

MANAJEMEN PEMUPUKAN NITROGEN PADA TANAMAN JAGUNG

Management of Nitrogen Fertilizer Application on Maize

Syafuruddin

Balai Penelitian Tanaman Serealia

Jalan Dr. Ratulangi, Kotak Pos 173, Maros 90514, Indonesia

Telp. (0411) 371529, Faks (0411) 371961

E-mail: syaf.syafuruddin@gmail.com, balitsereal@litbang.pertanian.go.id.

Diterima: 25 Maret 2015; Direvisi: 30 Juni 2015; Disetujui: 9 Juli 2015

ABSTRAK

Salah satu upaya untuk meningkatkan produktivitas jagung ialah dengan pemupukan sesuai kebutuhan tanaman dan kondisi lahan. Umumnya lahan pengembangan jagung di Indonesia defisiensi hara N sehingga diperlukan tambahan N melalui pemupukan. Manajemen pemupukan N dilakukan dengan memadukan takaran, waktu dan cara pemberian sesuai dengan kebutuhan tanaman dan kondisi lahan. Takaran pupuk N untuk tanaman jagung hibrida dengan peluang hasil 9–13 t/ha adalah 160–260 kg N/ha untuk tanah dengan kadar C-organik rendah, 133–233 kg N/ha untuk tanah dengan kandungan C-organik sedang, dan 105–205 kg N/ha untuk tanah dengan kadar C-organik tinggi. Pupuk diberikan secara bertahap, yaitu setengah atau sepertiga dari takaran rekomendasi pada awal tanam (< 10 HST) dan sisanya pada 31–52 HST dengan dibenamkan di dalam tanah. Penggunaan pupuk N perlu mempertimbangkan faktor pembatas hara lainnya, terutama P dan K. Oleh karena itu, kecukupan dan keseimbangan pemupukan N, P, dan K sangat penting dalam meningkatkan efisiensi pupuk N. Apabila menggunakan pupuk N-organik atau rotasi tanaman jagung dengan kacang-kacangan, penentuan takaran pupuk N-anorganik perlu mempertimbangkan N dari pupuk organik atau rotasi tanaman. Pemupukan N dapat menyebabkan pencemaran udara akibat penguapan NH_3 , N_2O , dan NO serta pencemaran air tanah akibat pencucian NO_3^- . Untuk mengurangi dampak negatif tersebut, diperlukan manajemen pemupukan N yang komprehensif dan pemberian insentif bagi petani yang menggunakan pupuk N-organik, melakukan rotasi jagung dengan tanaman kacang-kacangan, atau tumpang sari jagung dengan kacang-kacangan.

Kata kunci: Jagung, pemupukan nitrogen, bahan organik, efisiensi penggunaan N

ABSTRACT

One effort to increase maize productivity is applying fertilizer according to plant needs and soil conditions. Generally maize planted land in Indonesia is N deficient so that applying additional N is required. N fertilizer management is done by combining the rate, timing and mode of application according to plant needs and soil conditions. N fertilizer rate for hybrid maize with yield opportunities of 9>13 t/ha is 160>260 kg N/ha for soil with low levels of organic C, 133>233 kg N/ha for soil with moderate organic C content, and 105>205 kg N/ha for soil with high levels

of organic C. Fertilizer is given in stages, i.e. half or a third of the recommendation rates are given at the beginning of planting (<10 DAP) and the rest is at 31>52 DAP with buried in the ground. The use of N fertilizer should consider limiting factor of other nutrients, especially P and K. Therefore, the sufficiency and balance of N, P, and K is essential in improving N fertilizer efficiency. When using organic N fertilizer or rotation of maize with legumes, determination of inorganic N fertilizer rate needs to take into account N from organic fertilizer or crop rotation. N fertilizer application can cause air pollution due to NH_3 , N_2O and NO emissions and groundwater contamination due to NO_3^- leaching. To reduce the negative impact, it needs comprehensive N fertilizer management and provision of incentives for farmers who applying organic N fertilizer, rotation of maize-beans, or intercropping maize with beans.

Keywords: Maize, nitrogen fertilizer application, organic matter, N use efficiency

PENDAHULUAN

Produktivitas jagung secara nasional tahun 2013 masih rendah, yaitu 4,84 t/ha (BPS 2014), dibanding rata-rata hasil varietas bersari bebas seperti Lamuru dengan rata-rata hasil 5,6 t/ha dan potensi hasil 7,6 t/ha serta varietas hibrida Pioneer-21 dengan rata-rata hasil 8,3 t/ha dan potensi hasil 13 t/ha (Aqil 2013). Salah satu penyebab rendahnya produktivitas jagung adalah pemupukan yang kurang tepat.

Produktivitas tanaman jagung sangat dipengaruhi oleh ketersediaan hara, khususnya nitrogen (N). Umumnya lahan pengembangan jagung di Indonesia defisiensi hara N sehingga diperlukan tambahan pupuk N (anorganik dan organik) agar tanaman tumbuh dan berproduksi secara optimal. Pemupukan N memberikan kontribusi 30–50% terhadap peningkatan hasil jagung (Erisman *et al.* 2008). Untuk memperoleh hasil jagung 1 ton, tanaman menyerap hara N dalam brangkasan bagian atas tanaman sebanyak 5,5–7 kg dan dalam biji 12,1–14,5 kg (Syafuruddin *et al.* 2006).

Pemupukan N pada tanaman jagung di tingkat petani beragam antarlokasi karena adanya perbedaan kondisi lahan. Pada lahan kering tanah ultisol di Lampung, takaran N berkisar antara 45–160 kg/ha, yang diaplikasikan satu

kali pada umur 2 minggu setelah tanam (MST) dengan tingkat hasil 4–5 t/ha menggunakan varietas jagung hibrida Bisi-2. Pada lahan sawah tanah aluvial di Kediri (Jawa Timur), pemupukan N dengan takaran 225–360 kg/ha yang diaplikasikan 3–5 kali memberikan rata-rata hasil 6–8 t/ha menggunakan varietas Pioneer-21. Pada lahan sawah tanah aluvial di Gowa dan Takalar (Sulsel), pemupukan N 270–360 kg/ha yang diaplikasikan satu kali pada umur 2 MST memberikan hasil 6–8 t/ha menggunakan varietas Pioneer-21 atau NK-31 (Subandi *et al.* 2004; Saenong *et al.* 2005; Syafruddin 2012).

Hasil penelitian Syafruddin *et al.* (2009) menunjukkan bahwa kebutuhan pupuk N pada tanaman jagung hibrida adalah 150–225 kg/ha dengan hasil 11–14 t/ha. Pemberian hara N yang tidak tepat jumlah, cara, dan waktu pemberiannya menyebabkan pertumbuhan tanaman tidak optimal, produktivitas dan efisiensi penggunaan N rendah, serta berdampak negatif terhadap lingkungan.

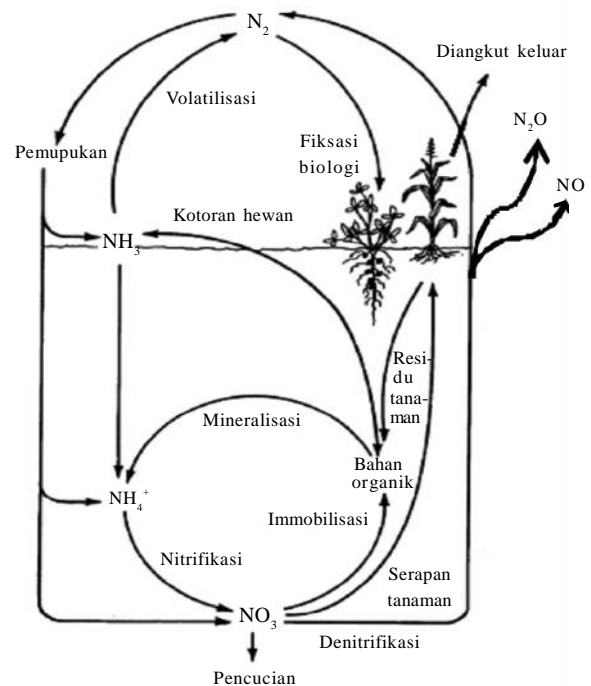
Secara umum, penggunaan pupuk N oleh tanaman sereal kurang efisien, umumnya kurang dari 50% dari total N yang diberikan. Penyebab utamanya adalah N hilang dari sistem tanaman-tanah melalui pencucian, limpasan, erosi, denitrifikasi, penguapan NH_3 atau emisi gas N_2O (Cassman *et al.* 2002). Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi penggunaan N diperlukan manajemen pemupukan yang tepat. Tulisan ini membahas aspek praktis manajemen pemupukan N pada tanaman jagung untuk meningkatkan efisiensi penggunaan N, menekan kehilangan N, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

MASALAH PEMUPUKAN N

Kehilangan Hara

Tanaman jagung menyerap hara N tersedia dalam bentuk NO_3^- dan NH_4^+ dari pupuk (anorganik dan organik), udara melalui fiksasi tanaman kacang-kacangan, dan dari bahan organik tanah. Pupuk N-anorganik yang diaplikasikan ke dalam tanah akan terurai menjadi NH_4^+ atau NO_3^- (bergantung pada jenis pupuk), sedangkan bahan organik (residu tanaman dan pupuk organik) setelah melalui proses mineralisasi akan menjadi NH_4^+ dan nitrifikasi NH_4^+ menjadi NO_3^- . Selain diserap tanaman, hara N dalam bentuk NH_4^+ dan NO_3^- sebagian akan hilang. NH_4^+ berubah menjadi NH_3 dan akan menguap, sedangkan NO_3^- sebagian mengalami pencucian dan denitrifikasi menjadi gas N_2O dan NO (Gambar 1).

Pada tanaman jagung, hara N yang hilang melalui penguapan berkisar antara 11–48%, denitrifikasi 0,8–1,2%, dan emisi N_2O sebesar 0,9–1,7% dari takaran N-urea yang diberikan ke tanaman (Cai *et al.* 2002). Sekitar 15% dari pupuk N pada tanaman jagung akan tercuci dalam bentuk NO_3^- (Zhou dan Butterbach-Bahl 2013). Emisi gas N_2O dan NH_3 serta pencucian NO_3^- dipengaruhi oleh takaran pupuk N. Penguapan N_2O dan pencucian NO_3^-



Gambar 1. Siklus hara nitrogen pada tanaman jagung.

meningkat secara eksponensial, sedangkan NH_3 meningkat secara linier dengan bertambahnya takaran N (Wang *et al.* 2014a).

Dampak Negatif terhadap Lingkungan

Intensifikasi pertanian jagung berimplikasi terhadap peningkatan penggunaan pupuk N untuk mencapai tingkat produktivitas tanaman yang optimal. Dampak negatif pemupukan N adalah pemanasan global karena tidak semua N dapat diserap tanaman, tetapi sebagian hilang dalam bentuk gas. Selain itu, industri pembuat pupuk N juga mengeluarkan gas CO_2 .

Gas NH_3 , N_2O , dan NO merusak kualitas udara troposfer, menurunkan ozon pada lapisan stratosfer, dan berkontribusi terhadap radiasi ultra violet. Emisi 1 kg N_2O berpengaruh terhadap perubahan iklim/pemanasan global 300 kali lebih besar dibanding emisi 1 kg CO_2 (EPA 2014). Setelah teroksidasi, NH_3 akan meningkatkan keasaman tanah. NO_3^- yang tercuci akan mencemari air tanah sehingga menurunkan kualitas air (keasaman air tanah, danau atau sungai meningkat) dan mengurangi keanekaragaman hayati pada perairan karena eutrofikasi (EPA 2014; Fields 2014).

Menurut Badan Kesehatan Dunia (WHO), batas aman kandungan NO_3^- dalam air untuk dikonsumsi adalah 10 mg/l. Konsentrasi NO_3^- yang tinggi dapat menyebabkan metemoglobinemia atau penyakit *baby blue*. Pada penderita penyakit *baby blue*, ion nitrat menghambat reproduksi dan meningkatkan risiko

beberapa jenis kanker, termasuk kanker kandung kemih dan ovarium (EPA 2014; Fields 2014).

MANAJEMEN PEMUPUKAN N

Manajemen pemupukan N yang tepat dimaksudkan agar N dapat dimanfaatkan secara optimal oleh tanaman dengan tingkat kehilangan N serendah mungkin dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, sehingga hasil tanaman optimal dan berkelanjutan. Manajemen pemupukan N mencakup takaran pemberian pupuk N, waktu dan cara pemberian, keseimbangan N dengan hara lain, penggunaan bahan organik dan pengembalian biomassa tanaman (daur ulang hara), serta pemanfaatan tanaman legum untuk menambat N dalam sistem rotasi tanaman.

Takaran Pupuk

Pemberian pupuk N sesuai dengan kebutuhan tanaman tidak hanya berkaitan dengan tingkat produktivitas dan kualitas hasil, tetapi juga efisiensi ekonomi dan dampak lingkungan. Kekurangan pemberian pupuk N akan menyebabkan produktivitas dan kualitas hasil menurun, sebaliknya kelebihan pemberian pupuk N menyebabkan tanaman mudah rebah, selain tidak efisien dan berdampak negatif terhadap lingkungan.

Takaran pupuk dapat berbeda antarlokasi dan musim karena adanya perbedaan sifat tanah dan peluang hasil yang dapat dicapai. Takaran pupuk N untuk tanaman jagung dapat ditentukan dengan 1) berdasarkan hasil analisis tanah dikaitkan dengan target/peluang hasil, 2) menggunakan perangkat lunak Pemupukan Jagung Spesifik lokasi (PuJS)/*Nutrient Expert* (NE), dan 3) menggunakan bagan warna daun (BWD).

Target hasil adalah peluang hasil yang dapat diperoleh dengan mempertimbangkan kemampuan lahan, potensi hasil varietas, dan pengelolaan tanaman (*crop management*). Target/peluang hasil yang akan dicapai dan respons hasil jagung dapat ditentukan melalui perlakuan petak omisi (Witt *et al.* 2009). Namun jika data petak omisi tidak tersedia, target/peluang hasil dapat ditentukan berdasarkan hasil tertinggi yang pernah dicapai di lokasi tersebut dengan pengelolaan tanaman yang baik dan tanpa pembatas hara, atau 80% dari potensi varietas yang akan dikembangkan dengan asumsi pengelolaan tanaman baik.

Kebutuhan pupuk N tanaman jagung berdasarkan hasil analisis tanah (kandungan bahan organik tanah) dan target hasil disajikan pada Tabel 1. Data tersebut diadopsi dari Leikam *et al.* (2003) dan dihitung ulang disesuaikan dengan hasil penelitian pemupukan N pada tanaman jagung di berbagai lokasi (Syafuruddin *et al.* 2009). Berdasarkan rekomendasi ini, setiap kenaikan target hasil 1 t/ha dari target hasil minimal 5 t/ha, diperlukan tambahan pupuk N 25 kg/ha.

Tabel 1. Rekomendasi pemupukan N pada tanaman jagung berdasarkan target hasil dan kandungan C-organik tanah.

Target hasil (t/ha)	Takaran pupuk N (kg/ha)		
	C-organik rendah (< 1,5%)	C-organik sedang (1,5–3%)	C-organik tinggi (> 3%)
5	60	33	5
6	85	58	30
7	110	83	55
8	135	108	80
9	160	133	105
10	185	158	130
11	210	183	155
12	235	208	180
13	260	233	205

Aplikasi pupuk dengan tugal dan displit.

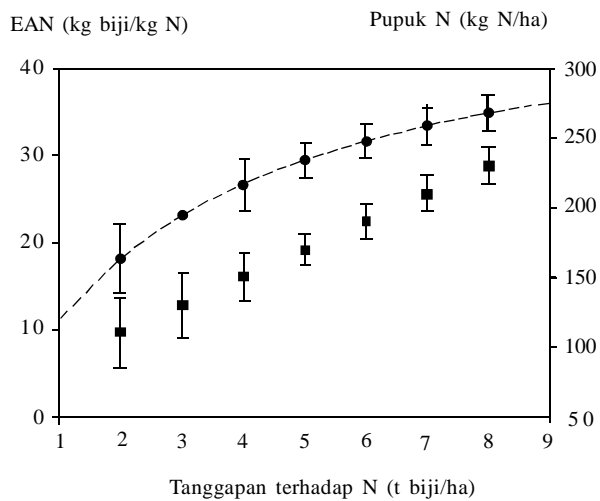
Sumber: Syafuruddin *et al.* (2009).

Standar pemupukan untuk memperoleh hasil minimal 5–6 t/ha adalah 60 kg N/ha bila kandungan C-organik tanah rendah, 33 kg N/ha bila kandungan C-organik tanah sedang, dan 5 kg N/ha bila kandungan C-organik tanah tinggi. Dengan menerapkan pengelolaan tanaman yang optimal dan varietas hibrida dengan peluang hasil 9–13 t/ha, takaran pemupukan N adalah 160–260 kg/ha untuk tanah dengan kadar C-organik rendah, 133–233 kg/ha untuk tanah dengan kandungan C-organik sedang, dan 105–205 kg/ha untuk tanah dengan kandungan C-organik tinggi. Keakuratan rekomendasi pemupukan berdasarkan cara ini sangat bergantung pada keakuratan hasil analisis tanah (bahan organik) dan penentuan target hasil.

Penentuan kebutuhan pupuk dengan perangkat lunak dapat menggunakan program PuJS/NE. Akurasi takaran pupuk yang direkomendasikan berdasarkan simulasi perangkat lunak komputer bergantung pada informasi masukan data sesuai dengan isian masing-masing program. Program PuJS/NE disimulasi sesuai prinsip-prinsip pengelolaan hara spesifik lokasi untuk jagung (Witt *et al.* 2009). Pengelolaan hara spesifik lokasi merupakan suatu upaya untuk menyediakan hara bagi tanaman secara tepat, baik jumlah maupun waktu aplikasinya dengan mempertimbangkan kemampuan tanah dalam menyediakan hara secara alami, pemulihan hara, dan peluang hasil yang dapat diperoleh. PuJS/NE memungkinkan petani secara dinamis menyesuaikan tingkat pemupukan berdasarkan kebutuhan tanaman, lingkungan tumbuh, dan target hasil sehingga memperoleh hasil jagung, efisiensi dan keuntungan ekonomi yang lebih baik.

Hasil validasi PuJS/NE di beberapa lokasi di Kediri Jawa Timur dan di Bone Sulawesi Selatan menunjukkan bahwa rekomendasi pemupukan berdasarkan PuJS/NE meningkatkan efisiensi pemupukan pada tanaman jagung antara 8–22% dibanding yang dilakukan di petani (Zaini 2011). Di India, pemupukan berdasarkan PuJS/NE

memberikan hasil 10–15% lebih tinggi dibanding pemupukan di tingkat petani dan rekomendasi setempat (Satyanarayana *et al.* 2013; Shahi *et al.* 2014). Xu *et al.* (2014) melaporkan bahwa penggunaan PuJS/NE pada jagung hibrida di China meningkatkan efisiensi takaran pupuk 34%, menekan kehilangan hara N, dan mengurangi dampak lingkungan. Dalam menentukan rekomendasi takaran pupuk N, PuJS/NE didasarkan pada target efisiensi agronomis N (EAN) dan tanggapan tanaman jagung terhadap pupuk N, yaitu perbedaan antara hasil dengan pemberian pupuk N dibandingkan dengan hasil tanpa pemupukan N (IPNI dan Badan Litbang Pertanian 2009; Gambar 2). Berdasarkan PuJS/NE, setiap peningkatan respons hasil antara tanaman yang diberi N dan tanpa N sebesar 1 t/ha diperlukan tambahan pupuk N 20 kg/ha.



Gambar 2. Kebutuhan pupuk N tanaman jagung berdasarkan respons terhadap pupuk N dan target efisiensi agronomis (EAN) (IPNI dan Badan Litbang Pertanian 2009).

Kecukupan hara N pada tanaman dapat dipantau melalui warna daun. Jika tanaman kekurangan N, daun akan berwarna hijau kekuningan, sebaliknya bila kelebihan N akan berwarna hijau tua. Tingkat kehijauan daun dapat diukur dengan menggunakan BWD yang mempunyai skala 2–5, dari warna kuning kehijauan hingga hijau tua (Gambar 3). BWD telah diterapkan pada tanaman padi untuk pengelolaan pemupukan N (Furuya 1987, IRRI 1996, Angadi *et al.* 2005). Pemberian pupuk N berdasarkan BWD meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk N pada padi antara 10–53% (Wahid 2003). Pengukuran warna daun menggunakan BWD berkorelasi positif dengan kadar N daun pada tanaman jagung fase V12 (tanaman mempunyai 12 daun yang membuka sempurna, umur ± 45 hari setelah tanam/HST) dan VT (saat keluar bunga jantan, umur ± 57–63 HST) (Syafuruddin *et al.* 2008; Effendi *et al.* 2012).

Untuk pemupukan N berdasarkan BWD pada tanaman jagung, Syafuruddin *et al.* (2008) membedakan varietas antara varietas hibrida dan varietas bersari bebas, kemudian dilengkapi oleh Effendi *et al.* (2012) berdasarkan target hasil. Rekomendasi tersebut berupa tambahan pupuk N pada fase V12 (± 45 HST) untuk mempertahankan nilai BWD pada skala 4,7 (Tabel 2). Penggunaan BWD dilakukan dengan cara pemberian awal < 7 HST sebanyak 50 kg N/ha dan pada saat V8–V10 (± 31–38 HST) sebanyak 75 kg N/ha, kemudian pada saat V12 (± 45 HST) berdasarkan nilai BWD dan disesuaikan dengan target hasil.

Tingkat akurasi pemupukan N berdasarkan BWD dipengaruhi oleh kemampuan membandingkan warna daun dengan warna pada skala BWD, tanaman tidak kekeringan atau kelebihan air ataupun kekurangan hara lain, serta pertumbuhan individu tanaman seragam pada saat pemberian pupuk N awal. Untuk menghindari variasi yang tinggi antara tiap individu tanaman, dilakukan



Gambar 3. Bagan warna daun (kiri), warna daun tanaman jagung defisiensi hara N tampak menguning (tengah), dan cukup N warna hijau (kanan).

Tabel 2. Perkiraan tambahan pupuk N tanaman jagung pada V12 (45 hari setelah tanam) sesuai dengan nilai bagan warna daun (BWD) dan target hasil.

Skala BWD	Takaran pupuk N (kg/ha) dengan target hasil (t/ha)		
	>10	9–10	8–9
4,0	170	125	98
4,1	149	104	71
4,2	132	87	54
4,3	113	69	36
4,5	102	57	25
4,5	91	46	13
4,6	77	31	13
4,7	62	17	10

Sumber: Effendi *et al.* (2012).

dengan memperbanyak jumlah sampel (minimal 20 tanaman).

Verifikasi di tingkat petani pada lahan sawah di Gowa (Sulsel) menunjukkan bahwa pemberian pupuk N berdasarkan nilai BWD meningkatkan efisiensi pemupukan N. Pemupukan N berdasarkan BWD (200 kg N/ha) memberikan hasil jagung 8,69 t/ha dibanding pemupukan di tingkat petani (247 kg N/ha) dengan hasil 7,73 t/ha (Zubachtirodin 2011). Penggunaan BWD dalam pengelolaan pemupukan N secara konsisten memberikan hasil, efisiensi takaran pupuk, dan keuntungan yang lebih tinggi dibanding pemupukan di tingkat petani, baik pada tanaman jagung (Singh *et al.* 2011) maupun padi (Rajendran *et al.* 2010).

Waktu Pemberian Pupuk

Kebutuhan hara tanaman jagung berbeda pada setiap fase tumbuh. Oleh karena itu, sinkronisasi antara tingkat kebutuhan hara tanaman dengan waktu pemberian pupuk dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi pemupukan N. Serapan hara rendah pada awal pertumbuhan tanaman kemudian meningkat dengan cepat pada fase vegetatif V10 (± 38 HST) sampai awal generatif VT (± 57 – 63 HST), lalu menurun pada fase pemasakan biji.

Tanaman jagung menyerap separuh hara N dari total serapan pada saat V10–VT (38–63 HST). Laju serapan hara maksimum terjadi saat akumulasi bahan kering tanaman pada periode pertumbuhan vegetatif V10–V14 atau umur 38–52 HST dengan rata-rata serapan N 3,53 kg/hari (Jones *et al.* 2011, Bender *et al.* 2013, Ransom dan Enders 2014). Kecukupan hara N pada periode tersebut sangat penting untuk menjamin pertumbuhan dan produktivitas yang optimal (Bender *et al.* 2013, Butzen 2014). Oleh karena itu, seluruh pupuk N sudah harus diaplikasikan pada fase V10–V14 (± 38 – 52 HST). Pemberian N pada saat mendekati atau periode serapan hara maksimum meningkatkan efisiensi penggunaan N (Scharf dan Lory 2006, Jat *et al.* 2013).

Jika pada awal pertumbuhan tanaman kekurangan N, penundaan pemupukan N hingga fase V6 (24 HST) menyebabkan penurunan hasil 12% (Binder *et al.* 2000). Pemberian seluruh takaran pupuk N sebelum tanam atau pada saat tanam dapat mengurangi ketersediaan jumlah N pada saat kebutuhan hara maksimum, menurunkan jumlah biji per tongkol, hasil biji, dan efisiensi agronomis N (Sangoi *et al.* 2007).

Pemberian pupuk N secara bertahap lebih baik dibanding secara sekaligus karena lebih efektif serta meningkatkan hasil dan efisiensi penggunaan N (Cassman *et al.* 2002, Scharf *et al.* 2002, Roberts 2008). Pemupukan N secara bertahap masing-masing 1/2 takaran saat tanam + 1/2 takaran saat V6 (± 24 HST) memberikan hasil 4–9% lebih tinggi dibanding jika seluruh takaran N diberikan pada saat tanam (Abbasi *et al.* 2013). Hasil penelitian Syafuruddin *et al.* (2009) menunjukkan bahwa pemupukan N secara bertahap, yaitu 1/3 pada awal tanam (< 10 HST) + 1/3 saat V8 (± 31 HST) + 1/3 saat V12 (± 45 HST) memberikan hasil 9% lebih tinggi dibanding pemberian 1/3 awal tanam + 2/3 saat V10 (± 38 HST) atau 1/2 pada awal tanam + 1/2 saat V8 (± 31 HST).

Frekuensi aplikasi pupuk selain mempertimbangkan efektivitas dan efisiensi pemupukan secara teknis, juga perlu memerhatikan efisiensi ekonomisnya, yaitu biaya tenaga kerja dalam setiap aplikasi. Berdasarkan laju tumbuh dan akumulasi bahan kering tanaman jagung, aplikasi pupuk N secara bertahap disarankan 1/2 atau 1/3 pada awal tanam (< 10 HST) dan sisanya pada saat V8–V14 (± 31 – 52 HST).

Cara Pemberian

Cara pemberian pupuk yang tepat sama pentingnya dengan menentukan takaran yang tepat dalam upaya meningkatkan efisiensi penggunaan N dan produktivitas tanaman. Di daerah tropis basah seperti Indonesia, curah hujan dan suhu relatif tinggi sehingga tingkat pencucian dan penguapan hara N juga tinggi. Untuk menekan pencucian dan penguapan N, cara pemberian pupuk harus tepat.

Hasil penelitian Zubachtirodin (2010, 2011) menunjukkan pemberian pupuk N dengan cara tugal atau diletakkan di atas permukaan tanah lalu ditutup/ditimbun memberikan hasil lebih tinggi dibanding pemberian N dengan diletakkan di atas permukaan tanah tanpa ditutup/ditimbun (Tabel 3). Pemberian N secara tugal di samping barisan tanaman menghasilkan jumlah biji/tongkol, bobot 100 biji, dan hasil yang lebih tinggi dibanding pemupukan dengan disebar (Saleem *et al.* 2009). Pemberian N (urea) secara disebar atau dilarutkan dalam air kurang tepat di daerah tropis karena suhu yang tinggi menyebabkan banyak N yang hilang melalui penguapan NH_3 .

Pupuk N dapat diberikan melalui penyemprotan pada daun. Namun, penyemprotan N pada daun harus memperhitungkan konsentrasinya terutama pada musim

Tabel 3. Hasil jagung pada berbagai cara pemberian pupuk N, Gowa (Sulsel), 2010 dan 2011.

Cara pemberian	Hasil (t/ha)			
	2010		2011	
	Musim tanam I	Musim tanam II	Musim tanam I	Musim tanam II
C1	7,30	7,37	4,36	7,20
C2	7,51	7,63	4,87	8,00
C3	7,50	7,79	4,91	7,85

C1 = diletakkan di atas permukaan tanah, C2 = diletakkan di atas permukaan tanah lalu ditutup tanah, dan C3 = ditugal lalu ditutup tanah.

Sumber: Zubachtirodin (2010, 2011).

kemarau karena dapat menyebabkan daun terbakar dan N hilang melalui penguapan. Aplikasi urea dengan disemprotkan ke daun dengan konsentrasi dan waktu pemberian yang tepat dapat meningkatkan hasil dan kualitas hasil jagung (Kheirabadi *et al.* 2012), menambah klorofil daun, serta meningkatkan indeks luas daun (Mahmoodi dan Yarnia 2011).

Umumnya pemupukan hara makro dengan cara penyemprotan ke daun menggunakan konsentrasi < 2% (Fageria *et al.* 2009). Pemupukan N lewat daun dengan konsentrasi 1,5% (15 g urea/l air) yang diaplikasikan pada umur 30, 45, dan 60 HST meningkatkan hasil, komponen hasil, dan kandungan N dalam biji jika disertai pemupukan N melalui tanah dengan takaran sesuai rekomendasi (Afifi *et al.* 2011). Pemupukan melalui daun tidak mengganti takaran pupuk, tetapi hanya melengkapi takaran pupuk yang diaplikasikan melalui tanah (Fageria *et al.* 2009). Agar pemupukan lewat daun efektif, penyemprotan N sebaiknya dilakukan pada saat stomata membuka dan suhu tidak terlalu tinggi (untuk menghindari daun terbakar). Waktu penyemprotan terbaik adalah pada sore (Fageria *et al.* 2009) atau pagi hari (Muraoka dan Neptune 1977).

Penggunaan Pupuk Organik

Pemberian pupuk anorganik secara terus-menerus dan intensitas pertanaman tinggi menyebabkan kandungan C-organik tanah terkuras sehingga mempercepat degradasi kesuburan lahan. Karena itu, untuk mempertahankan kesuburan dan produktivitas lahan secara berkelanjutan diperlukan tambahan pupuk organik. Kombinasi pemberian pupuk anorganik dan organik memperbaiki produktivitas lahan secara berkelanjutan, meningkatkan efisiensi penggunaan N, dan mengurangi pencemaran lingkungan. Kombinasi pemupukan N-anorganik dan N-organik dapat mempertahankan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman dalam jangka panjang (Eche *et al.* 2013).

Sekitar 60% dari total N yang diserap tanaman jagung berasal dari tanah dan 38% dari pemupukan, hanya sekitar 38% dari N yang diserap dapat dikembalikan ke dalam

tanah melalui brangkasan tanaman (Xiaobin *et al.* 2001). Kombinasi pemberian pupuk organik biomassa tanaman jagung dan pupuk N anorganik mengefisienkan penggunaan pupuk N anorganik serta meningkatkan ketersediaan hara N dalam tanah dan serapan N dalam tanaman, yang pada akhirnya akan meningkatkan hasil jagung (Xiaobin *et al.* 2001).

Pemupukan N anorganik (urea) yang dikombinasi dengan pupuk kandang sapi meningkatkan kapasitas pertukaran kation, C-organik, total N, *bulk density*, pH tanah, porositas tanah, dan kadar air tanah dibanding pemberian N dari urea tunggal (Eche *et al.* 2013). Aplikasi pupuk N dan pupuk kandang sapi pada tanah dengan tingkat kesuburan rendah sampai sedang memberikan hasil jagung yang lebih tinggi dibanding pemberian N tanpa pupuk kandang (Zingore 2011). Pemberian 50% N dari pupuk kandang ayam dan 50% N dari urea memberikan hasil jagung 12–15% lebih tinggi dibanding N hanya dari urea (Cheema *et al.* 2010, Ali *et al.* 2011).

Analisis kandungan hara N pada pupuk organik sangat diperlukan untuk menentukan takaran pupuk kandang untuk dikombinasikan dengan pupuk N anorganik. Sumber bahan organik dapat berasal dari kotoran ternak, sisa tanaman, atau hijauan tanaman. Setiap bahan organik mempunyai kandungan hara yang berbeda seperti disajikan pada Tabel 4.

Keseimbangan N dengan Hara Lain

Pemberian pupuk N dengan takaran yang tepat dan seimbang dengan unsur hara lain, terutama P dan K adalah hal utama untuk memperoleh hasil tinggi dan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk N. Defisiensi unsur hara lain akan menyebabkan produktivitas tanaman menurun sehingga efisiensi produktivitas hara N juga menurun. Keseimbangan hara N, P, dan K meningkatkan efisiensi pemulihan (*recovery efficiency*) hara 54% dibanding pemberian N saja (tanpa P dan K) dengan efisiensi pemulihan 21% (Roberts 2008). Hasil penelitian Syafruddin (2013) pada tanah Latosol Manado (Sulut) menunjukkan bahwa pemupukan N yang dikombinasikan dengan P dan K memberikan hasil biji dan produktivitas

Tabel 4. Kandungan hara N, P, dan K beberapa bahan organik.

Sumber bahan organik	Kandungan N (%)
Kotoran ternak	
Ayam	2,0–2,3
Domba	2,2–3,4
Sapi	1,2–1,9
Kuda	0,70
Babi	1,0–2,0
Hijauan tanaman	
Sesbania	3,3
Crotalaria	2,6
Glirisidia	2,9
Enceng gondok	2,30
Residu tanamam	
Abu sekam	0,31
Jerami padi	0,58
Jerami gandum	0,49
Biomass sorgum	0,4
Biomass jagung	0,59
Kacang tunggak	1,1
Kacang gude	1,19
Kacang tanah	1,60

Sumber: Tennakoon dan Bandara (2003), Chandra (2005), Roy *et al.* (2006).

hara N lebih tinggi dibanding tanpa dikombinasi dengan salah satu hara (P atau K). Pemupukan 150 kg N + 30 kg P_2O_5 + 45 kg K_2O /ha memberikan hasil jagung 12,06 t/ha dengan nisbah produktivitas hara N 80,4 kg biji/kg N. Apabila takaran P dinaikkan menjadi 60 kg P_2O_5 /ha, hasil menurun menjadi 11,43 t/ha dengan nisbah produktivitas hara N 76,2 kg biji/kg N. Hal ini berarti bahwa pemberian 150 kg N dikombinasi 30 kg P_2O_5 dan 45 kg K_2O /ha mempunyai keseimbangan hara yang lebih baik dibanding jika dikombinasi dengan 60 kg P_2O_5 dan 45 kg K_2O /ha (Tabel 5).

Rotasi dengan Tanaman Kacang-kacangan

Penanaman kacang-kacangan (tanaman penutup tanah atau tanaman produksi) sebelum jagung ditanam berdampak positif terhadap efisiensi penggunaan pupuk N karena tanaman kacang-kacangan meningkatkan kadar N tanah melalui bintil akar yang tertinggal dalam tanah. Hasil penelitian Subaedah (2005) menunjukkan bahwa penanaman tanaman penutup tanah *Mucuna* sp. meningkatkan kadar N tanah dari 0,29% menjadi 0,35% dan C-organik tanah dari 1,45% menjadi 2,13%, serta berdampak pada hasil biji dan efisiensi produktivitas hara N tanaman jagung. Tanpa rotasi dengan tanaman penutup tanah, takaran pupuk N yang dibutuhkan 135 kg N/ha dengan hasil jagung 5,7 t/ha dan nisbah produktivitas hara 45,74 kg biji/kg N. Apabila di rotasi dengan tanaman

Tabel 5. Hasil jagung dan nisbah produktivitas hara N pada perlakuan pemupukan di tanah Latosol, Manado, Sulut, 2013.

Pemupukan	Hasil biji (t/ha)	Produktivitas hara N (kg biji/kg N)
150:30:45 (N:P ₂ O ₅ :K ₂ O)		
NPK	12,06	80,4
NK (-P)	10,49	69,9
NP (-K)	10,22	68,1
PK (-N)	9,14	-
150:60:45 (N:P ₂ O ₅ :K ₂ O)		
NPK	11,43	76,2
NK (-P)	10,79	71,9
NP (-K)	10,39	69,3
PK (-N)	8,89	-

Sumber: Syafuruddin (2013).

penutup tanah, tanaman jagung hanya membutuhkan pupuk N 90 kg/ha dengan hasil 7,44 t/ha dan produktivitas hara 82,67 kg biji/kg N (Tabel 6).

Tanaman jagung yang ditanam secara rotasi dengan kacang-kacangan mempunyai total serapan, efisiensi serapan, dan efisiensi penggunaan N lebih tinggi 13–35%, mengurangi takaran pupuk N anorganik 68 kg N/ha, dan hasil biji lebih tinggi 20% dibanding jagung yang ditanam secara terus-menerus selama 4 tahun (Ma *et al.* 2003). Hasil jagung pada sistem tanam rotasi jagung dengan kacang tanah atau kedelai lebih tinggi dibanding penanaman jagung tanpa rotasi (Riedell *et al.* 2009; Zingore 2011). Jagung yang ditanam setelah kedelai atau kacang tunggak mempunyai total serapan N 23–36,1% dan produktivitas hara N 21,8–43,2% lebih tinggi dibanding jagung yang ditanam setelah lahan diberakan maupun lahan yang sebelumnya ditanami jagung (Tabel 7). Pemberian N kurang dari takaran optimal pada tanaman jagung yang dirotasi dengan kedelai tidak menyebabkan klorosis, sedangkan tanaman jagung yang tidak dirotasi menunjukkan gejala klorosis. Dengan demikian, rekomendasi takaran pupuk pada sistem tanam rotasi jagung dengan tanaman kacang-kacangan perlu mempertimbangkan sumbangan N dari tanaman kacang-kacangan. Kacang-kacangan yang ditanam sebelum jagung dapat menyumbang 16–19 kg N/ha bagi pertanaman jagung berikutnya (Rahim *et al.* 1994; Marandu *et al.* 2013).

Pengelolaan N-organik, baik dari pupuk organik maupun tanaman kacang-kacangan, berdampak positif terhadap penurunan emisi N_2O . Hal ini karena adanya tambahan N sehingga mengurangi pemberian pupuk N-anorganik. Penggunaan pupuk kandang menghasilkan emisi N_2O lebih rendah dibanding pupuk mineral (Shimizu *et al.* 2013). Tumpang sari tanaman jagung dengan kedelai menurunkan emisi N_2O antara 25,6–45,8% dibanding monokultur jagung (Huang *et al.* 2013). Tumpang sari

Tabel 6. Hasil dan produktivitas hara N tanaman jagung yang ditanam tanpa rotasi atau rotasi dengan tanaman penutup tanah.

Takaran N kg/ha	Hasil (t/ha)		Produktivitas hara N (kg biji/kg N)	
	Tanpa rotasi	Rotasi	Tanpa rotasi	Rotasi
0	3,82	6,04		
45	4,18	7,18	92,89	159,56
90	5,25	7,44	58,31	82,67
135	5,77	6,16	45,74	45,63

Sumber: Subaedah (2005).

Tabel 7. Serapan N dan produktivitas hara N tanaman jagung dalam sistem rotasi tanaman.

Rotasi	Serapan N (kg/ha)	Produktivitas hara N (kg biji/kg N)
Bera-jagung	61	44,0
Jagung-jagung	61	41,1
Kedelai-jagung	83	59,0
Kacang tunggak-jagung	75	53,6

Sumber: Yusuf *et al.* (2009).

jagung dengan kacang-kacangan efektif mengurangi pencucian nitrogen dibanding jagung monokultur. Tumpang sari jagung-kacang tanah mengurangi pencucian nitrat 20,9–174,8, dan tumpang sari jagung-kedelai 30,6–82,4 kg/ha (Nie *et al.* 2012). Rotasi tanaman jagung dengan kedelai menghasilkan emisi N_2O 50% lebih rendah dibanding penanaman jagung terus-menerus (Venterea dan Coulter 2015).

MEMINIMALKAN DAMPAK LINGKUNGAN AKIBAT PEMUPUKAN N

Manajemen pemupukan yang baik tidak hanya bertujuan untuk mencapai hasil yang tinggi, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan sehingga hasil yang diperoleh akan berkelanjutan. Untuk mengurangi dampak lingkungan akibat pemupukan N diperlukan manajemen pemupukan N yang disesuaikan dengan takaran, sumber/jenis pupuk, waktu pemberian dan penempatan pupuk serta pengelolaan bahan organik, rotasi tanaman dan pengelolaan residu tanaman (Cassman *et al.* 2002; Parkin dan Kaspar 2006).

Pemupukan N meningkatkan ketersediaan mineral N dalam tanah (NO_3^- dan NH_4^+), yang merupakan substrat untuk proses nitrifikasi dan denitrifikasi dan pada gilirannya akan memproduksi N_2O dalam tanah yang akan menjadi emisi. Pemupukan N berkorelasi positif dengan emisi gas N_2O . Oleh karena itu, emisi gas rumah kaca akibat pemupukan N dapat dikurangi dengan pemberian pupuk N secara optimal (Liu *et al.* 2012). Rekomendasi

pemupukan N berdasarkan hasil analisis tanah dan tanaman dapat mengurangi emisi gas N_2O sebesar 7% pada lahan yang berpotensi hasil tinggi dan 38% pada lahan yang berpotensi hasil rendah (Sehy *et al.* 2003). Keseimbangan pemupukan N dengan hara lain, terutama hara P, meningkatkan hasil jagung dan mengurangi emisi gas N_2O (Qiao *et al.* 2014).

Mengatur ketersediaan hara N secara perlahan dan berkesinambungan selama pertumbuhan tanaman merupakan salah satu strategi agar pupuk lebih banyak diserap oleh tanaman dibanding hilang melalui denitrifikasi dan penguapan. Penyediaan hara tanaman secara perlahan dapat dilakukan dengan menggunakan bahan penghambat nitrifikasi, pupuk yang melepas hara secara perlahan (*controlled release*), memperbesar ukur pupuk (urea) atau memberikan pupuk secara bertahap.

Pada dasarnya nitrifikasi diperlukan tanaman karena menyebabkan hara menjadi tersedia bagi tanaman. Namun, jika laju nitrifikasi lebih cepat daripada penyerapan oleh tanaman maka sebagian hara N akan menguap. Oleh karena itu, penggunaan penghambat/inhibitor nitrifikasi atau pupuk lepas lambat dapat mengatur pelepasan hara bagi tanaman. Penggunaan inhibitor nitrifikasi atau pupuk lepas lambat dapat mengurangi emisi N_2O (Hu *et al.* 2013). Penggunaan urea yang disertai dengan inhibitor nitrifikasi *S. benzyliothiuronium butanoate* atau *S. benzyliothiuronium fluroate* meningkatkan hasil tanaman, mengurangi emisi N_2O 4–5%, dan mengurangi potensi pemanasan global 8,9–19,5% dibandingkan penggunaan urea saja (Bhatia *et al.* 2010). Peningkatan ukuran pupuk urea menjadi 1 g/butir dapat memperlambat nitrifikasi 30% dibanding urea biasa sampai 8 minggu setelah aplikasi (Goose dan Johnson 1993). Pemberian pupuk secara bertahap dari takaran pupuk yang akan diberikan dan disesuaikan dengan periode tumbuh dan tingkat kebutuhan tanaman meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk N dan mengurangi kehilangan pupuk yang berimplikasi mengurangi potensi pemanasan global (Tan *et al.* 2009).

Sumber/bentuk pupuk juga berpengaruh terhadap emisi N_2O . Oleh karena itu, pemilihan sumber pupuk sangat penting untuk mengurangi dampak lingkungan. Secara umum pupuk amonia meningkatkan emisi N_2O lebih

lambat daripada pupuk nitrat karena nitrat dapat langsung didenitrifikasi, sementara amonia harus melalui nitrifikasi sebelum denitrifikasi. Hasil penelitian Zanatta *et al.* (2010) menunjukkan emisi N_2O dan total emisi pada tanaman jagung secara relatif adalah pupuk amonium nitrat > kalsium nitrat > uran (kombinasi urea dan amonium nitrat) > amonium sulfat > urea > urre + inhibitor urease > pupuk N lepas lambat.

Penempatan pupuk sintetis ke dalam tanah dan dekat zona serapan perakaran mengurangi kehilangan N dan meningkatkan penggunaan N sehingga mengurangi emisi gas N_2O (CAST 2004). Injeksi larutan urea amonium nitrat pada tanah lempung berliat pada kedalaman 10 dan 15 cm menghasilkan emisi N_2O 38–70% lebih rendah dibanding pada kedalaman 5 cm atau aplikasi di permukaan tanah (Liu *et al.* 2006). Urea yang diletakkan di atas permukaan tanah akan menguap 15–20% dalam bentuk NH_3 dalam waktu seminggu setelah aplikasi (Nielsen 2006).

Penentuan rekomendasi pemupukan N perlu mempertimbangkan biaya kerugian lingkungan akibat pemupukan N. Hasil penelitian Wang *et al.* (2014b) menunjukkan bahwa dengan mempertimbangkan biaya kerusakan lingkungan akibat pemupukan N, pemupukan tanaman jagung dengan takaran N berdasarkan prinsip ekologi (takaran dengan mempertimbangkan dampak lingkungan) lebih rendah dibanding hanya berdasarkan prinsip agronomis dan ekonomi, dengan takaran masing-masing 171, 289, dan 237 kgN/ha. Penggunaan takaran N berdasarkan prinsip ekologi meningkatkan keuntungan bersih sebesar 53%, menurunkan total biaya lingkungan sebesar 46%, dan mengurangi kehilangan N reaktif (emisi N_2O , pencucian N, dan penguapan NH_3) sebanyak 51% dibandingkan dengan manajemen N berdasarkan prinsip agronomis. Jika dibandingkan dengan pemupukan N berdasarkan prinsip ekonomi, pemupukan N secara ekologis meningkatkan keuntungan bersih 12%, menurunkan total biaya lingkungan 31%, dan mengurangi kehilangan N reaktif 31%.

Di masa mendatang, diperlukan kebijakan pemerintah yang berpihak kepada petani yang mengurangi penggunaan pupuk N-anorganik dan mempertimbangkan dampak lingkungan dalam mengelola tanaman jagung. Kebijakan pengalihan subsidi pupuk urea ke insentif lingkungan bagi petani yang menggunakan pupuk N-organik, melakukan rotasi tanaman jagung-kacang-kacangan, atau sistem tanam tumpang sari jagung dengan kacang-kacangan menjadi alternatif untuk dipertimbangkan.

KESIMPULAN

Produktivitas tanaman jagung di Indonesia masih rendah, yaitu rata-rata 4,84 t/ha. Sebagian besar lahan pengembangan jagung kekurangan hara N sehingga

diperlukan pemupukan N. Pemupukan N berkontribusi 30–50% terhadap peningkatan hasil jagung.

Efisiensi penggunaan N pada tanaman jagung kurang dari 50% dari total N yang diberikan karena N hilang dari sistem tanaman-tanah melalui denitrifikasi, pencucian, dan penguapan. Kehilangan N dalam bentuk emisi NH_3 , N_2O , dan NO menurunkan kualitas udara troposfer, menurunkan ozon pada lapisan stratosfer, dan berkontribusi terhadap radiasi ultra violet karena N_2O merupakan salah satu penyebab utama efek rumah kaca. NO_3^- yang tercuci mencemari sumber daya air tanah, menurunkan kualitas air sehingga menurunkan keanekaragaman hayati pada perairan karena eutrofikasi.

Penggunaan varietas jagung hibrida dengan peluang hasil 9–13 t/ha dan pengelolaan tanaman optimal memerlukan pemupukan 160–260 kg N/ha untuk tanah dengan kadar C-organik rendah, 133–233 kg N/ha untuk tanah dengan kandungan C-organik sedang, dan 105–205 kg N/ha untuk tanah dengan kandungan C-organik tinggi. Untuk memperoleh hasil jagung yang optimal dengan kehilangan N dan dampak negatif terhadap lingkungan yang rendah, pemupukan N harus dilakukan dengan memadukan jumlah, waktu, dan cara pemberian yang tepat sesuai dengan kebutuhan tanaman, kondisi lahan dan kesuburan tanah; menetapkan status hara tanah secara akurat; serta mempertimbangkan faktor pembatas hara lainnya (terutama P dan K). Pengelolaan bahan organik berupa residu tanaman, penggunaan pupuk organik *in situ*, serta rotasi atau tumpang sari jagung dengan tanaman kacang-kacangan selanjutnya menjadi salah satu pertimbangan utama dalam manajemen pemupukan N untuk meningkatkan efisiensi penggunaan N dan hasil jagung secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, M.K., M.M. Tahir, and N. Rahim. 2013. Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir-Pakistan. *Geoderma* 195: 87–95.
- Afifi, M.H.M., R.Kh.M. Khalifa, and C.Y. El-Dewiny. 2011. Urea foliar application as a partial substitution of soil-applied nitrogen fertilization for some maize cultivars grown in newly cultivated soil. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 5(7): 824–832.
- Ali, K., F. Munsif, M. Zubair, H. Akbar, Z. Husain, M. Shahid, I. Uddin, and N. Khan. 2011. Management of organic and inorganic nitrogen for different maize varieties. *Sharhad J. Agric.* 27(4): 525–529.
- Angadi, V.V., S. Rajakumara, Ganajaxi, A.Y. Hugar, B. Basavaraj, and S.V. Subbaiah. 2005. Determining the leaf color chart threshold value for nitrogen management in rainfed rice. *IRRN* 27: 34–35.
- Aqil, M. 2013. Deskripsi Varietas Jagung, Sorgum dan Gandum. Balai Penelitian Tanaman Serealia, Maros. 54 hlm.
- Bender, R.R., J.W. Haegerle, M.T. Ruffo, and F.E. Below. 2013. Modern corn hybrids, Nutrient uptake patterns. *Better Crops With Plant Food* 97(1): 7–10.

- Bhatia, A., S. Sasmal, N. Jain, H. Pathak, R. Kumar, and A. Singh. 2010. Mitigating nitrous oxide emission from soil under conventional and no-tillage in wheat using nitrification inhibitors. *Agric. Ecosyst. Environ.* 136(3–4): 245–253.
- Binder, D.L., D.H. Sander, and D.T. Walters. 2000. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. *Agron. J.* 92: 1228–1236.
- BPS (Biro Pusat Statistik). 2014. Data pertanian dan pertambangan. http://www.bps.go.id/tnmn_pgn.php. [18 Oktober 2014].
- Butzen, S. 2014. Nitrogen application timing in corn production. <https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/library/template.CONTENT/guid.1BF7B8F5-99E6-DC1E-0D45-9F5D238A8761>. [2 May 2014].
- Cai, G.X., D.L. Chen, H. Ding, A. Pacholski, X.H. Fan, and Z.L. Zhu. 2002. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China Plain. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 63: 187–195.
- Cassman, K.G., A. Dobermann, and D.T. Walters. 2002. Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: J. Hum. Environ.* 31: 132–138.
- CAST (Council for Agricultural Science and Technology). 2004. *Climate Change and Greenhouse Gas Mitigation: Challenges and opportunities for agriculture*. Paustian K, and Babcock B (Coauthors). Report 1412. 210 pp.
- Chandra, K. 2005. *Organic Manure*. Regional Centre of Organic Farming, Bangalore, India. 46 pp.
- Cheema, M.A., W. Farhad, M.F. Saleem, H.Z. Khan, A. Munir, M.A. Wahid, F. Rasul, and H.M. Hammad. 2010. Nitrogen management strategies for sustainable maize production. *Crop Environ.* 1(1): 49–52.
- Eche, N.M., E.N.O. Iwuafor, I.Y. Amapui, and M.V. Bruns. 2013. Effect of application of organic and mineral soil amendment in continuous cropping system for 10 years on chemical and physical properties of an Alfisol in Northern Guinea savanna zone. *Inter. J. Agric. Policy Res.* 1(4): 116–123.
- Effendi, R., Suwardi, Syafruddin, dan Zubachtirodin. 2012. Penentuan takaran pupuk nitrogen pada tanaman jagung hibrida berdasarkan klorofil meter dan bagan warna daun. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 31(1): 27–34.
- EPA. 2014. Nitrous Oxide Emissions. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/>. [2 May 2014].
- Erisman, J.W., M.A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont, and W. Winiwarter. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat. Geosci.* 1: 636–639.
- Fageria, N.K., M.P.B. Filho, A. Moreira, and C.M. Guimaraes. 2009. Foliar fertilization of crop plants. *J. Plant Nutr.* 32: 1044–1064.
- Fields, S. 2014. Global nitrogen: Cycling out of control. *Environ. Health Perspect.* 112(10): 556–563.
- Furuya, S. 1987. Growth diagnosis of rice plants by means of leaf color. *Jpn. Agric. Res. Q.* 20: 145–153.
- Goose, R.J. and B.E. Johnson. 1993. Effect of urea pellet size and dicyandiamide on residual ammonium in field microplots. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 24: 397–389.
- Hu, X.K., F. Su, X.T. Ju, B. Gao, O. Oenema, P. Christie, B.X. Huang, R.F. Jiang, and F.S. Zhang. 2013. Greenhouse gas emissions from a wheat–maize double cropping system with different nitrogen fertilization regimes. *Environ. Pollution* 176: 198–207.
- Huang, J.X., Y.Q. Chen, P. Sui, S.W. Nie, and W.S. Gao. 2013. Soil nitrous oxide emissions under maize–legume intercropping system in the North China Plain. *J. Integrative Agric. Adv. Online Publ.* 13: 2095–3119.
- IPNI dan Badan Litbang Pertanian. 2009. *Petunjuk Menggunakan Perangkat Lunak Pemupukan Jagung Spesifik Lokasi*. 31 hlm.
- IRRI. 1996. Use of leaf color chart for N management in rice. *Crop Resour. Manag. Network Technol. Brief* 2. IRRI, Manila, Philippines.
- Jat, M.L., T. Satyanarayana, K. Majumdar, C.M. Parihar, S.L. Jat, J.P. Tatarwal, R.K. Jat, and Y.S. Saharawat. 2013. Fertilizer best management practices for maize systems. *Indian J. Fert.* 9(4): 80–94.
- Jones, C., K. Olson–Rutz, and C.P. Dinkins. 2011. Nutrient uptake timing by crops to assist with fertilizing decisions. *Montana State University. Extension.* 8 pp.
- Kheirabadi, H., S. Shahsavani, M. Basafa, and S. Gharanjik. 2012. The amount and timing of foliar urea application effect on maize and forage sorghum proteins. *J. Chem. Health Risks* 2(3): 9–11.
- Leikam, D.F., R.Y.E. Lamond, and D. Mengel. 2003. *Soil Test Interpretations and Fertilizer Recommendations*. Kansas State University Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service. 20 pp.
- Liu, X., A. Mosier, A. Halvorson, and F. Zhang. 2006. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from a clay loam soil. *Plant Soil* 280(1): 177–188.
- Liu, C., K.Wang, and X. Zheng. 2012. Responses of N₂O and CH₄ fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat maize cropping system in Northern China. *Biogeosciences* 9: 839–850.
- Ma, B.L., J. Ying, L.M. Dwyer, E.G. Gregorich, and M.J. Morrison. 2003. Crop rotation and soil N amendment effects on maize production in eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.* 83: 483–495.
- Mahmoodi, P. and M. Yarnia. 2011. Estimation of leaf area and some components of yield in corn cultivars affected urea foliar application. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 5(10): 107–113.
- Marandu, A.E.T., E. Semu, J.P. Mrema, and A.S. Nyaki. 2013. Contribution of legume rotations to the nitrogen requirements of a subsequent maize crop on a Rhodic Ferralsol in Tanga, Tanzania. *Tanzania J. Agric. Sci.* 12(1): 23–29.
- Muraoka, T. and A.M.L. Neptune. 1977. Effect of day time on foliar spraying of several levels of nitrogen fertilizer, NPKS solutions and its components, on common bean leaves. *USP-ESALQ-Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) Vol. XXXIV:* 493–496.
- Nie, S.W., A.E. Eneji, Y.Q. Chen, P. Sui, J.X. Huan, and S.H. Huang. 2012. Nitrate leaching from maize intercropping systems with N fertilizer over dose. *J. Integrative Agric.* 11(9): 1555–1565.
- Nielsen, R.L. 2006. N loss mechanisms and nitrogen use efficiency. *Purdue Nitrogen Management Workshops.* 5 p.
- Parkin, T.B. and T.C. Kaspar. 2006. Nitrous oxide emissions from corn–soybean systems in the Midwest. *J. Environ. Qual.* 35(4): 1496–1506.
- Qiao, Y., S. Miao, X. Han, M. Youa, X. Zhu, and W.R. Horwath. 2014. The effect of fertilizer practices on N balance and global warming potential of maize-soybean-wheat rotations in North Eastern China. *Field Crops Res.* 161: 98–106.
- Rahim, A.A., Z. Shamsuddin, and O. Yaacob. 1994. Contribution of nitrogen to growth of maize in legume-maize rotation on limed Ultisols. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.* 17(3): 173–184.
- Rajendran, R., P. Stalin, S. Ramanathan, and R.J. Buresh. 2010. Site-specific nitrogen and potassium management for irrigated rice in the Cauvery Delta (Tamil Nadu, India). *Better Crops–South Asia* 4(1): 7–9.
- Ransom, J. and G.J. Enders. 2014. *Corn growth and management quick guide*. North Dakota State University. 8 pp.
- Riedell, W.E., J.L. Pikul, A.A. Jaradat, and T.E. Schumacher. 2009. Crop rotation and nitrogen input effects on soil fertility, maize mineral nutrition, yield, and seed composition. *Agron. J.* 101(4): 870–879.

- Roberts. T.L. 2008. Improving nutrient use efficiency. *Turk. J. Agric. Forest.* 32: 177–182.
- Roy, R.N., A. Finck, G.J. Blair, and H.L.S. Tandon. 2006. *Plant Nutrition for Food Security: A guide for integrated nutrient management.* FAO, Rome. 38 pp.
- Saenong, S., Syafruddin, dan Subandi. 2005. Penggunaan LCC untuk pemupukan N pada tanaman jagung. Laporan Pengelolaan Hara Spesifik Lokasi (PHSL). Kerja sama Balitsereal dengan Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada. 25 hlm
- Saleem, M.F., M.S. Randhawa, S. Hussain, M.A. Wahid, and S.A. Anjum. 2009. Nitrogen management studies autumn planted maize. *J. Anim. Plant Sci.* 19(3): 138–143.
- Sangoi, L., P.R. Ernani, and P.R. Ferreira da Silva. 2007. Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillage systems in a soil with high organic matter content. *R. Bras. Ci. Solo* 31: 507–517.
- Satyanarayana, T., K. Majumdar, M. Pampolino, A.M. Johnston, M.L. Jat, P. Kuchanur, D. Sreelatha, J.C. Sekhar, Y. Kumar, R. Maheswaran, R. Karthikeyan, A. Velayutahm, Ga. Dheebakaran, N. Sakthivel, S. Vallalkannan, C. Bharathi, T. Sherene, S. Suganya, P. Janaki, R. Baskar, T.H. Ranjith, D. Shivamurthy, Y.R. Aladakatti, D. Chiplonkar, R. Gupta, D.P. Biradar, S. Jeyaraman, and S.G. Patil. 2013. Nutrient expert: A tool to optimize nutrient use and improve productivity of maize. *Better Crops With Plant Food* 97(1): 21–24.
- Scharf, P.C., W.J. Wiebold, and J.A. Lory. 2002. Corn yield response to nitrogen fertilizer timing and deficiency level. *Agron. J.* 94: 435–441.
- Scharf, P.C. and J.A. Lory. 2006. Best management practices for nitrogen fertilizer in Missouri. University of Missouri. Extension Publication. 11 pp.
- Sehy, U., R. Ruser, and J.C. Munch. 2003. Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield site-specific fertilization and soil conditions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 99: 97–111.
- Shahi, V.B., S.K. Dutta, K. Majumdar, T. Satyanarayana, and A. Johnston. 2014. Nutrient expert improves maize yields while balancing fertilizer use. *Better Crops With Plant Food* 98(4): 27–28.
- Shimizu, M., R. Hatano, T. Arita, Y. Kouda, A. Mori, S. Matsuura, M. Niimi, T. Jin, A.R. Desyatkin, O. Kawamura, M. Hojito, and A. Miyata. 2013. The effect of fertilizer and manure application on CH₄ and N₂O emissions from managed grasslands in Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 59(1): 69–86.
- Singh, V., Y. Singh, B. Singh, H.S. Thid, A. Kumar, and M. Vashitha. 2011. Calibration of the leaf colour chart for need based fertilizer nitrogen management in different maize genotypes. *Field Crop* 120: 276–282.
- Subaedah, S. 2005. Pengaruh pengolahan tanah dan pemupukan N pada lahan bekas *cover crop* terhadap pertumbuhan dan produksi jagung di lahan kering. *Dalam* Suyamto, Subandi, Mappganggang, K. Makarim, M.A. Nawir, M.J. Mejaya, S. Saenong, M. Akil, W. Wakman, A. Muis, Zubachtirodin, dan H.A. Dahlan (Ed.) *Prosiding dan Lokakarya Nasional Jagung* 2005. hlm 289–295.
- Subandi, S. Saenong, dan Syafruddin. 2004. Penelitian pengelolaan hara N, P, dan K spesifik lokasi pada tanaman jagung di Indonesia. Laporan Pengelolaan Hara Spesifik Lokasi (PHSL). Kerja sama Balitsereal dengan Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC). 104 hlm.
- Syafruddin, M. Rauf, R.Y. Arvan, dan M. Akil. 2006. Kebutuhan pupuk N, P, dan K tanaman jagung pada tanah Inceptisol Haplusteps. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 25(1): 1–8.
- Syafruddin, S. Saenong, dan Subandi. 2008. Penggunaan bagan warna daun untuk efisiensi pemupukan N pada tanaman jagung. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan* 27(1): 24–31.
- Syafruddin, S. Saenong, dan Subandi. 2009. Strategi pemupukan N pada tanaman jagung. Laporan Pengelolaan Hara Spesifik Lokasi (PHSL). Kerja sama Balitsereal dengan Potash & Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC). 17 hlm.
- Syafruddin. 2012. Pemetaan rekomendasi pemupukan pada tanaman jagung berdasarkan agroekosistem lahan di Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan. Laporan Akhir Penelitian Insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perakayasa Kementerian Ristek. 25 hlm.
- Syafruddin. 2013. Pengembangan jagung yang toleran naungan dan N rendah pada lahan-lahan di antara tanaman perkebunan dengan tingkat produktivitas minimal 7 t/ha. Laporan Hasil Penelitian Insentif Riset Nasional (INSINAS). 52 hlm.
- Tan, I.Y.S., H.M. van Es, J.M. Duxbury, J.J. Melkonian, R.R. Schindelbeck, L.D. Geohring, W.D. Hively, and B.N. Moebius. 2009. Single event nitrous oxide losses under maize production as affected by soil type, tillage, rotation, and fertilization. *Soil and Tillage Res.* 102(1): 19–24.
- Tennakoon, N.A. and S.D.H. Bandara. 2003. Nutrient content of some locally available organic material and their potential as alternative sources of nutrient for coconut. *Cocos* 15: 23–30.
- Venterea, R.T. and J.A. Coulter. 2015. Split application of urea does not decrease and may increase nitrous oxide emissions in rainfed corn. *Agron. J.* 107: 317–348.
- Wahid, A.S. 2003. Peningkatan efisiensi pupuk nitrogen pada padi sawah dengan bagan warna daun. *J. Litbang Pert.* 22(4): 156–161.
- Wang, G., X. Chen, Z. Cui, S. Yue, and F. Zhang. 2014a. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China. *Agric. Ecosyst. Environ.* 197: 293–300.
- Wang G.L., Y.L. Ye, X.P. Chen, and Z.L. Cui. 2014b. Determining the optimal nitrogen rate for summer maize in China by integrating agronomic, economic, and environmental aspects. *Biogeosciences* 11: 3031–3041.
- Witt, C., J.M. Pasuquin, M.F. Pampolino, R.J. Buresh, and A. Dobermann. 2009. A manual for the development and participatory evaluation of site-specific nutrient management for maize in tropical, favorable environments. International Plant Nutrition Institute, Penang, Malaysia. 30 pp. ><http://seap.ipni.net>< [2 May 2014].
- Xiaobin, W., Dianxiong, and Z. Jingqing. 2001. Land application of organic and inorganic fertilizer for corn in dryland farming region of North China. *Proceedings of Sustaining the Global Farm.* pp. 419–452.
- Xu, X., P. He, S. Qiu, M.F. Pampolino, S. Zhao, A.M. Johnston, and W. Zhou. 2014. Estimating a new approach of fertilizer recommendation across smallholder farms in China. *Field Crops Res.* 163: 10–17.
- Yusuf, A.A., E.N.O. Iwuafor, R.C. Abaidoo, O.O. Olufajo, and N. Sanginga. 2009. Effect of crop rotation and nitrogen fertilization on yield and nitrogen efficiency in maize in the northern Guinea savanna of Nigeria. *Afr. J. Agric. Res.* 4(10): 913–921.
- Zaini, Z. 2011. Vaidasi “Nutrien Manager” sebagai alat penentuan pemupukan jagung hibrida spesifik lokasi. Laporan Program Insentif Riset. 32 hlm.
- Zanatta, J.A., C. Bayer, F.C.B. Vieira, J. Gomes, and M. Tomazi. 2010. Nitrous oxide and methane fluxes in South Brazilian gleysol as affected by nitrogen fertilizers. *Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa* 34(5): 1653–1665.

- Zhou, M. and K. Butterbach-Bahl 2013. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems. Springer Science, Published online. 15 pp.
- Zingore, S. 2011. Maize productivity and response to fertilizer use as affected by soil fertility variability, manure application, and cropping system. *Better Crops With Plant Food* 1: 4–6.
- Zubachtirodin. 2010. Peningkatan hasil jagung melalui pendekatan PTT dalam konsep IP380 pada lahan sawah dan lahan kering (tingkat hasil ≥ 32 t/ha/tahun). Laporan Akhir Rencana Penelitian Tingkat Peneliti (RPTP) Tahun 2012. Balai Penelitian Tanaman Serealia, Maros. 63 hlm.
- Zubachtirodin. 2011. Peningkatan hasil jagung melalui pendekatan PTT dalam konsep IP380 pada lahan sawah dan lahan kering (tingkat hasil ≥ 32 t/ha/tahun). Laporan Akhir Rencana Penelitian Tingkat Peneliti (RPTP) Tahun 2012. Balai Penelitian Tanaman Serealia, Maros. 65 hlm.