
Curie	Becquerel (Bq)	dps (disintegration per scond)	Dpm (disintegration per menit)
1 Curie	3,7 x 10 ¹⁰ Bq 37 GBq	3,7 x 10 ¹⁰	2,22 x 10 ¹²
1 mCi	3,7 x 10 ⁷ Bq 37 MBq	3,7 x 10 ⁷	2,22 x 10 ⁹
1 µCi	3,7 x 10 ⁴ Bq 37 KBq	3,7 x 10 ⁴	2,22 x 10 ⁶

Catatan: 1 dpm = 60 dps (disintegration per second)

Sumber: Sisworo, dkk., 2006.



pupuk ^{32}P yang diberikan maupun yang terdapat dalam tanaman dinyatakan dalam aktivitas jenis (a.j.) dengan satuan cpm/g P atau cpm/g tanaman.

Pada ilustrasi di bawah dipelajari, efisiensi penggunaan pupuk SP36 pada tanaman padi dengan teknik nuklir metode langsung.

Serapan P oleh tanaman padi maupun efisiensi penggunaan pupuk SP36 dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} 0,01 \mu\text{Ci/g P} &= 0,01 \times 222 \times 10^4 \text{ dpm/g P. Dengan efisiensi alat } 40\% \\ \text{berarti} &= 100/40 \times 0,01 \times 222 \times 10^4 \text{ cpm} = 555 \times 10^2 \text{ cpm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jadi, persentase serapan P berasal dari pupuk SP36} &= \frac{10^4}{555 \times 10^2} \times 100\% \\ &= 10000/555 = 18\% \end{aligned}$$

$$\text{Kandungan P total dalam tanaman} = 0,2\% \times 50 \text{ g} = 0,1 \text{ g} = 100 \text{ mg}$$

$$\text{Serapan P-berasal dari pupuk} = 18\% \times 100 \text{ mg P} = 18 \text{ mg P}$$

$$\begin{aligned} \text{Kandungan P dalam pupuk SP36 yang diberikan} &= 0,36 \times 0,43 \times 1000 \text{ mg P} \\ &= 155 \text{ mg P} \end{aligned}$$

$$\text{Jadi, efisiensi penggunaan pupuk SP36} = 18/155 \times 100\% = 11,6\%$$

Hal ini diperlukan untuk mempelajari dinamika P dari pupuk yang diaplikasikan ke dalam tanah. Dengan perhitungan ini, secara “kuantitatif” jumlah P yang betul-betul diserap tanaman dari pupuk yang diberikan dapat ditetapkan. Dengan teknik tersebut, dapat dibedakan jumlah P yang berada dalam setiap bagian tanaman, baik dari pupuk maupun yang berasal dari tanah. Dengan demikian, dinamika pupuk P dalam sistem tanah-tanaman dapat dipelajari secara akurat.

Pada penelitian pemupukan tanaman padi dengan tujuan mempelajari hara P yang berasal dari pupuk yang tidak dapat dilabel/ditandai dengan ^{32}P , misalnya pupuk fosfat alam dan pupuk organik, digunakan metode tidak langsung (Zapata, 1990). Metode ini dijelaskan sebagai berikut. Dalam hal ini, yang dilabel/ditandai adalah tanah dengan isotop ^{32}P . Sebelumnya tanah harus dicampur dengan isotop ^{32}P secara merata.

Perlakuan:

I : Tanah + larutan bertanda isotop ^{32}P

II : Tanah + SP36 (60 kg P/ha) + larutan bertanda isotop ^{32}P

III : Tanah + fosfat alam (FA) (200 kg P/ha) + larutan bertanda isotop ^{32}P

Perlakuan I merupakan standar atau referensi untuk perlakuan II dan III. Setelah tanaman percobaan dipanen dan diproses hasilnya, dianalisis hara P maupun isotop ^{32}P di laboratorium.

Dari analisis diperoleh:

I : aktivitas jenis (a.j.) tanaman = 2.000 dpm/mg P

II : aktivitas jenis (a.j.) tanaman = 1.200 dpm/mg P

III : aktivitas jenis (a.j.) tanaman = 1.400 dpm/mg P

Cara penghitungan:

Secara umum telah diketahui persamaan berikut:

$$\% \text{ P berasal dari pupuk (\% P bdp)} = \frac{\text{a.j. sampel tanaman}}{\text{a.j. pupuk berlabel}} \times 100$$

$$\% \text{ P berasal dari label (\% P bdl)} = \frac{\text{a.j. sampel tanaman}}{\text{a.j. sumber berlabel}} \times 100$$

Karena aktivitas jenis sumber berlabel = aktivitas jenis tanah berlabel,

$$\% \text{ P bdl} = \frac{\text{a.j. sampel tanaman}}{\text{a.j. tanah berlabel}} \times 100$$

Diketahui bahwa aktivitas jenis tanah berlabel = aktivitas jenis pada tanaman perlakuan I (2.000 dpm/mg P).

Selanjutnya, pada perlakuan II dapat dihitung:

$$\begin{aligned} \% \text{ P bdl} &= \frac{1.200}{2.000} \times 100 \\ &= 60\% \end{aligned}$$

$$\% \text{ P berasal dari pupuk tidak berlabel (dalam hal ini SP36)} = 100\% - 60\% = 40\%$$

Dari hubungan fraksional penggunaan dapat dikatakan bahwa:

$$\frac{\% \text{ P berasal dari label}}{\text{Jumlah P yang diberikan}} = \frac{\% \text{ P berasal dari pupuk tidak berlabel}}{\text{Jumlah P yang tersedia dalam tanah sebagai SP36}}$$

maka:

$$\frac{40}{60} = \frac{60}{X} \rightarrow X = 90 \text{ kg P/ha}$$

X adalah jumlah P tersedia dalam tanah, setara SP36

Pada perlakuan III:

$$\% \text{ P bdl} = \frac{1400}{2000} \times 100\% = 70\%$$

% P berasal dari pupuk tidak berlabel (dalam hal ini adalah fosfat alam) =
 $100\% - 70\% = 30\%$

Dari hubungan fraksional penggunaan dapat dikatakan bahwa

$$\frac{\% \text{ P berasal dari label}}{\text{Jumlah P yang diberikan}} = \frac{\% \text{ P berasal dari pupuk tidak berlabel}}{\text{Jumlah P tersedia dalam tanah sebagai fosfat alam}}$$

maka:

$$\frac{30}{200} = \frac{70}{X} \rightarrow X = 467 \text{ kg P/ha}$$

X : Jumlah P tersedia dalam tanah, setara fosfat alam

Dari hasil di atas diperoleh perbandingan kuantitatif fosfat alam dan SP36:

90 kg P sebagai SP36 = 467 kg P sebagai fosfat alam

1 kg P sebagai SP36 = X

Jadi, 1 kg P sebagai SP36 setara dengan $467 : 90 = 5,2$ kg P sebagai fosfat alam.

Apabila dari hasil analisis diperoleh serapan P-total tanaman pada perlakuan I, II, dan III, sumbangan P dari fosfat alam yang berasal dari tanah, SP36, maupun *priming effect* yang ditimbulkan dapat ditentukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amano, E. 1986. "Mutation Breeding Paper". *Interregional Induced Mutation Breeding Course*. International Atomic Energy Agency.
- Axmann, H. 1990. "Methods for ^{15}N Determination". *Use of Nuclear Techniques in Studies Soil-Plant Relationships*. Training Course Series No. 2. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- Fricke, H. and E.J. Hart. 1966. "Chemical Dosimetry". *Radiation Dosimetry*. New York: Academic Press.

- Harten, Van A.M. 1998. "Mutation Breeding". *Theori and Practical Application*. Cambridge University.
- Heslot, H., *et al.* 1966. "The Relative Mutagenic Effects of Some Nitrosamides on Barley Seeds". *Mutation. Res.* 3. p. 354–355.
- International Atomic Energy Agency. (IAEA). 1976. "Tracer Manual on Crops and Soils". *Technical Report Series No. 171*. A Joint Undertaking by the IAEA and FAO.
- International Atomic Energy Agency. 1977. "Manual on Mutation Breeding". *Tech. Report. No.119*. FAO/IAEA, Vienna, Austria.
- Ismachin, M. dan Hendratno. 1972. "Proyek Mutation Breeding". *Kesimpulan dan Kertas Kerja Pemuliaan Mutas*. Jakarta: Badan Tenaga Atom Nasional.
- Malusziynski, M., *et al.* 1994. "Mutation Techniques and Related Biotechnologies for Rice Improvement". *Seventh Meeting of the International Program on Rice Biotechnology*. Bali.
- Mugiono. 2001. "Pemuliaan Tanaman dengan Teknik Mutasi Buatan". *Diklat Pendayagunaan Hasil Litbang Iptek Nuklir Bidang Pertanian dan Perternakan*. Pusat Pendidikan dan Latihan, Badan Tenaga Atom Nasional. Jakarta.
- Mugiono. 2006. "Aplikasi Teknik Nuklir untuk Penelitian Bidang Pertanian dan Peternakan". *Pelatihan Introduksi Teknik Nuklir Bagi Guru SMU*. Jakarta: Pusat Pendidikan dan Pelatihan, Badan Tenaga Atom Nasional.
- Osone, K. 1963. "Study on the Developmental Mechanism on Mutated Cells Induced in Irradiated Rice Seeds". *Japan Journal Breeding* 13. p. 1–13.
- Zapata, F. 1990. "Isotope Techniques in Soil Fertility and Plant Nutrition Studies". *Use of Nuclear Techniques in Studies of Soil-Plant Relationships*. Training Course Series No. 2. Vienna: International Atomic Energy Agency.