

TRANSFER MASSA PADA PUPUK LEPAS LAMBAT



Alit Istiani | Yuli Ristianingsih | Indriana Lestari

Lembaga Penelitian & Pengabdian kepada Masyarakat
Universitas Pembangunan Nasional "Vetera Yogyakarta"

TRANSFER MASSA PADA PUPUK LEPAS LAMBAT

ALIT ISTIANI, S.T., M.Eng.
YULI RISTIANINGSIH, ST., M.Eng.
INDRIANA LESTARI, S.T., M.T.



UPN VETERAN YOGYAKARTA

Transfer Massa Pada Pupuk Lepas Lambat

Alit Istiani, S.T., M.Eng.

Yuli Ristianingsih, S.T., M.Eng.

Indriana Lestari, S.T., M.T.

Copyright © Alit Istiani, S.T., M.Eng., Yuli Ristianingsih, ST.,
M.E.ng., Indriana Lestari, S.T., M.T.
2022

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari penulis.

Cetakan pertama, 2022

ISBN:

Diterbitkan oleh: Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat UPN Veteran Yogyakarta Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Condong Catur, Yogyakarta, 55283 Telp. (0274) 486188, 486733, fax. (0274) 486400

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbilalamiin. Segala Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT karena berkat rahmat-Nya kami dapat menyelesaikan buku ajar dengan judul “Transfer massa pada Pupuk Lepas Lambat”. Buku ajar ini merupakan salah satu luaran hasil penelitian serta merupakan tugas dan tanggungjawab seorang dosen dalam Tridharma Perguruan Tinggi. Pada buku ajar ini dijabarkan beberapa studi mengenai transfer massa nutrisi dari pupuk lepas lambat. Pembaca diharapkan memperoleh pengetahuan dan gambaran mekanisme pelepasan nutrisi pupuk lepas lambat serta dapat mengkuantifikasi dengan pemodelan matematis maupun persamaan empirik.

Penyelesaian penyusunan buku ajar ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak atas segala dukungan, bantuan, masukan dan pengarahan yang telah diberikan kepada penulis.

Demikian buku ajar ini kami susun, semoga dapat memberikan manfaat bagi pembaca. Kami menyadari bahwa buku ajar ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena

itu, kritik dan saran yang membangun tetap kami harapkan untuk lebih menyempurnakan buku ini. Akhir kata, penulis mengucapkan terimakasih dan selamat membaca.

Yogyakarta, September 2022

Penulis

DAFTAR ISI

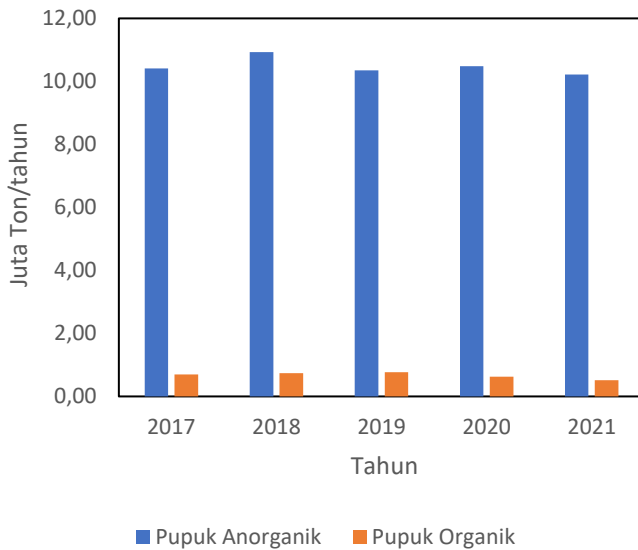
KATA PENGANTAR.....	4
DAFTAR GAMBAR.....	Error! Bookmark not defined.
DAFTAR TABEL	Error! Bookmark not defined.
BAB I. PENDAHULUAN	8
A. Quick Release Fertilizer.....	9
B. Profile Pelepasan Nutrisi pada Pupuk QRF	13
C. Profile Kebutuhan Pupuk pada Tanaman	14
BAB II. PUPUK LEPAS LAMBAT	18
A. Definisi Pupuk Lepas Lambat	19
B. Klasifikasi Pupuk Lepas Lambat.....	20
C. Pembuatan Pupuk Lepas Lambat.....	22
D. Kelebihan Pupuk Lepas Lambat	25
E. Mekanisme Pelepasan Nutrisi pada Pupuk Lepas Lambat	27
Bab III. TRANSFER MASSA pada PUPUK LEPAS LAMBAT.....	31
A. Pemodelan Matematis Pelepasan Nutrisi pada Pupuk Lepas Lambat dengan Pelapis (<i>Coating</i>)	31

B. Persamaan Empiris Pelepasan Nutrisi Pada Pupuk Lepas Lambat	43
BABIV. BIOMASSA SEBAGAI PUPUK ORGANIK LEPAS LAMBAT	49
A. Limbah Bunga Jantan Kelapa Sawit Pasca <i>Anthesis</i> ..	50
B. Kotoran Ayam	53
DAFTAR PUSTAKA	55

BAB I. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara agraris dimana sector pertanian dan perkebunan memegang peranan penting dalam perkembangan perekonomian di Indonesia. Kegiatan tersebut tidak terlepas dari penggunaan pupuk sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan tanaman. Data Asosiasi Produsen Pupuk Indonesia yang ditunjukkan pada Gambar 1.1 memperlihatkan bahwa permintaan pupuk di Indonesia sangat tinggi yaitu rata-rata mencapai 10.48 juta ton/tahun untuk pupuk anorganik dan 0.67 juta ton/tahun untuk pupuk organik (APPI, 2022)

Pupuk yang digunakan petani Indonesia adalah pupuk konvensional, dimana termasuk jenis pupuk *Quick Release Fertilizer (QRF)*. Pupuk ini memiliki efisiensi yang rendah dan menimbulkan beberapa dampak negatif bagi lingkungan sehingga mendorong dikembangkannya berbagai jenis pupuk lepas lambat (*Controlled Release Fertilizer dan Slow Release Fertilizer*) baik organik maupun anorganik



Gambar 1.1. Data Konsumsi Pupuk di Indonesia (APPI, 2022)

A. Quick Release Fertilizer

Quick Release Fertilizer adalah jenis pupuk yang melepaskan nutrisinya ke tanah dengan periode waktu yang sangat cepat sehingga tidak mampu memenuhi kebutuhan nutrisi sepanjang pertumbuhan tanaman. Akibatnya efisiensi dari pemupukan yang telah dilakukan atau *Nutrient Use Efficiency (NUE)* masih sangat rendah (Shaviv, 2001; Trenkel, 1997). Hal ini pun sesuai dengan pernyataan Bøckman & Olf (1998) yang mengatakan bahwa pemupukan pada tanaman

padi hanya memiliki efisiensi sekitar 30-40% dari nitrogen yang diberikan. Menurut Smil (1999) dari 80 Tg nitrogen/tahun yang digunakan, sekitar 26 Tg nitrogen/tahun - 60 Tg nitrogen /tahun hilang ke atmosfer dan sekitar 32 Tg nitrogen/tahun - 45 Tg nitrogen /tahun hilang ke tanah atau ke air melalui *leaching* atau *run off*.

Hilangnya nutrisi pada QRF dapat terjadi melalui hal-hal berikut ini

1. *Nitrogen Leaching*

Setelah diaplikasikan ke tanah, sebagian besar nitrogen dari pupuk yang dilepaskan ke tanah akan dioksidasi menjadi nitrat oleh mikroba, akibatnya nitrat ini akan ikut terbawa air (*leaching*) atau berpindah dari daerah akar tanaman ke permukaan tanah atau ikut dalam aliran air tanah (Smith, 1990). Hal ini sangat tidak baik untuk lingkungan, karena kadar nitrat yang tinggi dalam air dapat merusak lingkungan dan secara tidak langsung dapat mengganggu kesehatan manusia. Konsentrasi nitrat yang tinggi dan masuk ke dalam tubuh dapat menyebabkan berbagai penyakit

seperti kanker lambung, gondok, cacat kelahiran, penyakit jantung (Black, 1989), dan kelainan pada pada calon bayi dimana haemoglobin yang terbentuk tidak mampu untuk mengikat oksigen (*methaemoglobinemia*) (Newbould, 1989). Melihat dampak tingginya konsentrasi nitrat di air terhadap kesehatan yang sangat berbahaya, pemerintah pun menetapkan nilai ambang batas nitrat yang cukup kecil yaitu sebesar 0,008 mg/L (Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup no.51 tahun 2004)

2. Penguapan amonia

Nitrogen pada pupuk dapat pula berada dalam bentuk senyawa amonia. Penguapan dari senyawa amonia tersebut menjadi salah satu penyebab hilangnya nitrogen pada pupuk (Trenkel, 2010). Emisi amonia ini akan mampu merusak vegetasi pada ekosistem sekitar (Newbould, 1989). Selain itu sejumlah amonia pun bisa teroksidasi menjadi nitrat dan *leaching* bersama air tanah (Trenkel, 2010).

3. Emisi Nitrogen oksida (N₂O dan NO)

N₂O dan NO ini terbentuk saat proses nitrifikasi amonia dan juga saat denitrifikasi nitrat (Shaviv, 2001). Emisi gas N₂O dan NO ini dapat menyumbang sebagai penyebab *global warming* dan mampu merusak lapisan ozon.

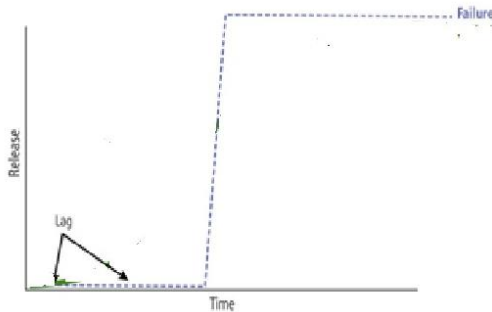
4. Eutrofikasi

Selain nitrogen, kandungan nutrisi dalam pupuk adalah kalium dan pospat. Pelepasan pospat ke dalam tanah yang begitu cepat akan meningkatkan konsentrasi pospat di dalam tanah yang kemudian akan terbawa oleh aliran air dan menyebabkan akumulasi pospat pada ekosistem air. Banyaknya kandungan pospat di dalam air tersebut mampu mempercepat eutrofikasi, yaitu meningkatnya jumlah *algae biomass* sehingga menyebabkan kurangnya oksigen di dalam air. Kurangnya oksigen ini dapat mengancam berbagai kehidupan di dalam air (Shaviv, 2001).

QRF selain memberikan dampak yang buruk bagi lingkungan dan kesehatan juga memberikan dampak kerugian materi kepada para petani. Hal ini karena aplikasi QRF harus dilakukan beberapa kali dalam satu periode tanam (Zhang et al., 2018) sehingga biaya operasional pun tinggi.

B. Profile Pelepasan Nutrisi pada Pupuk QRF

Pupuk QRF akan melepaskan nutrisinya ke tanah dengan periode waktu yang sangat cepat. Hal ini karena saat diaplikasikan ke dalam tanah, air yang berada di dalam tanah akan masuk melalui pori-pori pupuk. Air yang berhasil masuk ke dalam inti (*core*) pupuk akan melarutkan nutrisi yang berada di inti. Akibatnya, akan timbul kenaikan tekanan osmotik yang menyebabkan granul pun menjadi lebih besar. Komposit pupuk tidak kuat menahan tekanan osmotik yang terjadi sehingga semua nutrisi pada pupuk akan terlepas ke lingkungan. Kondisi ini disebut sebagai "*failure mechanism*" atau "*catastrophic release*". Ilustrasi pelepasan nutrisi ini ditunjukkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2. Pelepasan Nutrisi Pada Pupuk Quick Release Fertilizer (pupuk konvensional)

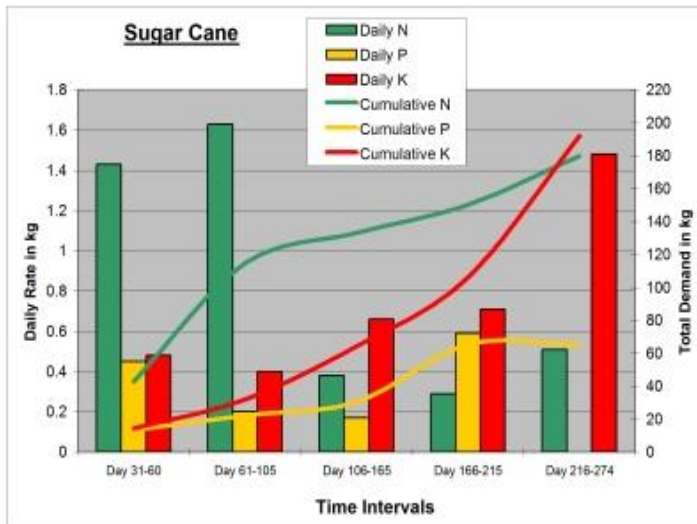
C. Profile Kebutuhan Pupuk pada Tanaman

Setiap tanaman memiliki kebutuhan nutrisi yang berbeda-beda pada setiap periode pertumbuhannya. Efisiensi pemupukan yang tinggi dapat diperoleh jika nutrisi yang diberikan sesuai dengan kebutuhan tanaman, serta dapat diserap dengan baik oleh tanaman. Jika tidak demikian, maka nutrisi yang keluar dari pupuk akan hilang ke lingkungan dan menyebabkan berbagai dampak negatif untuk lingkungan. Oleh karena itu, beberapa peneliti mengumpulkan data profile kebutuhan nutrisi pada berbagai tumbuhan. Gambar adalah contoh kebutuhan nutrisi pupuk beberapa komoditi yang

berkembang

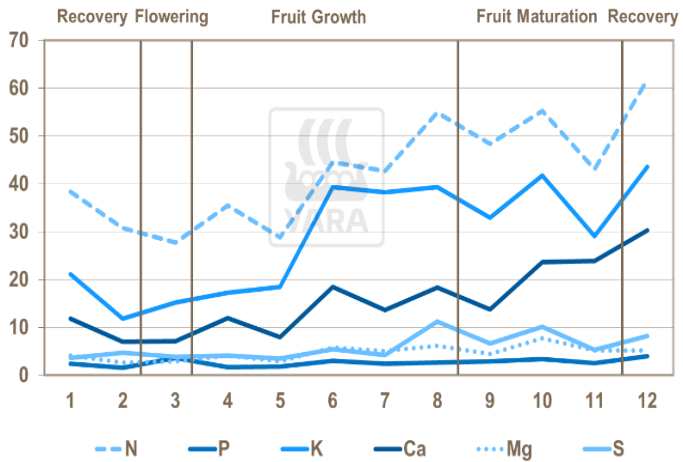
di

Indonesia

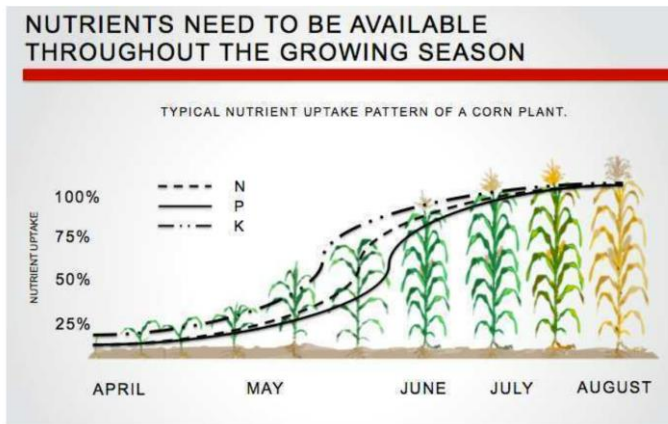


Gambar 1.3. Kebutuhan Unsur Hara pada Tanaman Tebu Selama Masa Pertumbuhan (Haifa Chemicals, 2014)

Nutrient Uptake g/plant



Gambar 1.4. Kebutuhan Unsur Hara pada Tanaman Kopi Selama Masa Pertumbuhan (Cifuentes, 2004).



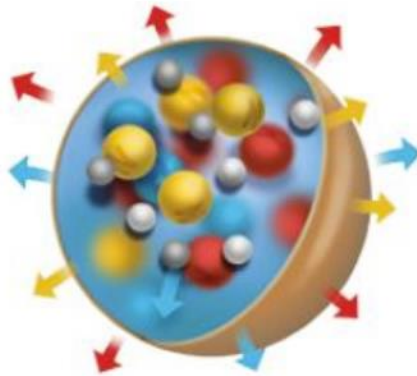
Gambar 1.5. Kebutuhan Nitrogen (N), Posphat (P) dan Kalium (K) pada Tanaman Jagung Selama Masa Pertumbuhan (<https://inthefurrow.com>)

Tabel 1.1 Kebutuhan Unsur Hara Tanaman Coklat Selama Masa Pertumbuhan (Thong dan NG, 1978).

Umur tanaman (bulan)	Kebutuhan Unsur Hara (kg/ha), 1075 pohon/hektar					
	N	P	K	Ca	Mn	Zn
5-12	2,4	1,4	2,9	3,2	1,8	0,04
28	128	31	181	160	113	3,9
39	212	53	385	196	188	7,1
50-87	438	110	760	522	214	6,1

BAB II. PUPUK LEPAS LAMBAT

Rendahnya efisiensi pada pupuk konvensional atau QRF mendorong peneliti untuk mengembangkan pupuk yang melepaskan nutrisinya sesuai dengan kebutuhan nutrisi pada tumbuhan. Jenis pupuk tersebut adalah pupuk lepas lambat atau dikenal dalam istilah Bahasa Inggris sebagai *Slow Release Fertilizer (SRF)* dan *Controlled Release Fertilizer (CRF)*



Gambar 2.1. Ilustrasi Pupuk Lepas Lambat
(<https://www.haifa-group.com/controlled-release-fertilizer>)

A. Definisi Pupuk Lepas Lambat

Menurut *Association of American Plant Food Control Officials*, pupuk lepas lambat adalah pupuk yang menyediakan nutrisi bagi tanaman, tetapi tidak melepaskan secara langsung nutrisinya dan akan menyediakan nutrisi untuk tanaman dalam periode waktu yang lebih lama dibandingkan dengan pupuk konvensional (*Quick Release Fertilizer*) atau jenis pupuk yang *dicoating*/dilapisi atau dienkapsulasi dengan senyawa organik atau anorganik dengan tujuan untuk mengontrol laju, pola, dan durasi dari pelepasan/ *release* nutrisi pupuk (Shaviv, 2001; Trenkel, 2010). Menurut beberapa literatur istilah untuk pupuk lepas lambat ini ada dua jenis yaitu *Slow Release Fertilizer (SRF)* dan *Controlled Release Fertilizer (CRF)* tetapi *Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO)* mengatakan bahwa tidak ada perbedaan untuk kedua pupuk tersebut. Hal tersebut berbeda dengan pernyataan (Zhang dkk., 2005) dan (Shaviv, 2001) yang membedakan SRF dan CRF. Menurut mereka CRF adalah pupuk lepas lambat yang pelepasan nutrisinya lebih lama dari pupuk konvensional dan memiliki laju, pola, dan durasi pelepasan nutrisi yang diketahui dan dikontrol selama proses persiapan, sedangkan untuk SRF dikatakan sebagai pupuk

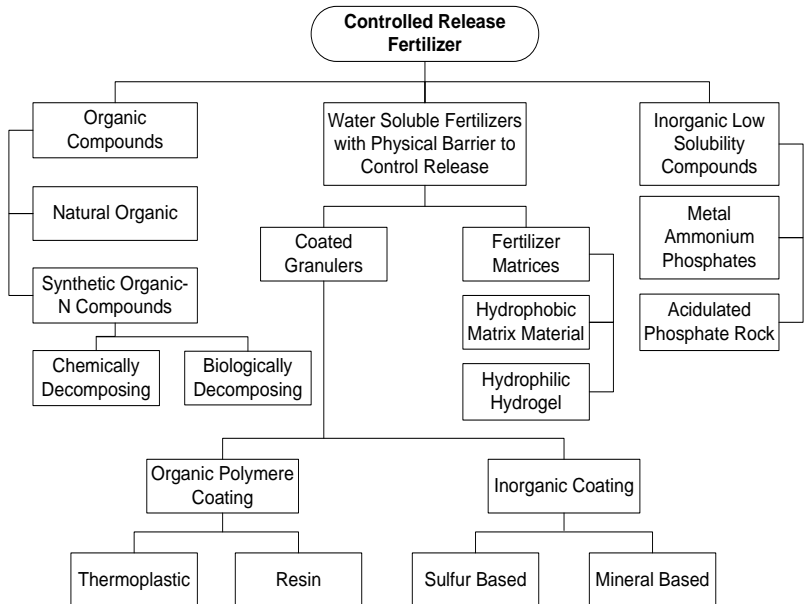
lepas lambat jika pelepasan nutrisinya lebih lama dari pupuk konvensional namun laju, pola, dan durasi tidak dikontrol seperti CRF.

B. Klasifikasi Pupuk Lepas Lambat

Berdasarkan berbagai literatur, Shaviv (2001) dan Trenkel (2010) mengklasifikasikan *Controlled Release Fertilizer* menjadi beberapa jenis sesuai yang disajikan pada Gambar 2.2 yaitu :

1. Pupuk dengan senyawa organik N dengan kelarutan rendah, yang kemudian dibagi menjadi dua yaitu senyawa organik alami (kotoran hewan, limbah lumpur) dan senyawa organik-N sintetis.
2. Pupuk dengan *physical barrier* yang mampu mengontrol pelepasan nutrisi pupuk tersebut. Yang termasuk dalam kategori ini adalah pupuk granul dengan pelapis hidrofobik dan pupuk dengan matriks polimer. Pupuk dengan pelapis dikategorikan lagi menjadi dua yaitu pupuk dengan pelapis polimer organik dan pupuk dengan pelapis senyawa anorganik. Untuk pupuk dengan matriks bisa menggunakan matriks dengan senyawa hidrofobik atau dengan metode hidrogel.

3. Pupuk dengan senyawa anorganik dengan kelarutan rendah.



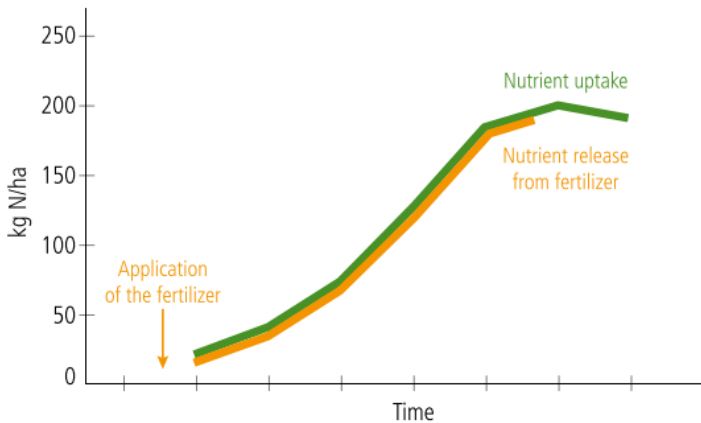
Gambar 2.2. Klasifikasi *Controlled Release Fertilizer* (Azeem dkk., 2014; Shaviv, 2001; Trenkel, 2010).

Adapun menurut *European Standard EN 13266201*, suatu pupuk dapat dikatakan sebagai pupuk lepas lambat (*Controlled Release Fertilizer*), yaitu apabila pupuk tersebut setelah diaplikasikan ke dalam tanah dengan suhu tanah 25°C maka pupuk tersebut harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Dalam periode waktu 24 jam, nutrisi *Controlled Release Fertilizer* yang dilepaskan tidak lebih dari 15 %.
2. Dalam periode waktu 28 hari, nutrisi *Controlled Release Fertilizer* yang dilepaskan tidak lebih dari 75 %.
3. Dalam periode waktu 40-360 hari, nutrisi *Controlled Release Fertilizer* yang dilepaskan minimal 75 %.

C. Pembuatan Pupuk Lepas Lambat

Prinsip dari pembuatan pupuk lepas lambat adalah dengan membuat pupuk agar mampu melepaskan nutrisinya sesuai dengan kebutuhan nutrisi dari tanaman. Hal ini lah yang disebut sebagai pupuk ideal (*ideal fertilizer*). Gambar profil pelepasan nutrisi pada pupuk ideal ditunjukkan oleh Gambar 2.3 Pada gambar tersebut terlihat bahwa nutrisi pada pupuk mendekati dengan penyerapan nutrisi oleh tanaman, sehingga dapat dikatakan bahwa efisiensi dari proses pemupukan mendekati 100%



Gambar 2.3. Profil Pelepasan Nutrisi pada Pupuk Ideal (Trenkel, 2010)

Berdasarkan prinsip tersebut dan beberapa klasifikasi jenis pupuk lepas lambat yang dijelaskan pada sub bab sebelumnya, maka ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk membuat pupuk lepas lambat. Salah satu metode adalah dengan melapisi pupuk konvensional dengan *coating agent* yang tidak dapat larut di dalam air dan bersifat semipermeabel atau impermeabel dengan pori-pori.

Pelapis tersebut diharapkan mampu mengontrol air yang masuk ke dalam inti pupuk sehingga laju pelepasan nutrisi menjadi lebih lambat dan mampu melepaskan nutrisinya dengan mengikuti profil kebutuhan nutrisi tanaman (Sempeho dkk., 2014; Trenkel, 2010). Pelapisan pupuk dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu *spray coating*, *spray drying*, *pan coating* dan *rotary disk atomization* (Sempeho dkk., 2014).

Selain dengan melapisi pupuk, upaya pencapaian profil pelepasan nutrisi dari pupuk ideal bisa dilakukan dengan inkorporasi nutrisi pupuk dalam suatu matriks (*carrier*). Senyawa yang berperan sebagai matriks ditambahkan pada campuran nutrisi pupuk dan dibiarkan bereaksi sehingga nutrisi akan terjebak dalam matriks gel, atau dengan memasukkan gel kering ke dalam larutan nutrisi pupuk sehingga gel akan mengembang (*swelling*). Setelah *swelling equilibrium* tercapai maka gel dapat dikeringkan sehingga akan diperoleh nutrisi pupuk yang terperangkap dalam gel.

Dua metode tersebut memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Menurut Fujita dan Soji (1999), pada metode *coating*/pemberian pelapis, massa material pelapis yang diperlukan untuk memperoleh pupuk lepas lambat adalah sekitar 10% dari massa produk yang dihasilkan, sedangkan untuk metode matriks membutuhkan lebih banyak yaitu hingga 40% (berat) (Trenkel, 2010). Dengan demikian, dilihat dari jumlah materialnya, metode *coating* lebih ekonomis daripada metode pemberian matriks. Meskipun demikian, metode *coating* juga memiliki kekurangan yaitu sulitnya dalam menemukan material pelapis dan proses produksi yang tepat (Fujita dan Soji, 1999).

D. Kelebihan Pupuk Lepas Lambat

Penggunaan pupuk lepas lambat memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan pupuk konvensional, antara lain:

- a. Menurunkan kehilangan (*losses*) nutrisi dan meningkatkan efisiensi dari nutrisi yang diberikan. Aplikasi dari pupuk lepas lambat berpotensi untuk menurunkan penggunaan pupuk sebanyak 20-30% dibandingkan dengan pupuk konvensional dengan *yield* yang sama (Trenkel, 2010).
- b. Meminimalisasi dampak kesehatan dan kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh kelebihan nutrisi (N dan P) di lingkungan. Lambatnya pelepasan nutrisi dari CRF mampu menjaga ketersediaan nutrisi di dalam tanah pada level yang rendah (tidak berlebih) sehingga mampu mencegah *run off* dan *leaching losses*.
- c. Mengurangi biaya aplikasi dan tenaga kerja.
- d. Dengan mengetahui laju dari pelepasan nutrisi dan waktunya maka dapat ditentukan kapan waktu untuk dilakukan pemupukan kembali.

E. Mekanisme Pelepasan Nutrisi pada Pupuk Lepas Lambat

Banyak faktor yang menentukan mekanisme pelepasan nutrisi suatu pupuk CRF sehingga sulit untuk menentukan secara pasti bagaimana mekanisme pelepasan nutrisi yang terjadi. Namun Shaviv (2005), Wu dan Liu (2008) mengusulkan sebuah mekanisme yang bisa terjadi dalam pelepasan nutrisi pupuk.

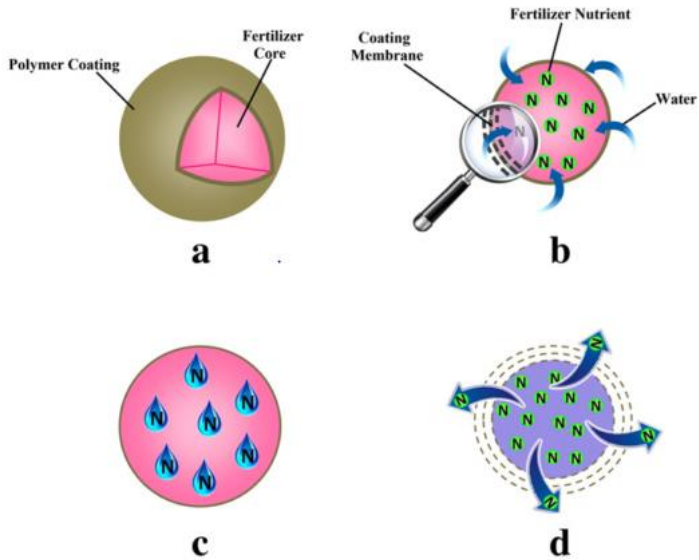
Menurut Shaviv (2005), Wu dan Liu (2008), setelah pupuk ditanam di dalam tanah, air yang berada di dalam tanah akan masuk menembus lapisan *coating* pupuk melalui pori-pori pada lapisan. Air yang berhasil masuk ke dalam inti (*core*) pupuk akan melarutkan nutrisi yang berada di inti. Akibatnya, akan timbul kenaikan tekanan osmotik yang menyebabkan granul pun menjadi lebih besar dan akan terjadi dua kemungkinan :

1. Lapisan *coating* akan pecah jika lapisan tersebut tidak mampu menahan tekanan osmotik yang terjadi,

akibatnya semua nutrisi pada inti pupuk akan terlepas ke lingkungan. Kondisi ini disebut sebagai "*failure mechanism*" atau "*catastrophic release*".

2. Jika lapisan *coating* mampu menahan tekanan osmotik yang terjadi maka nutrisi dalam pupuk akan dilepaskan secara perlahan melalui pori-pori dari *coating*/pelapis. Transfer massa pun akan terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi dan tekanan osmotik sebagai pemicunya. Kondisi ini disebut sebagai "*diffusion mechanism*".

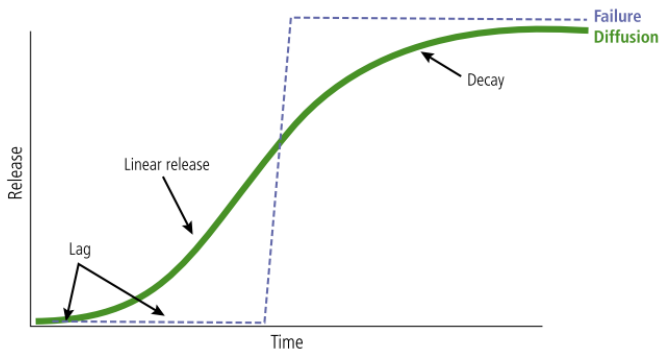
Mekanisme lepasnya nutrisi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4 sedangkan profil pelepasan nutrisi pupuk dengan *failure mechanism* dan *diffusion mechanism* pada pupuk urea granul yang telah dilapisi/*dicoating* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



(a) inti/core pupuk yang telah dilapisi, (b) proses masuknya air yang menempus dinding pelapis dan mencapai inti pupuk, (c) proses pelarutan pupuk dan timbulnya tekanan osmosis, dan (d) proses pelepasan nutrisi melalui pori-pori pelapis/coating.

Gambar 2.4 Mekanisme Difusi Pelepasan Nutrisi Pupuk

(Azeem dkk., 2014)



Gambar 2.5. Profil Pelepasan Nutrisi Pupuk Urea Granul (Shaviv, 2005)

Bab III. TRANSFER MASSA pada PUPUK LEPAS LAMBAT

A. Pemodelan Matematis Pelepasan Nutrisi pada Pupuk Lepas Lambat dengan Pelapis (*Coating*)

Menurut mekanisme yang dijelaskan oleh Shaviv (2005), Wu dan Liu (2008), pupuk lepas lambat ber*coating* akan melepaskan nutrisinya dengan *diffusion mechanism* atau dapat dikatakan bahwa transfer massa nutrisi dari pupuk ke lingkungan terjadi secara difusi. Nutrisi dari inti pupuk akan mendifusi melalui pori-pori lapisan/*coating* dan keluar ke lingkungan. Oleh karena itu pada pemodelan matematis ini akan didekati dengan Hukum Fick. Penyusunan model matematis akan dilakukan dengan mengambil salah satu komponen yang release yaitu nitrogen. Adapun Hukum Fick dapat dituliskan sebagai berikut (Bird, 2006)

$$N_A = -D_{ab} \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (1)$$

dengan, N_A = kecepatan difusi

C_A = konsentrasi nitrogen di dalam pelapis

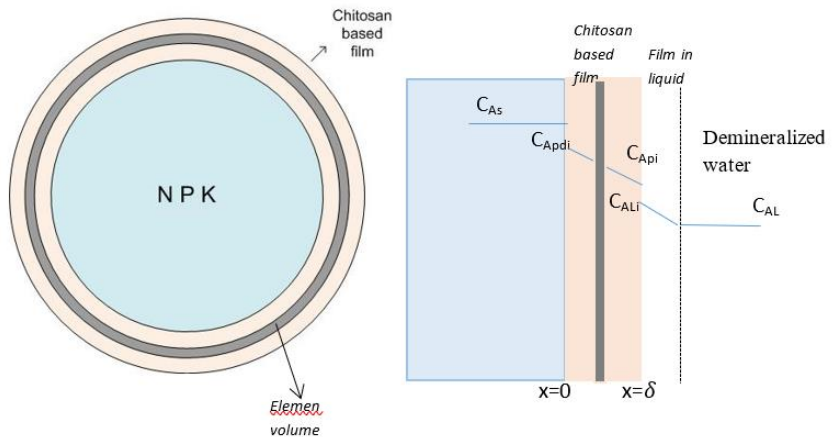
x = arah difusi

Model matematika disusun berdasarkan pelepasan nutrisi pupuk yang dilakukan dengan cara merendam granul pupuk di dalam gelas beaker yang berisi 100 mL aquadest pada suhu lingkungan dan didiamkan dalam jangka waktu tertentu (Trenkel, 2010). Aquadest dipilih karena dapat mewakili kondisi tanah yang paling ekstrim di lingkungan yaitu keadaan dimana mampu melarutkan pupuk dengan cepat. Adapun elemen volume dan ilustrasi transfer massa yang digunakan dalam penyusunan model matematis pelepasan nutrisi pada pupuk lepas lambat ditampilkan pada Gambar 3.1

Pada proses pelepasan nutrisi pupuk lepaas lambat diharapkan bahwa satu-satunya yang menjadi hambatan transfer massa nitrogen dari dalam pupuk ke lingkungan adalah lapisan tipis yang meliputi pupuk atau dapat dikatakan bahwa hambatan yang paling dominan adalah difusi nitrogen di dalam lapisan pupuk, dengan demikian beberapa asumsi

atau penyederhanaan yang diambil dijelaskan sebagai berikut

ini:



Gambar 3.1. Elemen Volume pada Pelapis dan Transfer

Massa Nitrogen

1. Pupuk sangat kecil (dianggap diameternya kecil sekitar 4mm untuk pupuk granul) sehingga konsentrasi nitrogen di dalam pupuk dianggap seragam di semua posisi. Waktu yang dibutuhkan air untuk masuk ke dalam inti pupuk dan waktu pelarutan nutrisi di dalam inti pupuk diabaikan dan transfer massa nitrogen dari larutan di dalam pupuk ke

lapisan bagian dalam pelapis ($x = 0$) dianggap sangat cepat sehingga dapat diabaikan. Keseimbangan antara konsentrasi nitrogen di dalam padatan dengan (C_{As}) dan konsentrasi nitrogen di batas lapisan dalam ($C_{A_{pdi}}$) di dekati dengan persamaan (2):

$$C_{A_{pdi}} = H_d C_{As} \quad (2)$$

2. Lapisan pupuk (coating) sangat tipis sehingga difusi nitrogen pada pelapis dapat didekati atau dianggap sebagai difusi yang melalui sebuah slab dan dianggap *steady state*. Dengan demikian, dapat disusun neraca massa nitrogen di dalam pelapis sebagai berikut:

Laju massa nitrogen masuk – Laju massa nitrogen keluar
 = Laju akumulasi nitrogen

$$N_A|_x A - N_A|_{x+\Delta x} A = 0 \quad (3)$$

Persamaan 1 dimasukkan untuk menggantikan nilai N_A sehingga diperoleh persamaan berikut

$$-D_{ab} \frac{\partial C_A}{\partial x} \Big|_x - \left(-D_{ab} \frac{\partial C_A}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right) = 0$$

$$D_{ab} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C_A}{\partial x} \right) = 0$$

$$\left(\frac{\partial C_A}{\partial x} \right) = C_1 \quad (4)$$

$$C_A = C_1 x + C_2 \quad (5)$$

dengan *boundary condition*

$$(i) x = 0 \quad C_A = C_{A_{pdi}}$$

$$(ii) x = \delta \quad C_A = C_{A_{pi}}$$

Jika *boundary condition* (i) dan (ii) dimasukkan

kedalam persamaan (5) maka

$$C_{A_{pdi}} = C_1 \cdot 0 + C_2 ; C_2 = C_{A_{pdi}}$$

$$C_{A_{pi}} = C_1 \delta + C_{A_{pdi}} ; C_1 = \frac{C_{A_{pi}} - C_{A_{pdi}}}{\delta}$$

Sehingga transfer massa difusinya menjadi:

$$N_A = -D_{ab} \frac{\partial C_A}{\partial x}$$

$$N_A = -D_{ab} \frac{C_{A_{pi}} - C_{A_{pdi}}}{\delta}$$

$$N_A = D_{ab} \frac{C_{A_{pdi}} - C_{A_{pi}}}{\delta} \quad (6)$$

Dimana kesetimbangan antara konsentrasi nitrogen di pelapis pada *interface* dan nitrogen di cairan pada *interface* didekati dengan persamaan (7)

$$C_{A_{pi}} = H_L C_{A_{Li}} \quad (7)$$

3. Transfer massa nitrogen dari pelapis bagian luar luar $x = \delta$ ke larutan/cairan didekati dengan persamaan (8):

$$N_A = k_c (C_{A_{Li}} - C_{AL}) \quad (8)$$

Untuk mengetahui profil konsentrasi nitrogen yang *release* dapat dihitung dari neraca massa nitrogen di dalam larutan /cairan :

Laju massa nitrogen masuk – Laju massa nitrogen keluar =

Laju akumulasi nitrogen

$$N_A - N_b - 0 = \frac{d}{dt} (V C_{AL})$$

$$k_c (C_{A_{Li}} - C_{AL}) A - N_b = \frac{d}{dt} (V C_{AL}), \text{ volume cairan konstan}$$

sehingga

$$k_c (C_{ALi} - C_{AL}) A N_b = V \frac{d C_{AL}}{dt} \quad (9)$$

Nilai C_{ALi} tidak diketahui dan dengan mengetahui bahwa *flux* nitrogen konstan atau

N_A = konstan sehingga dapat ditulis bahwa

$N_{A \text{ difusi}}$ di dalam pelapis = $N_{A \text{ konveksi}}$ dari permukaan pelapis ke cairan

$$D_{ab} \frac{C_{A_{pdi}} - C_{A_{pi}}}{\delta} = k_c (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (10)$$

Persamaan (2) dan persamaan (7) disubstitusikan ke persamaan (10) sehingga diperoleh

$$\frac{D_{ab}}{\delta} (H_d C_{As} - H_L C_{ALi}) = k_c (C_{ALi} - C_{AL}) \quad (11)$$

Kondisi larutan di dalam inti pupuk dapat dianggap sama dengan kondisi larutan di luar pupuk sehingga pada kasus ini nilai H_d dapat dianggap sama dengan H_L

$$H_d = H_L = H$$

maka persamaan (11) menjadi

$$\frac{D_{ab}}{\delta} (H C_{As} - H C_{ALi}) = k_c (C_{ALi} - C_{AL})$$

$$\frac{H D_{ab}}{\delta} (C_{As} - C_{Ali}) = k_c (C_{Ali} - C_{AL})$$

$$\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} (C_{As} - C_{Ali}) = (C_{Ali} - C_{AL})$$

$$\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} C_{As} + C_{AL} = C_{Ali} + \frac{H D_{ab}}{\delta k_c} C_{Ali}$$

$$\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} C_{As} + C_{AL} = \left(\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} + 1 \right) C_{Ali}$$

$$\frac{\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} C_{As} + C_{AL}}{\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} + 1} = C_{Ali} \quad (12)$$

C_{Ali} pada persamaan (9) dapat disubsitusi dengan persamaan (12) sehingga diperoleh persamaan (13) di bawah ini :

$$k_c (C_{Ali} - C_{AL}) A N_b = V \frac{d C_{AL}}{dt}$$

$$k_c \left(\frac{\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} C_{As} + C_{AL}}{\frac{H D_{ab}}{\delta k_c} + 1} - C_{AL} \right) A N_b = V \frac{d C_{AL}}{dt} \quad (13)$$

Persamaan 13 bisa disederhanakan dengan menganggap bahwa transfer massa nitrogen dari lapisan luar pelapis ke larutan terjadi sangat cepat atau diabaikan dan

dianggap bahwa hanya transfer massa difusi di dalam pelapis yang paling berpengaruh,

$$D_{ab} \frac{C_{A_{pdi}} - C_{A_{pi}}}{\delta} = k_c (C_{ALi} - C_{AL})$$

$$\frac{D_{ab}}{\delta k_c} (C_{A_{pdi}} - C_{A_{pi}}) = (C_{ALi} - C_{AL})$$

Nilai k_c sangat besar sehingga $C_{ALi} - C_{AL}$ mendekati 0, dan bisa dianggap bahwa dengan mengabaikan transfer massa nitrogen dari lapisan luar pelapis ke larutan maka bisa dianggap

$$C_{ALi} = C_{AL} \quad (14)$$

sehingga neraca massa nitrogen di dalam cairan menjadi:

$$D_{ab} \frac{C_{A_{pdi}} - C_{A_{pi}}}{\delta} A N_b = \frac{d}{dt} (V C_{AL})$$

$$\frac{H D_{ab}}{\delta} (C_{As} - C_{ALi}) A N_b = \frac{d}{dt} (V C_{AL}) \quad (15)$$

Dengan asumsi yang diambil pada persamaan (14) sehingga persamaan (15) menjadi

$$\frac{H D_{ab}}{\delta} (C_{As} - C_{AL}) A N_b = \frac{d}{dt} (V C_{AL})$$

Jika nilai $H \cdot D_{ab}$ diatas dianggap menjadi satu konstanta

De sehingga persamaannya menjadi:

$$\frac{De}{\delta} (C_{As} - C_{AL}) A N_b = \frac{d}{dt} (V C_{AL}) \quad (16)$$

Keterangan:

C_{AL} = Konsentrasi nitrogen di dalam cairan

C_{ALi} = Konsentrasi nitrogen di cairan pada *interface* yang setimbang dengan konsentrasi nitrogen pada lapisan luar pupuk (C_{Api})

C_{Api} = Konsentrasi nitrogen di lapisan luar pelapis pada *interface*

C_{Apci} = Konsentrasi nitrogen di lapisan bagian dalam pelapis yang setimbang dengan konsentrasi nitrogen di dalam inti (C_{As})

C_{As} = Konsentrasi nitrogen di dalam inti pupuk

k_c = Konstanta transfer massa nitrogen dari pelapis bagian luar ke cairan

H = Konstanta kesetimbangan

δ = Tebal pelapis

V = Volume cairan

A = luas permukaan pupuk

N_b = Jumlah butir pupuk

Dengan konsentrasi nitrogen di cairan (C_{AL}) tiap waktu yang telah diperoleh, maka koefisien difusi D_e dapat dihitung dengan persamaan (16). Tetapi konsentrasi nitrogen di dalam pupuk tidak konstan selamanya. Pada awal proses konsentrasi nitrogen di dalam pupuk yang telah terlapis dapat dianggap jenuh dan tetap (C_{As} tetap), namun setelah beberapa saat konsentrasi nitrogen di dalam butiran pupuk pun berubah terhadap waktu. Oleh karena itu, penyelesaian dari persamaan (16) dapat didekati dengan dua cara berikut ini :

- a. Nilai C_{As} dianggap tetap sehingga dengan data C_{As0} yang ada maka nilai C_{AL} tiap waktu langsung dapat diselesaikan dengan integrasi persamaan (16).

b. Nilai C_{As} tidak tetap, tetapi sebagai fungsi waktu.

Untuk itu, nilai C_{As} tiap waktu dapat dihitung dari

neraca masa total nitrogen berikut ini:

$$N_b V_b (C_{As0} - C_{As}) = V (C_{AL} - C_{AL0})$$

$$C_{As} = C_{As0} - \frac{V}{N_b V_b} (C_{AL} - C_{AL0})$$

Nilai $C_{AL0} = 0$ sehingga

$$C_{As} = C_{As0} - \frac{V C_{AL}}{N_b V_b} \quad (17)$$

Persamaan (17) disubstitusikan ke persamaan (16) sehingga

menjadi

$$\frac{A De N_b}{V \delta} (C_{As} - C_{AL}) = \frac{d C_{AL}}{dt}$$

$$\frac{A De N_b}{V \delta} \left(C_{As0} - \frac{C_{AL}}{N_b V_b} - C_{AL} \right) = \frac{d C_{AL}}{dt} \quad (18)$$

Jika persamaan 18 diintegalkan maka akan diperoleh

persamaan C_{AL} sebagai fungsi waktu seperti yang ditunjukkan

pada persamaan (19) berikut ini:

$$\frac{A D e N_b}{V \delta} \int_0^t dt = \int_0^{C_{AL}} \frac{d C_{AL}}{\left(C_{Aso} - \frac{C_{AL}}{N_b V_b} - C_{AL} \right)}$$

$$C_{AL} = \frac{C_{Aso}}{1 + \frac{1}{N_b V_b}} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{N_b A D t}{V \delta} \left(1 + \frac{1}{N_b V_b} \right) \right) \right\} \quad (19)$$

B. Persamaan Empiris Pelepasan Nutrisi Pada Pupuk Lepas Lambat

1. *Sequential Layer Model*

Pada model ini diasumsikan bahwa pelepasan nutrisi dimulai dengan adanya gradien konsentrasi air yang tinggi pada matrix (carrier nutrisi)/air, sehingga air masuk kedalam sistem dan mengakibatkan adanya perubahan sifat fisika-kimia pada system salah satunya adalah *swelling* pada matrix hidrofilik. Hal ini mengakibatkan air masuk kedalam system dan melarutkan nutrisi pupuk. Nutrisi pupuk yang larut kemudian mendifusi keluar berdasarkan dengan gradien konsentrasi. Pada *sequential layer model* ini dianggap bahwa jumlah air yang melarutkan nutrisi (mampu masuk ke dalam system) sebanding dengan koefisien difusi dari nutrisi yang keluar melalui matrix. Untuk mencari konstanta laju difusi dengan

model ini, maka dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$M_{pt} = M_{po} - k_{diss} A_t t \quad (20)$$

Keterangan :

k_{diss} = konstanta difusi *Sequential Layer Model*

t = waktu

M_{po} = massa kering matrix polimer mula-mula (pada $t=0$)

M_{pt} = massa kering matrix polimer mula-mula (pada $t=t$)

A_t = Luas permukaan

(Sempeho,dkk., 2014;Narender, 2014; Dixit, 2014; Shaviv dkk., 2013; Salome dkk.,2013; Mahat, 2010; Jalali,2008; Costa dan Lobo,2001; Seipmann dan Peppas,2001).

2. *Hopfenberg Model*

Model ini mengasumsikan bahwa nutrisi keluar dikarenakan adanya erosi dari permukaan matrix pembawa nutrisi. Adapun geometri dari system bisa berupa slab, bola dan silinder dimana masing-masing akan mengalami erosi yang berbeda. Model ini dapat didekati dengan persamaan

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \left(1 - \frac{k_0 t}{C_0 a}\right)^n \quad (21)$$

Keterangan:

M_t = konsentrasi dari nutrisi yang terlarut saat waktu= t

M_∞ = konsentrasi total dari matrix (*carrier*) yang terlarut saat system sudah jenuh

k_0 = konstanta laju erosi

C_0 = konsentrasi awaldari nutrisi di dalam matrix

n = 1 untuk slab, 2 untuk silinder dan 3 untuk bola

(Sempeho,dkk., 2014; Narender, 2014; Dixit, 2014; Shaviv dkk., 2013; Salome dkk.,2013; Mahat, 2010; Jalali,2008; Costa dan Lobo,2001; Seipmann dan Peppas,2001).

3. *Korsmeyer-PeppasModel*

Pada metode ini prediksi perhitungan pelepasan nutrisi pupuk melalui membrane matrix sebagai *carrier* dituliskan dengan persamaan 22 sebagai berikut

$$f_t = at^n \quad (22)$$

Keterangan

a = konstanta *Korsmeyer-PeppasModel* yang dipengaruhi oleh struktur dan geometri dari sistem

n = order yang mengindikasikan mekanisme releasenya nutrisi

f_t = fraksi dari nutrisi yang release ($\frac{M_t}{M_\infty}$) yang dideskripsikan pada persamaan 21

((Sempeho,dkk., 2014; Costa dan Lobo,2001;

4. *Zero Order Kinetics Model*

Model ini mendiskripsikan bahwa konsentrasu nutrisi pupuk yang *release* ke lingkungan dianggap konstan terhadap waktu. Secara matematis, model ini dapat dituliskan

$$Q_0 - Q_t = K_0 t \quad (23)$$

Dimana Q_t adalah nutrisi terlarut pada waktu t , Q_0 adalah jumlah nutrisi mula-mula di dalam larutan (biasanya $Q_0 = 0$) dan K_0 adalah konstanta release nutrisi order nol

Menurut Mahat (2010), *Zero Order Kinetics Model* ini cocok untuk memodelkan beberapa transfer massa seperti difusi air dan bioaktif, *swelling* dan degradasi dari matrix carrier.

(Sempeho,dkk., 2014; Mahat, 2010)

5. *First Order Kinetik Model*

Model ini bisa diaplikasikan untuk kinetika absorpsi maupun pelepasan nutrisi dari matrix *carrier*. Model ini mengasumsikan bahwa pelepasan nutrisi akan linear terhadap waktu. Secara matematika model ini dapat dituliskan sebagai berikut

$$\ln Q_t = \ln Q_0 + k_t \quad (24)$$

Dimana Q_t adalah konsentrasi nutrisi sebelum release pada waktu= t , Q_0 adalah konsentrasi nutrisi sebelum release pada waktu $t=0$, dan k_t adalah konstanta order 1 untuk pelepasan nutrisi (Sempeho,dkk.,2014)

6. Baker-Lonsdale Model

Model ini dapat digunakan untuk mendeskripsikan pelarutan bioaktif/nutrisi dari matrix berbentuk bola sehingga model ini biasanya cocok untuk system berupa mikrokapsul dan *microsphere*. Secara matematis Baker-Lonsdale Model ini dapat dituliskan sebagai berikut

$$F_t = \frac{3}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{M_t}{M_\infty} \right)^{\frac{2}{3}} \right] - \frac{M_t}{M_\infty} = k_t \quad (25)$$

Dimana F_t adalah fraksi nutrisi yang *release* pada waktu = t , M_t adalah jumlah nutrisi yang release pada

waktu $=t$, dan M_{∞} adalah jumlah nutrisi yang *release* pada waktu $=$ tak hingga (∞)

(Sempeho,dkk., 2014; Narender, 2014; Dixit, 2014; Shaviv dkk., 2013; Salome dkk.,2013; Mahat, 2010; Jalali,2008; Costa dan Lobo,2001; Seipmann dan Peppas,2001).

BABIV. BIOMASSA SEBAGAI PUPUK ORGANIK LEPAS LAMBAT

Penggunaan pupuk anorganik memberikan dampak yang buruk bagi lingkungan karena pelepasan nutrisinya yang cepat. Selain itu, *nutrient use efficiency* nya pun juga rendah serta memiliki *operation cost* yang tinggi karena harus melakukan lebih dari satu kali pemupukan dalam satu periode tanam. Oleh karena itu banyak peneliti mengembangkan teknologi yang lebih sustainable seperti pupuk lepas lambat, rotasi panen, penggunaan kombinasi pupuk anorganik-organik, penggunaan pupuk organik (França et al., 2018; Jannoura et al., 2014; Kusumastuti et al., 2019; Wang et al., 2018; Zhao et al., 2016).

Menurut Fairhurst (2012), pupuk organik merupakan salah satu teknologi yang berkelanjutan yang dapat digunakan dalam mengatasi dampak dari pupuk konvensional. Hal ini karena pupuk organik dapat melepaskan nutrisinya lebih lambat daripada pupuk konvensional. Dengan demikian pupuk organik dapat dimasukkan dalam kategori pupuk lepas lambat karena menurut Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO) definisi pupuk lepas lambat adalah jenis

pupuk yang melepaskan nutrisinya lebih lambat jika dibandingkan dengan pupuk konvensional. Untuk itu berikut dijelaskan beberapa biomassa yang potensial dikembangkan sebagai pupuk lepas lambat.

A. Limbah Bunga Jantan Kelapa Sawit Pasca *Anthesis*

Kelapa sawit merupakan salah satu komoditas utama di Indonesia. Per tahun 2021 tercatat bahwa luas perkebunan sawit di Indonesia mencapai 14.6 juta hektar (BPS, 2021). Selain di ambil buah sawitnya dan diolah menjadi minyak kelapa sawit atau produk turunannya, kelapa sawit juga mempunyai biomasa yang potensial untuk dimanfaatkan. Salah satunya adalah bunga jantan kelapa sawit pasca anthesis yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.2. Bunga Jantan Kelapa Sawit

Hamidiyanto (2022) mengatakan bahwa dalam satu tahun, bunga jantan yang dihasilkan oleh perkebunan di Indonesia mencapai 650 tandan/ha/tahun. Jika luas perkebunan Indonesia mencapai 14.6 juta hektar, ini artinya potensi limbah biomasa di Indonesia mencapai 790,8 juta tandan per bulan. Limbah bunga jantan kelapa sawit pasca *anthesis* ini belum dimanfaatkan secara optimal. Beberapa penelitian yang ada mengolah bunga jantan kelapa sawit pasca *anthesis* menjadi bioethanol melalui fermentasi, melakukan delignifikasi dan beberapa mengolah menjadi kompos dan melihat pengaruhnya terhadap tanaman.

Bunga jantan kelapa sawit pasca *anthesis* dapat diolah menjadi pupuk kompos dengan cara berikut ini (Hendri, 2017):

1. Sediakan 60 kg bunga jantan kelapa sawit
2. Bunga jantan kelapa sawit pasca *anthesis* kemudian dicincang hingga berukuran 1-2 cm.
3. Bunga yang sudah dicincang tersebut dimasukkan ke dalam ember yang telah disiapkan Sebanyak 4 buah.
4. Pada ember yang telah berisi bunga tersebut ditambahkan 5 liter air, ½ liter EM4 dan ¼ kg gula pasir lalu diaduk di sampai rata untuk setiap embernya.

5. Setiap ember tersebut ditutup dengan kain kasa selama 2 minggu.
6. Pupuk kompos bunga jantan kelapa sawit ini siap untuk diaplikasikan ke tanaman.

Hamidiyanto mengatakan bahwa bunga jantan kelapa sawit memiliki kandungan unsur hara yang baik yaitu N 2,01 %, P 0,541 %, K 0,96 %, Mg 0,36 % dengan C/N Ratio 16,6. Ini menunjukkan bahwa kompos yang terubut dari bunga jantan kelapa sawit pasca *antesis* ini akan mampu memberikan nutrisi bagi tanaman. Dari penelitian Hamidiyanto pun menunjukkan bahwa pemberian kompos bunga jantan kelapa sawit ini mampu memberikan pengaruh yang nyata terhadap pertambahan tinggi bibit, pertambahan diameter bonggol dan bobot kering bibit kelapa sawit. Hal ini pun sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Hendri (2017) yang mengaplikasikan kompos bunga jantan kelapa sawit pasca *anthesis* untuk tanaman kacang hijau. Hendri (2017) mengatakan bahwa pemberian kompos bunga jantan kelapa sawit pasca *anthesis* mempengaruhi tinggi tanaman dan umur berbunga dari tanaman kacang hijau.

Kompos bunga jantan kelapa sawit pasca *anthesis* ini potensial untuk dimodifikasi dan dikembangkan menjadi

pupuk lepas lambat (SRF). Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menambahkan material *binder/matrix* ke dalam kompos sehingga kompos dapat digranulasi. Granul ini kemudian bisa dianalisis seberapa cepat ia mampu melepaskan nutrisinya ke dalam tanah sehingga bisa diperoleh profil pelepasan nutrisinya.

B. Kotoran Ayam

Daging ayam dan telur ayam merupakan lauk yang digemari oleh hampir seluruh rakyat Indonesia. Limbah potensial sebagai pupuk yang dihasilkan oleh peternak ayam broiler dan ayam petelur adalah kotoran ayam. Kotoran ayam ini menjadi limbah yang mengganggu lingkungan karena baunya. Selain itu, bau dari kotoran ayam tersebut akan menarik lalat sehingga populasi lalat pun meningkat (Purnomo, 2017). Oleh karena itu, memanfaatkan kotoran ayam sebagai pupuk organik dapat mengatasi permasalahan yang muncul tersebut.

Limbah kotoran ayam yang dihasilkan oleh peternak ayam dengan kapasitas besar dapat mencapai 200 ton per 4 bulan (Purnomo, dkk., 2017). Kotoran ayam juga memiliki kadar nitrogen yang tinggi yang merupakan macro nutrient yang

dibutuhkan oleh tumbuhan. Selain itu, kotoran ayam pun dapat memperbaiki pH dan kualitas tanah. Dengan demikian kotoran ayam ini sangat potensial dijadikan sebagai pupuk organik lepas lambat.

Beberapa penelitian untuk menjadikan kotoran ayam sebagai pupuk lepas lambat pun sudah dilakukan. Purnomo (2017) membuat granul pupuk organik yang terdiri dari kotoran ayam kering yang dicampur dengan bubuk struvite dan menambahkan *starch* sebagai binder/pengikat. Dari analisis pelepasan nutrisi yang dilakukan terbukti bahwa kotoran ayam mampu memperlambat pelepasan nutrisi dan menjadi sumber nitrogen bagi tumbuhan

DAFTAR PUSTAKA

- Azeem, B., Kushaari, K., Man, Z. B., Basit, A., & Thanh, T. H. (2014). *Review on Materials & Methods to Produce Controlled Release Coated Urea Fertilizer*. *Journal of Controlled Release*, *181*, 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.02.020>
- Bøckman, O. C., & Olf, H.-W. (1998). *Fertilizers, Agronomy and N₂O. Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *52*(2–3), 165–170. <https://doi.org/10.1023/A:1009736327495>
- Black, Charles Allen. (1989). “*Reducing American Exposure to Nitrate, Nitrite, and Nitroso Compounds: The National Network to Prevent Birth Defects Proposa*”. Council for Agricultural Science and Technology.
- Costa. P., and Lobo, J. M. S., 2001, “Modeling and comparison of dissolution profiles,” *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 13, no. 2, pp. 123–133
- Cifuentes, M. P. (2004). <http://www.yara.in/crop-nutrition/crops/coffee/key-facts/nutritional-summary/> (diakses pada tanggal 16 Maret 2018, 10:16 WIB)
- Dixit, V., 2014, *Dissolution and Dissolution Models*, authorSTREAM, <http://www.authorstream.com/Presentation/aSGuest106867-1122372-dissolution-and-its->

models/.

Fairhurst, T., 2012, Handbook for Integrated Soil Fertility Management, Africa Soil Health Consortium, Nairobi.

França, D., Fracon, Â., Luiz, L. and Souza, C.F., 2018, Chitosan spray-dried microcapsule and microsphere as fertilizer host for swellable – controlled release materials, Carbohydr. Polym., 196 (January), 47–55.

Fujita, T. and Shoji, S. (1999). “*Kinds and properties of Meister fertilizers. In: Meister controlled release fertilizer – Properties and Utilization.* Shoji, S. (ed). Konno Printing Company Ltd. Sendai, Japan. pp. 13-34”

Haifa Chemicals, (2014). <https://www.haifa-group.com/using-right-fertilizers-order-provide-sugar-cane-necessities> - crop guide- fields crop-Sugar cane- Using the Right Fertilizer in Order to Provide the Sugarcane Necessities (diakses pada tanggal 15 Agustus 2022, 13:26 WIB)

Jannoura, R., Georg, R. and Bruns, C., 2014, Organic fertilizer effects on growth , crop yield , and soil microbial biomass indices in sole and intercropped peas and oats under organic farming conditions, Eur. J. Agron., Elsevier B.V., 52, 259–270.

- Jalali, M.B., 2008, "Kinetic analysis of drug release from nanoparticles," *Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 167–177
- Kusumastuti, Y., Istiani, A. and Purnomo, C.W., 2019, Chitosan-Based Polyion Multilayer Coating on NPK Fertilizer as Controlled Released Fertilizer, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2019.
- Mahat, B.S., 2010, "Mathematical Models used in Drug Release Studies," Department of Pharmacy, Kathmandu University, Dhulikhel, Nepal, <http://www.scribd.com/doc/54516124/MATHEMATICAL-MODELS-USED-IN-THE-DRUG-RELEASE-STUDIES>.
- Narender, D., 2014. Theories and Mechanisms of Dissolution Testing, Pharmawiki, Kakatiya University, <http://pharmawiki.in/ppt-theories-and-mechanisms-of-dissolution-testing/>.
- Newbould, P. (1989). *The Use of Nitrogen Fertilizer in Agriculture: Where Do We Go Practically and Ecologically?*, 311, 281–295.
- Salome, A.C., Godswill, C.O., Ikechukwu, I.O., 2013. "Kinetics and mechanisms of drug release from swellable and non

swellable matrices: a review,” Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, vol. 4, no. 2, pp. 97–103.

Sempeho, S. I., Kim, H. T., Mubofu, E., & Hilonga, A. (2014). *Meticulous Overview on the Controlled Release Fertilizers*. *Advances in Chemistry*, 2014, 16.

Shaviv, A. (2001). *Advances In Controlled - Release Fertilizer*. *Advances in Agronomy*, 71

Shaviv A., Raban S., Zaidel E. (2003). “*Modeling Controlled Nutrient Release from Polymer Coated Fertilizers: Diffusion Release from Single Granules*”, *Environmental Science and Technology*, 37, 2251- 2256.

Shaviv, A. (2005). *Controlled Release Fertilizers*. *IFA International Workshop*, (x), 1–29.

Siepmann, J. and Peppas, N. A. 2001. “*Modeling of drug release from delivery systems based on hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)*,” *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 48, no. 2-3, pp. 139–157

Smidsrud O, Skjak-Bræk G. 1990. “*Alginate as Immobilization Matrix for Cells*”. *Trend Biotechnol* ;8:71–8

Smil, V. (1999). *Nitrogen in Crop Production: An Account of Global Flows*. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(2), 647–

662. <https://doi.org/10.1029/1999GB900015>

Smith, S. J., Schepers, J. S., and Porter, L. K. (1990). "Assessing and Managing Nitrogen Losses to The Environment". *Adv. Soil Sci.* 14, 1–45.

Trenkel, M. E. (1997). *Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture*. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA).

Trenkel, M. E. (2010). *Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture* (second edi). Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA). Retrieved from publications@fertilizer.org

Thong dan NG. (1978). <http://www.yara.com.gh/crop-nutrition/crops/cocoa/key-facts/nutritional-summary/> diakses pada tanggal 16 Maret 2018 10:16

Wang, Y., Zhu, Y., Zhang, S. and Wang, Y., 2018, What could promote farmers to replace chemical fertilizers with organic fertilizers ?, *J. Clean. Prod.*, 199, 882–890.

Zhao, J., Ni, T., Li, J., Lu, Q., Fang, Z. and Huang, Q., 2016, Effects of organic – inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields , soil biological activity and bacterial community structure

in a rice – wheat cropping system, *Appl. Soil Ecol.*, Elsevier B.V., 99, 1–12.

Zhang, M., Yang, Y.Ch., Song, F.Pg. and Shi, Y.Xi . (2005). “*Study and Industrialized Development of Coated Controlled-Release Fertilizers*”. (Chinese) *Journal of Chemical Fertilizer Industry*, 177-196

Zhang, M., Yao, Y., Tian, Y., Ceng, K., Zhao, M., Zhao, M. and Yin, B., 2018, Field crops research increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems, *F. Crop. Res.*, 227 102–109

<https://inthefurrow.com/2017/12/19/plant-soil-nutrient-availability/> (diakses pada tanggal 15 Agustus 2020, 13:40WIB)