

BAHAN AJAR

**PERGERAKAN HARA MINERAL DALAM
TANAMAN**



Oleh :
Ir. I Wayan Wiraatmaja, MP.
NIP. 195904181986011001

**PROGRAM STUDI
AGROEKOTEKNOLOGI
FAKULTAS PERTANIAN UNUD
2016**

KATA PENGANTAR

Atas berkat rahmat Tuhan Yang Maha Esa, maka Bahan Ajar **“PERGERAKAN HARA MINERAL DALAM TANAMAN”** dapat diselesaikan sesuai dengan rencana. Bahan ajar ini merupakan sub pokok bahasan dari Mata kuliah **FISIOLOGI TUMBUHAN**. Penyusun berharap dengan tersusunnya Bahan Ajar ini maka seluruh materi yang tersurat dan tersirat didalamnya dapat memudahkan dan membantu pembaca, terutama mahasiswa yang menempuh mata kuliah Fisiologi Tumbuhan, serta dapat memberi wawasan dan penuntun berfikir terkait dengan pemahaman dan pengembangan masalah Fisiologi Tumbuhan.

Kami menyampaikan terima kasih kepada semua pihak, terutama kepada rekan-rekan staf dosen Laboratorium Ekofisiologi Fakultas Pertanian Unud, baik moril maupun dorongan semangat sehingga penyusunan Bahan Ajar ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga Tuhan Yang Maha Esa memberi berkat bagi usaha mulia semua pihak demi lebih kondusifnya suasana dan atmosfer akademik di Fakultas Pertanian Universitas Udayana.

Denpasar, Oktober 2016

Penyusun

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI	iii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Pengelompokan Unsur Hara dan Ketersediaannya Bagi Tanaman	1
1.2. Fungsi Fisiologis Hara Mineral Bagi Tanaman	5
II. PERGERAKAN HARA MINERAL KE TANAMAN DAN DALAM TANAMAN	9
2.1. Pergerakan Hara Mineral dari Larutan Tanah ke Permukaan Akar	9
2.2. Angkutan Hara ke Tengah Akar	19
2.3. Masuknya Hara ke Xylem Akar	22
2.4. Gerakan Hara Mineral dalam Xylem	27
2.5. Gerakan Hara dalam Floem	32
2.6. Penyerapan Hara Lewat Daun dan Translokasinya.....	36
2.7. Remobilisasi Hara	41
DAFTAR PUSTAKA.....	44

I. PENDAHULUAN

1.1. Pengelompokan Unsur Hara dan Ketersediaannya Bagi Tanaman

Unsur hara tanaman ada beberapa macam, sehingga untuk memudahkan dalam mempelajarinya para ahli di bidang nutrisi tanaman mengelompokkan seperti berdasarkan keesensialitasannya bagi tanaman, berdasarkan jumlah yang dibutuhkan dan berdasarkan mobilitasnya dalam floem.

Berdasarkan keesensialannya, hara dibedakan menjadi : (a) Hara esensial yaitu hara yang harus memenuhi 4 kriteria, yaitu (1) Tanpa kehadirannya tanaman tak dapat tumbuh (tidak dapat menyelesaikan siklus hidupnya secara penuh); (2) Berperan sangat penting dalam proses fisiologis dan tak dapat digantikan; (3) Merangsang dan mengatur aktivitas enzim; dan (4) Komponen metabolisme esensial. (b) Hara benefisial yaitu hara yang berfungsi menstimulir pertumbuhan tetapi tidak esensial atau bersifat esensial untuk spesies tertentu. Unsur hara yang termasuk ke dalam hara benefisial adalah : hara Cobalt (Co), Natrium/Sodium (Na), Silikon (Si), Nikel (Ni), Selenium (Se) dan Aluminium (Al) (Marschner, 1986); dan (c) Hara Non-esensial atau hara fungsional yaitu hara yang tidak mempunyai 4 kriteria esensial seperti di atas.

Berdasarkan jumlah kebutuhan tanaman, hara esensial dibagi menjadi 2 kelompok, yaitu : hara makro adalah dibutuhkan dalam jumlah relatif banyak, yang terdiri dari 9 unsur (C, H, O, N, P, K, S, Ca dan Mg) dan hara mikro yaitu dibutuhkan dalam jumlah relatif sedikit yang terdiri dari 7 unsur (Fe, B, Mn, Zn, Cu, Mo dan Cl). Dasar pembagiannya menjadi hara makro dan mikro ini

sembarang dan tidak jelas. Dalam praktek pembagian ini tak banyak artinya karena sangat tergantung jenis tanaman dan kondisi lingkungan

Berdasarkan mobilitasnya dalam floem hara terdiri atas hara mobil seperti K, Na, Mg, P, S, Cl dan Rb; hara intermediet seperti Fe, Mn, Zn, Co, dan Mo; dan hara immobil seperti Li, Cs, Sr, Ba dan B.

Kecuali menurut kuantitas yang dibutuhkan tanaman, ada cara pengelompokan lain yang menggunakan dasar berbeda yaitu seperti Mengel dan Kirkby (1982) mengelompokkan unsur hara tanaman menjadi 4 kelompok menurut sifat biokimia dan fungsi fisiologi mereka yaitu : Kelompok 1 : terdiri dari C, H, O, N dan S. Unsur ini merupakan penyusun utama bahan organik, terlibat dalam proses enzimatik dan reaksi-reaksi oksidasi-reduksi. Kelompok 2 : terdiri dari P dan B. Unsur ini terlibat dalam reaksi transfer energi dan esterifikasi dengan gugus-gugus alkohol di dalam tanaman. Kelompok 3 : terdiri dari K, Ca, Mg, Mn dan Cl. Unsur ini berperan dalam osmotik dan keseimbangan ion. Juga memiliki fungsi-fungsi yang spesifik dalam konfirmasi enzyme dan katalisis. Dan kelompok 4 : terdiri dari Fe, Cu, Zn, dan Mo. Unsur ini hadir sebagai *chelate structural*, dan memungkinkan terjadinya transportasi elektron melalui perubahan valensi. Selain itu, unsur hara tanaman juga dapat dikelompokkan menjadi kelompok metal (logam) seperti K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, Cu dan Mo serta kelompok non metal seperti N, P, S, B dan Cl.

Menjaga dan mengontrol nutrisi tanaman merupakan salah satu aspek yang sangat fundamental dalam pertanian modern. Pengaruh menguntungkan penambahan hara mineral ke dalam tanah untuk memperbaiki pertumbuhan

tanaman telah dikenal dalam pertanian sejak lebih dari 2.000 tahun yang lalu (Marschner, 1986).

Komposisi hara mineral dalam tubuh tanaman tidak dapat digunakan secara langsung untuk menentukan apakah hara-hara tersebut merupakan hara esensial bagi pertumbuhan tanaman (Hartman *et al.*,1981). Menurut Epstein (1972), hara mineral dikelompokkan sebagai hara esensial paling tidak harus memenuhi 3 kriteria, yaitu : 1) tanpa kehadiran hara tersebut maka tanaman tidak dapat menyelesaikan siklus hidupnya, 2) fungsi hara tersebut tidak dapat digantikan oleh hara yang lain, dan 3) hara tersebut secara langsung terlibat dalam metabolisme tanaman yaitu sebagai komponen yang dibutuhkan dalam reaksi-reaksi enzimatik. Dengan demikian, sangatlah sulit untuk menggeneralisir apakah suatu hara mineral tertentu termasuk esensial atau non esensial, karena hara mineral yang satu bisa bersifat esensial bagi tanaman tertentu tetapi sebaliknya tidak esensial bagi jenis tanaman yang lain.

Tabel 1. Unsur esensial bagi sebagian besar tumbuhan tingkat tinggi dan konsentrasinya pada jaringan (berdasarkan berat kering) yang dianggap memadai (Brown *et al.* 1987 dalam Salisbury dan Ross,1992)

Unsur (laambang kimia)	Bentuk yang tersedia bagi tumbuhan	Bobot atom	Konsentrasi pada jaringan kering		Jumlah atom dibandingkan molibdenum
			mg/kg	(%)	
Molibdenum (Mo)	MoO_4^{2-}	95,95	0,1	0,00001	1
Nikel (Ni)	Ni^{2+}	58,71	?	?	?
Tembaga (Cu)	Cu^+ , Cu^{2+}	63,54	6	0,0006	100

Seng (Zn)	Zn ²⁼	65,38	20	0,0020	300
Mangan (Mn)	Mn ²⁼	54,94	50	0,0050	1.000
Boron (B)	H ₃ BO ₃	10,82	20	0,002	2.000
Besi (Fe)	Fe ³⁼ , Fe ²⁼	55,85	100	0,010	2.000
Klor (Cl)	Cl ⁻	35,46	100	0,010	3.000
Belerang (S)	SO ₄ ⁻	32,07	1.000	0,1	30.000
Fosfor (P)	H ₂ PO ₄ ⁴⁻	30,98	2.000	0,2	60.000
Magnesium (Mg)	Mg ²⁼	24,32	2.000	0,2	80.000
Kalsium (Ca)	Ca ²⁺	40,08	5.000	0,5	125.000
Kalium (K)	K ⁺	39,10	10.000	1,0	250.000
Nitrogen (N)	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	14,01	15.000	1,5	1.000.000
Oksigen (O)	O ₂ , H ₂ O	16,00	450.000	45	30.000.000
Karbon (C)	CO ₂	12,01	450.000	45	35.000.000
Hidrogen (H)	H ₂ O	1,01	60.000	6	60.000.000

Untuk tanaman tingkat tinggi terdapat 13 jenis hara esensial yang terdiri atas kelompok hara makro (N, P, K, S, Mg dan Ca) dan kelompok hara mikro (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo dan Cl) (Janick *et al*, 1974; Hartman *et al.*, 1981; Baligar dan Duncan, 1990). Selanjutnya Brown *et al.* (1987 dalam Salisbury dan Ross, 1992) menyajikan daftar unsur hara esensial dan konsentrasinya dalam jaringan yang diperlukan agar tumbuhan dapat tumbuh dengan baik (Tabel 1). Disebutkan bahwa nilai konsentrasi tersebut menjadi pedoman yang berguna bagi para ahli fisiologi, pengelola kebun dan petani, karena konsentrasi unsur-unsur dalam jaringan (terutama dalam daun terpilih) lebih dapat dipercaya dari analisis tanah untuk menunjukkan apakah tanaman akan tumbuh lebih baik dan/atau lebih cepat jika unsur tertentu diberikan lebih banyak.

Hampir 90% dari seluruh berat segar tanaman herba adalah air, dan sisanya 10% berupa bahan kering terutama terdiri atas 3 elemen yaitu carbon,

hidrogen dan oksigen. Sebagian kecil dari bahan kering tersebut, tetapi merupakan fraksi yang penting terdiri atas elemen-elemen lain yang secara absolut dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman yaitu 13 elemen yang dikelompokkan sebagai hara esensial bagi tanaman tingkat tinggi. Ke tiga belas hara esensial tersebut dibagi lagi menjadi 2 kelompok berdasarkan atas banyaknya jumlah yang dibutuhkan tanaman yaitu hara makro dibutuhkan dalam jumlah yang relatif banyak, biasanya dinyatakan dalam persen per unit bahan kering (meliputi N, P, K, Ca, Mg dan S) dan hara mikro dibutuhkan dalam jumlah yang relatif sedikit, biasanya dinyatakan dalam ppm (part per million) per unit bahan kering (meliputi Fe, Mn, Zn, B, Mo, Co dan Cl) (Janick *et al*, 1974).

Salah satu metode untuk menentukan unsur hara yang esensial bagi tanaman dan berapa banyaknya adalah dengan menganalisis secara kimia semua unsur yang dikandung oleh tumbuhan sehat dan berapa banyaknya unsur itu. Salisbury dan Ross (1992) menyebutkan berdasarkan hasil analisis modern terhadap daun yang paling dekat dengan tongkol jagung muda (daun bendera) yang diambil dari daun jagung dikebun yang dipupuk dengan baik menunjukkan adanya konsentrasi 3 unsur esensial tambahan pada jagung yaitu seng, tembaga dan boron.

1.2. Fungsi Fisiologis Hara Mineral Bagi Tanaman.

Secara fisiologis unsur hara yang diserap oleh tanaman akan memiliki fungsi tertentu di dalam tanaman. Tubuh tanaman mengandung 90 jenis unsur

dalam jumlah kecil, namun dari 90 unsur itu hanya 16 unsur yang diketahui bersifat esensial (Fageria, 1984). Fungsi umum hara mineral adalah :

1. Sebagai bagian dari protoplasma dan dinding sel. Beberapa unsur hara merupakan bagian yang penting dari molekul sel (misalnya S dalam protein, P dalam ATP, Mg dalam klorofil, Ca dalam kalsium pektat).
2. Mempengaruhi permeabilitas membran sitoplasma. Ca dan unsur-unsur yang bervalensi 2 atau 3 mengurangi permeabilitas sedangkan unsur-unsur yang bervalensi 1 menambah permeabilitas.
3. Sebagai katalisator dalam reaksi kimia. Misal : Fe, Cu dan Zn merupakan bagian dari berbagai enzim (bagian prostetik), Fe sebagai bagian dari sitokrom; Mg, Mn, Co dapat mempercepat atau memperlambat reaksi-reaksi enzimatik.
4. Sebagai penyangga kemasaman sel. Kation penting sebagai sistem penyangga tumbuhan adalah K, Ca, Na dan Mg.

Pengaruh dan peranan tiap-tiap hara mineral bersifat spesifik bagi tanaman. Fungsi unsur hara makro dan bentuk yang tersedia bagi tanaman seperti pada Tabel 2, sedangkan fungsi unsur hara mikro dan bentuk yang tersedia bagi tanaman seperti pada Tabel 3.

Tabel 2. Fungsi Unsur hara makro dan bentuk yang tersedia bagi tanaman

Unsur hara	Fungsi Fisiologis	Bentuk tersedia
Carbon (C)	Sebagai komponen dasar molekuler karbohidrat, protein, lipid dan asam nukleik	CO ₂
Oksigen	Seperti halnya karbon, oksigen merupakan	O ₂

(O)	penyusun senyawa-senyawa organik tanaman	
Hidrogen (H)	Memegang fungsi sentral dalam proses metabolisme tanaman. Penting dalam keseimbangan ion dan sebagai unsure pereduksi utama (reducing agent) misalnya terlibat dalam proses reduksi nitrat menjadi amoniak.	H ₂ O
Nitrogen (N)	Komponen penyusun banyak senyawa organik penting di dalam tanaman (protein, enzim, vitamin B kompleks, hormone, klorofil).	NH ₄ ⁺ dan NO ₃ ⁻
Fosfor (P)	Berfungsi dalam transfer energi, metabolisme karbohidrat dan protein serta transport karbohidrat di dalam sel daun.	H ₂ PO ₄ ⁻ dan HPO ₄ ²⁻
Kalium (K)	Sebagai kofaktor dan aktifator enzim-enzim dalam metabolisme karbohidrat dan protein, serta membantu mengatur tekanan osmotik dan keseimbangan ion di dalam tanaman.	K ⁺
Kalsium (Ca)	Menyusun lamella tengah, menjaga kestabilan integritas membrane dan terlibat dalam proses pembelahan sel.	Ca ²⁺
Magnesium (Mg)	Komponen penyusun klorofil, bertindak sebagai kofaktor pada banyak reaksi enzimatik, berfungsi mengatur pH sel tanaman dan menjadi unsure perantara (<i>bridging element</i>) pada sintesis protein.	Mg ²⁺
Sulfur (S)	Menyusun protein, terlibat dalam masalah energi sel tanaman.	SO ₄ ²⁻ dan SO ₂

Tabel 3. Fungsi Unsur hara mikro dan bentuk tersedia bagi tanaman

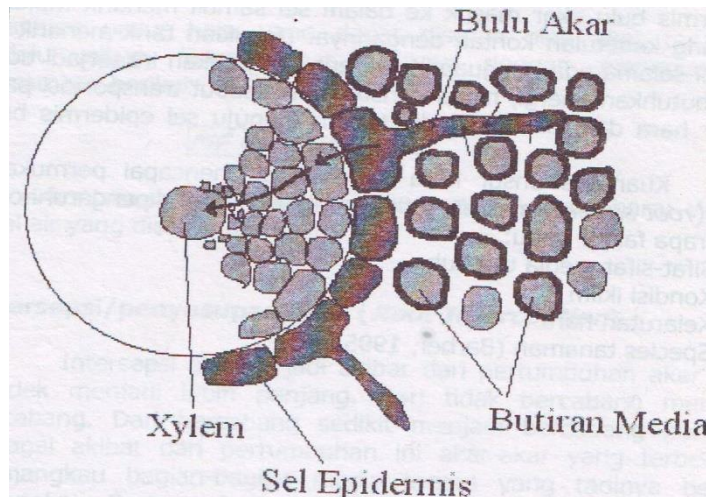
Unsur hara	Fungsi Fisiologis	Bentuk tersedia
Zat Besi (Fe)	Sebagai komponen penyusun enzim yang Fe, sebagai carrier, terlibat dalam proses	Fe ²⁺ dan Fe ³⁺

Seng (Zn)	metabolism seperti fiksasi N, fotosintesis dan transfer electron.	
Mangan (Mn)	Komponen esensial beberapa enzim seperti dehidrogenase, proteinase, peptidase, carbonic anhydrase, alcohol dehydrogenase, glutamic dehydrogenase, malic dehydrogenase.	Zn^{2+}
Tembaga (Cu)	Terlibat dalam sistem penyusunan O_2 dalam proses fotosintesis dan sebagai komponen enzim arginase dan phosphotransferase.	Mn^{2+}
Boron (B)	Sebagai penyusun beberapa enzim diantaranya cytochrome oxidase, ascorbic acid oxidase dan laccase.	Cu^{2+}
Molibdenu m (Mo)	Fungsi spesifik dari B belum diketahui secara pasti, tapi diduga terlibat dalam metabolisme karbohidrat dan mensintesis komponen-komponen penyusun dinding sel tanaman.	H_3BO_3
Klor (Cl)	Dibutuhkan dalam proses asimilasi N dalam tanaman, sebagai komponen esensial enzim nitrat reduktase dan nitrogenase (enzim fiksasi N_2).	MoO_4^{2-}
	Berfungsi sebagai aktivator enzim-enzim yang menguraikan air dalam proses fotosintesis, berfungsi dalam menjaga dan mengatur tekanan osmosis sel tanaman yang tumbuh pada kondisi tanah yang memiliki salinitas tinggi.	Cl^-

II. PERGERAKAN HARA MINERAL KE TANAMAN DAN DALAM TANAMAN

2.1. Pergerakan Hara Mineral dari Larutan Tanah ke Permukaan Akar

Organ yang berfungsi menyerap unsur hara dari media tanaman adalah akar yaitu bulu-bulu akar yang terletak beberapa millimeter di belakang ujung akar (*root tip*). Bulu akar terbentuk dari satu sel yang bentuknya sempit dan panjang Gambar 1.



Gambar 1. Skematis gerakan air dan unsur hara dari media tanam menuju xilem

Karena akar merupakan organ penyerap air dan unsur hara, maka kontak air atau unsur hara dengan permukaan sel bulu-bulu akar merupakan bagian yang sangat penting dari proses penyerapan. Ada 3 cara atau peristiwa gerakan air dan unsur hara ke permukaan sel bulu akar yaitu melalui :

1. Aliran Massa (*Mass Flow*)
2. Peristiwa Intersepsi akar (*Root Interception*)
3. Peristiwa Difusi (*Diffusion*)

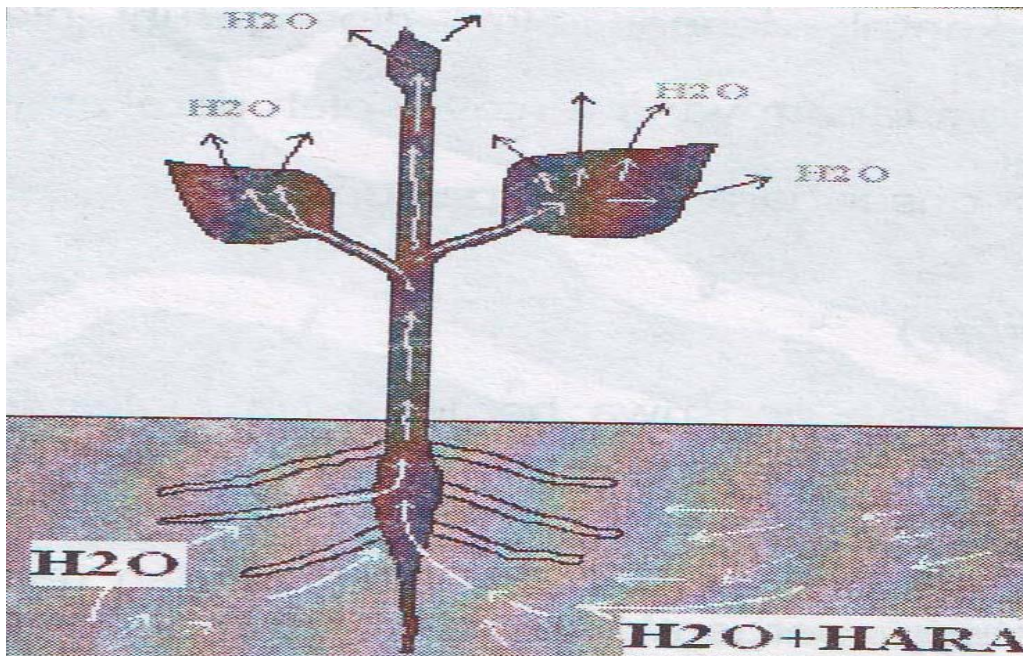
Aliran Massa (*Mass Flow*)

Aliran massa merupakan gerakan larutan hara (air dan hara mineral) ke permukaan akar yang digerakkan oleh transpirasi tanaman (Gambar 2). Hara bergerak karena ada gradien potensial air. Aliran massa terjadi akibat adanya gaya tarik menarik antara molekul-molekul air yang digerakkan oleh lepasnya molekul air melalui penguapan (transpirasi). Setiap ada molekul air yang menguap posisinya akan diisi oleh molekul air yang berada di bawahnya dan molekul air di bawahnya menarik molekul yang di bawahnya lagi sampai pada molekul air yang berada di luar sel epidermis bulu akar masuk ke dalam sel sambil menarik molekul air yang kebetulan kontak dengannya. Demikian tarik-menarik ini terjadi selama ada penguapan. Karena pergerakan ini terjadi tidak membutuhkan energi, maka peristiwa ini disebut transportasi pasif unsur hara dari larutan media tanam menuju sel epidermis bulu akar. Perhitungannya didasarkan pada konsentrasi hara dalam larutan tanah dan jumlah air yang ditranspirasikan melalui tanaman, dapat dinyatakan dalam koefisien transpirasi yaitu jumlah air yang ditranspirasikan oleh berat kering tajuk, misalnya 300-600 liter air per kilogram tajuk kering atau per hektar areal tanaman (Marschner, 1986).

Kuantitas unsur hara yang dapat mencapai permukaan akar (*root surface*) melalui peristiwa aliran massa dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu :

- a. Sifat-sifat media tumbuh
- b. Kondisi iklim
- c. Kelarutan hara
- d. Spesies tanaman

Kuantitas unsur hara yang dapat diserap oleh akar tanaman melalui aliran massa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan : $MF = C \times WU$, dimana MF = kontribusi mass flow, C = konsentrasi unsur hara, WU = total air yang diserap tanaman.



Gambar 2. Skematis gerakan air dan unsur hara melalui aliran massa.

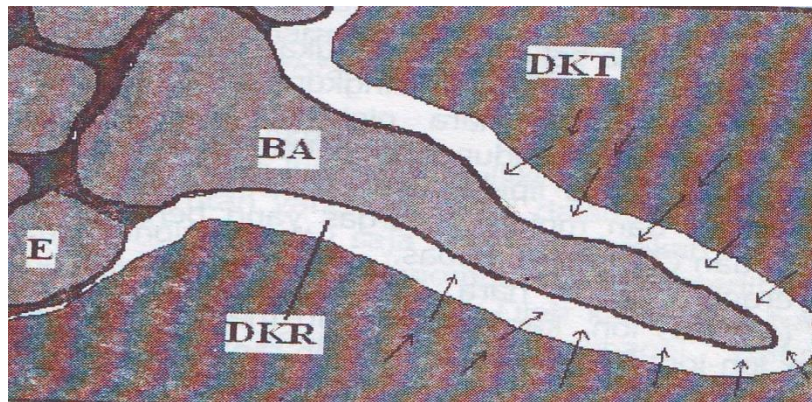
Peristiwa Difusi (*Diffusion*)

Difusi adalah peristiwa Bergeraknya molekul-molekul dari daerah konsentrasi tinggi ke daerah konsentrasi rendah (Gambar 3). Jadi gerakan molekul (hara) terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi (*concentration gradient*). Dari hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa pasokan Ca dan Mg terutama adalah melalui aliran massa, sedangkan K dan P terutama oleh difusi.

Hara yang diangkut ke permukaan akar melalui proses difusi tidak dapat dihitung secara langsung, tetapi dihitung sebagai selisih dari penyerapan hara total oleh tanaman dikurangi penyerapan oleh aliran massa dikurangi penyerapan oleh pertumbuhan akar.

Daerah rhizosfir memiliki konsentrasi lebih rendah dari pada daerah di luarnya, sehingga pergerakan unsur hara terjadi dari daerah luar rhizosfir menuju daerah rhizosfir. Akibat dari peristiwa ini unsur hara yang tadinya tidak kontak dengan akar menjadi bersinggungan dengan permukaan akar. Untuk selanjutnya penyerapan dapat dilakukan oleh akar tanaman.

Kuantitas masuknya unsur hara (flux) ke dalam tanaman mengikuti persamaan : $F = -D (K_T - K_R)$, dimana F = flux; D = koefisien difusi; K_T = konsentrasi tinggi; dan K_R = konsentrasi rendah.



Keterangan : BA = bulu akar, E = sel epidermis akar,
 DKT = daerah konsentrasi tinggi, DKR =
 daerah konsentrasi rendah (rozosfir), dan
 arah gerakan unsure hara



Gambar 3. Skematis terjadinya gerakan air dan unsur hara melalui difusi

Peristiwa Intersepsi/Penyusupan akar (*Root Interception*)

Intersepsi akar terjadi akibat dari pertumbuhan akar dari pendek menjadi lebih panjang. Dari tidak bercabang menjadi bercabang. Dari bercabang sedikit menjadi bercabang banyak. Sebagai akibat dari pertumbuhan ini akar-akar yang terbentuk menjangkau bagian-bagian media tanam yang tadinya belum terjangkau. Bertambahnya jangkauan tentu saja bertambah pula unsur hara yang bisa kontak dengan permukaan bulu-bulu akar dan selanjutnya dapat diserap oleh akar tanaman. Unsur hara yang berhasil kontak dengan akar dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain :

- a. Volume media tanam yang tercover oleh perakaran.
- b. Morfologi akar

c. Konsentrasi unsur hara yang tersusupi.

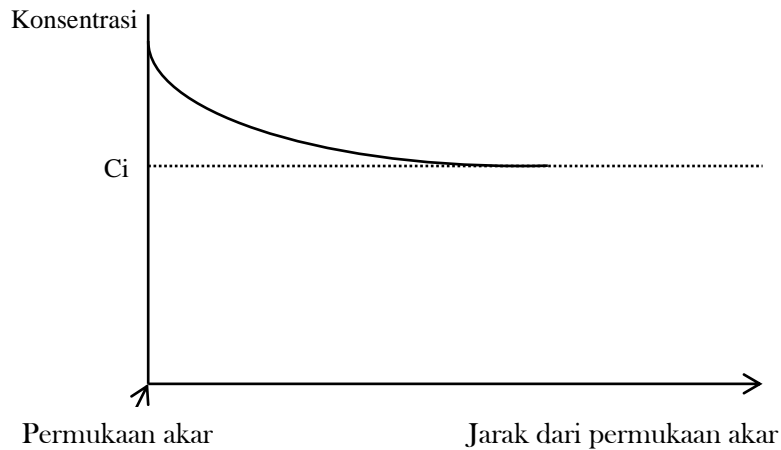
Karena banyaknya kritik-kritik yang menyatakan bahwa penyerapan hara melalui pertumbuhan akar sebenarnya adalah penyerapan melalui difusi biasa, maka akhir-akhir ini tekanan pembahasan mengenai gerakan hara ke permukaan akar lebih difokuskan pada aliran massa dan difusi biasa (Marschner, 1986).

Setelah sampai di permukaan akar, maka hara akan masuk ke dalam akar melalui berbagai proses. Banyaknya hara yang masuk ke dalam akar (F_u) terutama dipengaruhi oleh konsentrasi hara di permukaan akar (C_r). Berdasarkan selisih hara yang datang ke permukaan akar (pasokan) dengan banyaknya hara yang masuk ke akar, dapat terjadi zone penimbunan/*accumulation zone* (tertimbunnya hara di permukaan akar) dan zone pengurasan (*depletion zone*) di permukaan akar. Bila diumpamakan bahwa F_u = banyaknya hara yang masuk ke akar, F = pasokan/masukan hara ke permukaan akar, dan C_r = konsentrasi hara di permukaan akar, maka :

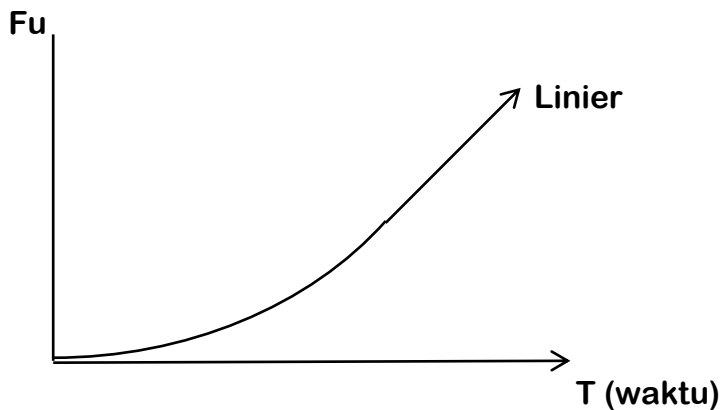
$$C_r = F - F_u$$

Bila $F > F_u$ maka terjadi zone penimbunan (*accumulation zone*) di permukaan akar, sedangkan apabila $F < F_u$ maka terjadi zone pengurasan (*depletion zone*) di permukaan akar. Berdasarkan atas hal ini, maka ditinjau dari proses masuknya hara, dapat dijelaskan sebagai berikut:

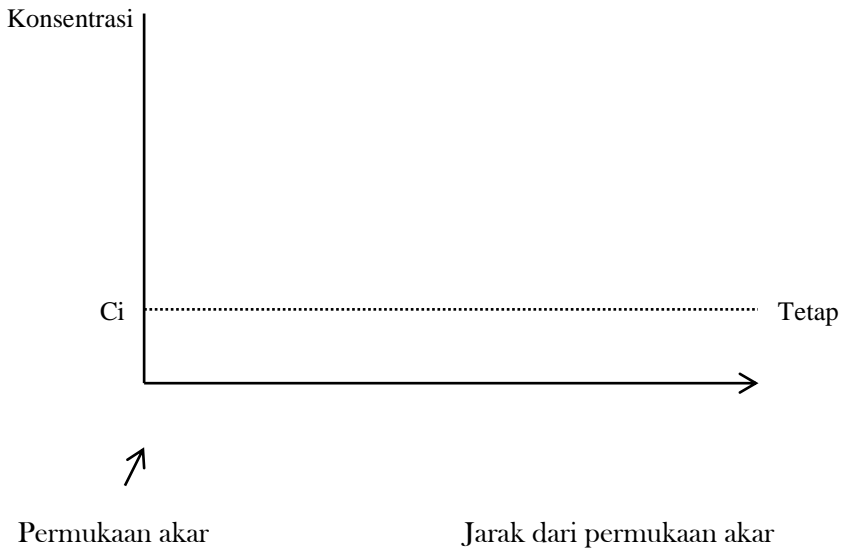
- (a) Keadaan $F < F_u$ atau penyerapan hara lebih cepat daripada masukan hara ke permukaan akar (*resupply*) terjadi bila gerakan hara terutama melalui



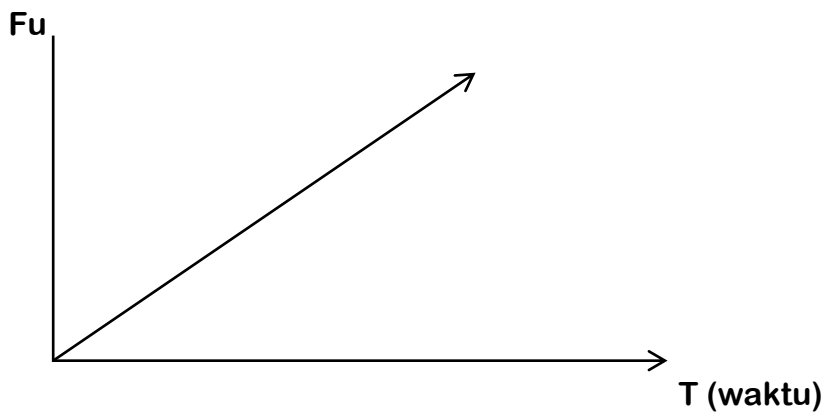
Gambar di atas menunjukkan bahwa penyerapan lebih lambat dari pasokan (resupply), akhirnya terjadi zone penimbunan. Kurve penyerapan (F_u) terhadap waktu (t) akhirnya juga linier seperti di bawah ini.



(c) Keadaan $F = F_u$ atau laju penyerapan sama dengan laju masukan hara ke permukaan akar. Dalam hal ini konsentrasi hara di permukaan akar tetap dengan konsentrasi hara dalam larutan tanah, oleh karena penyerapan tepat sama dengan suplai hara ke permukaan akar.



Dalam keadaan penyerapan sama dengan pasokan (resupply) maka konsentrasi hara di permukaan akar sama dengan dalam larutan tanah, sehingga fungsi F_u terhadap waktu bersifat linier mulai dari awal seperti gambar berikut.



Dari suatu perhitungan yang mempelajari penyerapan K oleh perakaran jagung, diperoleh hasil sebagai berikut :

- Transpirasi melalui daun jagung adalah $2.500 \text{ M}^3/\text{ha}$ selama umur jagung. Larutan tanah kebun jagung tersebut mengandung rata-rata 4 ppm K atau 4 mg K/lit atau 4 gram/ M^3 . Jadi dalam 2.500 M^3 larutan terdapat $4 \times 2.500 \text{ gr/Ha} = 10.000 \text{ gr/Ha} = 10 \text{ kg/Ha}$.
- Padahal seluruh jagung yang dipanen (termasuk daun, akar, batang) mengandung kurang lebih 100 kg. K/ha. Jadi ada selisih $100 - 10 = 90 \text{ kg K/Ha}$, yang masuk ke dalam tanaman tidak melalui aliran massa, jadi tidak disebabkan oleh transpirasi.
- Volume akar jagung rata-rata adalah 1 % (antara 0,4 – 2 %) dari volume tanah. Bila diasumsikan bahwa K menyebar rata maka hanya 1 % dari K tanah yang langsung menempel pada akar jagung.
- Kadar K tersedia dalam tanah kebun jagung berkisar antara 100-300 kg/Ha. Jadi K yang langsung menempel pada akar jagung adalah $1\% \times 100 - 300 \text{ K/Ha} = 1 - 3 \text{ kg/Ha}$. Jadi K yang diserap oleh karena kontak langsung antara akar dan hara, yaitu yang diserap karena pertumbuhan akar adalah sekitar 1 – 3 kg K/Ha dibuktikan 5 kg K/Ha.
- Dari perhitungan-perhitungan di atas tampak bahwa dari 100 kg/K yang terdapat dalam tanaman jagung/Ha, 10 kg/Ha didapat dari transpirasi, 5 kg/ha karena pertumbuhan akar dan 85 kg K/Ha karena difusi.

Nyata bahwa difusi adalah proses terpenting dalam penyerapan hara akar, karenanya jelas keadaan hara sekitar akar tidak sama dengan keadaan hara dalam tanah pada umumnya. Bila 85 % dari K yang diserap akar adalah melalui proses difusi, maka konsentrasi K di sekitar akar harus jauh lebih rendah dari

pada konsentrasi larutan K tanah pada umumnya, sehingga terjadi gradient konsentrasi yang besar.

2.2. Angkutan Hara ke Tengah Akar

Angkutan hara ke tengah akar dapat melalui 2 jalur, yaitu : (1) Apoplastik yaitu angkutan hara melalui daerah bebas (DB) diantara sel-sel akar; dan (2) Simplastik yaitu angkutan hara melalui plasmodesmata (benang-benang protoplasma yang menghubungkan sel satu dengan yang lain, dengan menghindari vacuola.

Larutan hara secara bebas bergerak menuju ke permukaan akar melalui difusi dan aliran massa. Hara dan senyawa dengan berat molekul (BM) kecil bahkan secara bebas dapat masuk sampai ke sel kortek yang berisi air secara difusi. tetapi senyawa dengan BM tinggi (kelat logam, molekul racun, virus dan kuman-kuman patogen) terhambat oleh kecilnya pori-pori atau diameter sel akar.

Daerah akar yang dapat dimasuki hara secara pasif disebut Daerah Bebas (DB) atau Affarent Free Space. Space atau ruang itu meliputi Rhizodermis dan kortek akar, meliputi $\pm 10\%$ dari total volume akar. Gerakan pasif terhenti sampai sel kortek terdalam (endodermis) yang dindingnya dilapisi suberin yang kedap air disebut Kasparian Strip. Lapisan ini menghalangi hara masuk ke tengah akar secara pasif, kecuali pada ujung akar dimana diferensiasi sel belum sempurna dan pada pangkal akar dimana akar lateral menembus endodermis

sehingga terjadi kebocoran. Gerakan ion hara dan molekul dengan BM tinggi terhambat masuk DB karena :

- (a) Diameternya > dari diameter pori sel akar
- (b) Diameter pori sel akar ± 5 nm. Ion K^+ dan Ca^{++} mudah masuk DB karena diameternya hanya $\pm 0,7$ nm.
- (c) Di Daerah DB permukaan dinding sel akar penuh dengan gugus COO^- . Gugus itu bertindak sebagai daerah tukar kation (KTK). Jadi akar memiliki KTK, dimana KTK sel akar tersebut identik dengan KTK tanah. Dengan memiliki KTK, sel akar mangabsorpsi kation, tetapi menolak anion. Besarnya KTK daerah Bebas Sel Akar tergantung jenis tanamannya. contoh : KTK dikotil > KTK monokotil.

Penyerapan/absorpsi hara oleh akar, dapat terjadi secara :

- (a) Aktif (Simplastik) : perlu energi dari respirasi atau fotofosforilasi
- (b) Pasif (Apoplastik), melalui dua cara, yaitu :
 - (1) Secara difusi di daerah Water Free Space (WFS) atau Outer Space (OS).
 - (2) Pertukaran ion di daerah Donan Free Space (DFS)

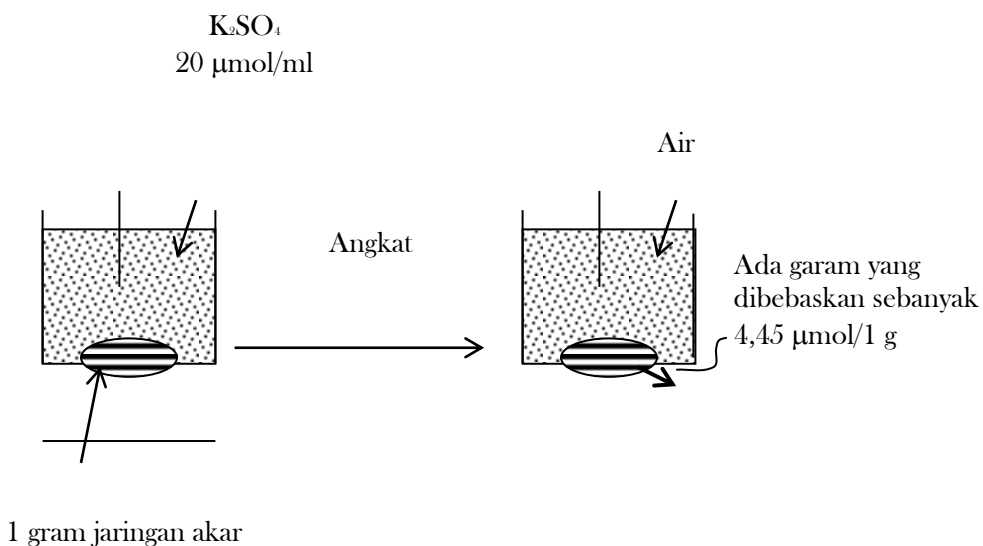
$$DB (AFS) = WFS (OS) + DFS$$

WFS = daerah di akar dimana hara dapat masuk dengan bebas secara difusi biasa

DFS = daerah di akar dimana hara masuk karena pertukaran kation (*cation exchange*)

Contoh hasil percobaan Epstein (1955) yang membuktikan pasif difusi biasa dan pasif pertukaran ion adalah sebagai berikut.

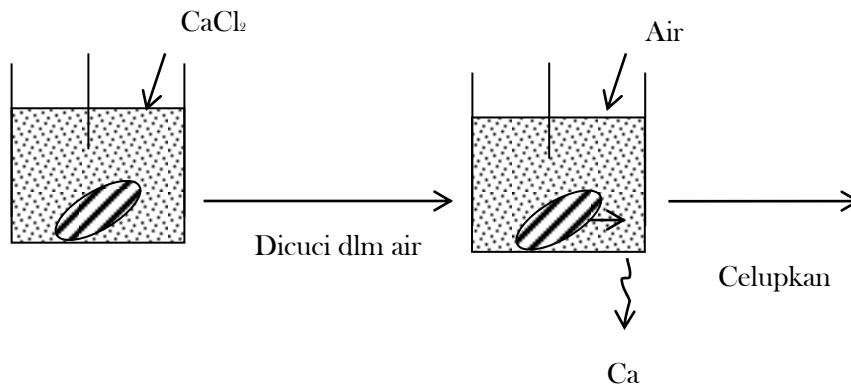
(1) Membuktikan pasif difusi biasa



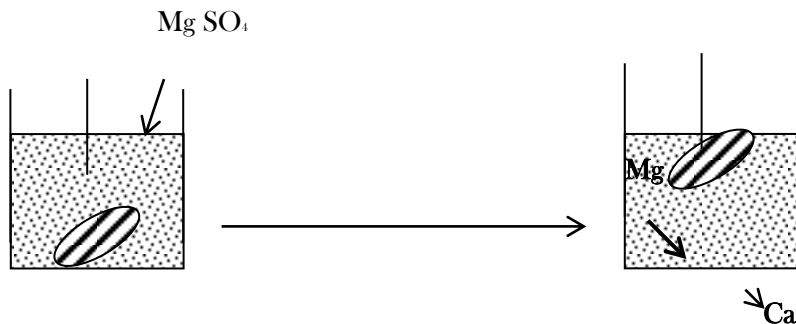
$$\text{WFS} = \frac{\text{ion hara yang berdifusi (ml)}}{\text{Konsentrasi larutan garam di bagian luar sel (g)}}$$

$$= \frac{4,45 \mu\text{mol/1 g}}{20 \mu\text{mol/ml}} = 0,22 \text{ ml/g}$$

(2) Membuktikan pasif pertukaran ion



Ca yang ada di OS akan keluar (yang berasal dari difusi)



Ca yang keluar dari wadah terakhir adalah Ca yang menempati daerah DFS (masuk karena pertukaran difusi), sedangkan Ca yang keluar karena pencucian dalam air : menempati WFS (masuk karena difusi biasa)

2.3. Masuknya Hara ke Xylem Akar

Setelah sampai di tengah akar, hara harus masuk ke xylem akar agar dapat ditranslokasikan ke tempat-tempat yang membutuhkan. Teori masuknya hara ke xylem diantaranya :

- (1) Teori Craft dan Broyer : hara diangkut secara aktif simplastik melalui sel kortek ke sel endodermis, kemudian “ bocor” ke xylem
- (2) Teori Lauchli : ion hara masuk ke xylem secara aktif dengan model 2 pompa. Satu di rhizodermis dan kortek, dan satu lagi di perbatasan xylem.

Angkutan hara menembus membran

Menurut teori alat pengangkut, angkutan hara menembus membran melibatkan semacam alat angkut (carrier) yang mengikat ion-ion tertentu, membawanya melintas membran dan melepas ion-ion tersebut disisi lain dari membran dengan energi (ATP) dari proses respirasi atau dari proses fotofosforilasi pada sel berklorofil. Angkutan ion hara menembus membran berlawanan arah dengan gradien konsentrasi, melibatkan energi atau semacam pompa pada membran. Jadi sifatnya aktif. Pada angkutan pasif, konsentrasi ion hara dalam sel lebih kecil dibandingkan konsentrasi ion hara di luar sel.

Faktor-faktor yang mempengaruhi penyerapan hara adalah :

1. Sifat fisikokimia ion. Ion dengan valensi sama, laju penyerapannya berkorelasi negatif dengan jari-jari ion (r). Contoh : Li, Na, dan K dengan r masing-masing 0,38; 0,36; dan 0,33 nm laju penyerapannya berturut-turut 2; 15 dan 26 $\mu\text{mol/g}$ akar segar/3 hari. Laju penyerapannya semakin menurun dengan makin tinggi muatannya, karena muatan yang lebih tinggi menyebabkan interaksinya dengan muatan membran meningkat. Dengan kata lain : laju penyerapan molekul tak bermuatan \gg kation $(+)$ / anion $(-)$ \gg kation $(+2)$ /anion (-2) \gg kation $(+3)$ /anion (-3) .

2. Interaksi antar ion. Interaksi antar ion ada yang interaksi kompetisi dan interaksi sinergisme. Pada interaksi kompetisi, ion dengan jari-jari dan valensi sama atau hampir sama akan berkompetisi atau bersaing masuk ke sel akar. Contoh :

1. Jari-jari K^+ mirip dengan Rb^+ , padahal dalam metabolisme Rb^+ tidak dapat menggantikan K^+ . Bila K^+ dan Rb^+ sama-sama ada dalam larutan tanah, Rb^+ menghambat penyerapan K^+ karena alat angkut pada membran sel akar rupanya tidak bisa membedakan antara K^+ dengan Rb^+ .

2. Na^+ , Cs^+ dan K^+ walaupun valensinya sama, namun afinitas K^+ terhadap alat angkut jauh lebih besar dari yang lain. Oleh karena itu K^+ menang dalam kompetisi.

3. Mg^{+2} penyerapannya dihambat oleh Ca^{+2} karena afinitas Mg^{+2} terhadap alat angkut lebih rendah.

4. Kompetisi antar anion terjadi antara NO_3^- dan Cl^- . Bila Cl^- tinggi, serapan NO_3^- turun dan sebaliknya.

Kompetisi menggambarkan selektivitas membran tidak berdasarkan atas kebutuhan hara tanaman untuk metabolisme, tetapi didasarkan atas kemiripan fisik dan kimia ion hara yang bersangkutan. Artinya adalah tanaman tidak dapat menghindari penyerapan ion-ion hara yang tidak bermanfaat karena secara fisik dan kimia ion-ion tersebut mirip. Pada interaksi sinergisme, terjadi rangsangan penyerapan ion oleh ion lainnya dan rangsangan penyerapan kation oleh anion atau sebaliknya. Contoh :

1. Pada pH rendah disertai tidak ada Ca^{+2} , terjadi hambatan penyerapan K^+ oleh H^+ karena kompetisi. Dengan adanya Ca^{+2} pada pH rendah tersebut terjadi rangasangan penyerapan K^+ . Disini Ca^{+2} mengimbangi pengaruh negatif H^+ .
2. Pada pH tinggi : peranan Ca^{+2} untuk merangsang penyerapan K^+ menurun, bahkan menghambat karena terjadi kompetisi.
3. Pada tanah dengan kadar garam rendah, Ca^{+2} meningkatkan penyerapan K^+ dengan meningkatkan influx, selanjutnya pada tanah salin (kadar garam tinggi) Ca^{+2} meningkatkan penyerapan K^+ dan menurunkan penyerapan Na^+ .

Tabel 4. Pengaruh Ca^{+2} terhadap serapan K^+ dan Cl^- akar barley pada tanah kadar garam rendah (*low salt*)

Larutan luar (mM)	Laju penyerapan (μ eq/g berat basah/2 hari)			
	K^+ influx	K^+ net uptake	Cl^- influx	Cl^- net uptake
0,1 KCl	116 ± 3	117 ± 6	35 ± 1	34 ± 4
0,1 KCl + 1,0 CaSO_4	137 ± 2	140 ± 7	53 ± 3	52 ± 4

Tabel 5. Pengaruh Ca^{+2} terhadap laju serapan Na^+ dan K^+ pada jagung dan bit gula

Larutan luar NaCl + KCl (10 meq/lit)	Laju serapan (μ eq/g berat basah/4 hari)					
	Jagung			Bit Gula		
	Na ⁺	K ⁺	Na ⁺ + K ⁺	Na ⁺	K ⁺	Na ⁺ + K ⁺
- Ca	9,0	11,0	20,0	18,8	8,3	27,1
+ Ca (1 meq CaCl ₂ /lit)	5,9	15,0	20,9	15,4	10,7	26,1

4. Konsentrasi Larutan Luar. Konsentrasi larutan luar meningkat, maka penyerapan hara juga ikut meningkat
5. Konsentrasi hara internal. Umumnya makin tinggi konsentrasi hara tertentu dalam jaringan tanaman (status nutrisi tanaman tinggi) laju penyerapannya semakin menurun. Mungkijn karena : bocor, alat angkut mengangkut kembali hara tersebut keluar dan tekanan osmotik meningkat kemudian turgor menurun sehingga sel tidak efektif lagi.

Besarnya Penyerapan Hara antara Ujung Akar dan Pangkal Akar

Walaupun pangkal akar masih mampu menyerap hara, namun umumnya laju penyerapan hara dari ujung ke pangkal semakin menurun. Faktor-faktor yang menentukan, karena pada pangkal akar telah terjadi :

- (1) Pembentukan suberin (gabus) pada rhizodermis
- (2) Pembentukan endodermis sekunder dan tersier yang menyebabkan hambatan angkutan hara secara radial ke stele
- (3) Degenerasi sel-sel kortek menjadi aerenchyma.

2.4. Gerakan Hara Mineral dalam Xylem

Walaupun hara selalu bergerak dalam air, namun pola gerakan hara sama sekali berbeda dengan pola gerakan air terutama dalam sel-sel hidup seperti sel-sel mesofil dan sel-sel floem. Tetapi dalam pembuluh xylem, hara banyak bergerak secara pasif ke dalam pucuk bersama-sama dengan air mengikuti aliran transpirasi atau oleh tekanan akar. Dengan kata lain, hara bergerak dalam xylem secara pasif (aliran massa) bersama air mengikuti aliran transpirasi. Hal tersebut terjadi karena ada gradien Potensial Air (PA), dimana $PA_{udara} \ll PA_{sel\ daun} \ll PA_{xylem} \ll PA_{sel\ akar} \ll PA_{larutan\ tanah}$. Ini terutama terjadi pada siang hari dan satu arah. Angkutan hara dalam xylem terutama apoplastik.

Sejara setelah air masuk ke dalam pembuluh xylem, hara akan ikut aliran air ke pucuk melalui aliran massa. Dalam keadaan normal, transpirasi merupakan proses yang sangat boros air. Untuk membentuk bahan kering 1 kg, maka jumlah air yang melewati pembuluh xylem karena transpirasi berkisar antara 200-1.000 liter. Namun demikian transpirasi merupakan proses yang penting, karena punya 3 manfaat utama yaitu : (1) mempertahankan sel-sel daun agar tetap basah sehingga fotosintesis berjalan lancar; (2) untuk memompa air naik dari akar ke daun; dan (3) merupakan penyangga suhu daun.

Struktur pembuluh xylem terdiri dari sel-sel mati yang dinding sampingnya penuh noktah, sedangkan dinding atas dan bawahnya hilang sehingga pembuluh xylem sebenarnya terdiri atas seberkas pipa-pipa yang dindingnya penuh dengan pori-pori. Dinding bagian dalam terdapat muatan negatif, dapat

menyerap kation sehingga mempunyai bidang jerapan atau punya Kapasitas Tukar Kation (KTK). KTK xylem identik dengan KTK DB akar.

Gerakan hara ke atas karena pertukaran kation (cation exchange). Kation divalen dijerap lebih kuat dari monovalen (Ca^{+2} , Zn^{+2} >> K^+ , Na^+). Bila semua muatan negatif sudah penuh atau kation yang dijerap sama dengan kation yang naik ke atas maka laju masuknya ion ke xylem sama dengan yang di lepas ke pucuk. Namun, kation-kation dalam bentuk yang dikelat (contoh : Fe-EDTA) dan Ca-EDTA dapat bergerak lebih lancar karena muatan Fe tidak efektif.

Dalam perjalanannya dalam xylem, hara mengalami 3 proses penting, yaitu : pertukaran adsorpsi, resorpsi dan sekresi (pelepasan).

Pertukaran Adsorpsi.

Pertukaran adsorpsi terjadi pada bidang jerapan xylem, dimana kation tertentu mendesak posisi kation lain pada KTK dinding sel xylem sehingga kation lain tersebut bergerak ke atas menuju ke bagian tanaman yang membutuhkan. Dengan adanya pertukaran adsorpsi ini, laju gerakan kation dalam xylem ditentukan oleh :

- a. Valensi kation (Ca^{+2} , K^+)
- b. Konsentrasi hara
- c. Adanya ion kompetitor
- d. Besarnya KTK xylem (dikotil >> monokotil)

Contoh hasil penelitian pertukaran adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 6 mengenai pengaruh kation-kation lain dan eksudat akar terhadap pengangkutan Ca selama 24 jam pada buncis tanpa akar (*derooted*) (Marschner, 1986).

Tabel 6. Pengaruh kation-kation lain dan eksudat akar terhadap pengangkutan Ca selama 24 jam pada buncis tanpa akar (*derooted*)

Bagian tanaman	Bagian bawah stek diberikan		
	Hanya CaCl ₂	CaCl ₂ plus Ca ⁺² , Mg ⁺² , K ⁺ , dan Na ⁺	CaCl ₂ plus eksudat akar
Daun primer	0,04	4,7	1,8
12-18 cm dari batang	7	19	11
8-12 cm dari batang	28	56	40
4-8 cm dari batang	84	57	61
0-4 cm dari batang	159	81	81

Resorpsi

Resorpsi adalah diserapnya hara secara aktif oleh sel-sel hidup disekitar xylem sepanjang perjalanan hara tersebut dalam xylem. Sel hidup dekat xylem merupakan sel pertama yang menyerap secara selektif. Jadi konsentrasi ion tertentu menurun mulai dari akar ke pucuk. Keadaan seperti ini menyebabkan air yang keluar dari hidatoda melalui gutasi hanya berupa air murni.

Tanaman natrofobik (suka Na⁺) contohnya kacang-kacangan memiliki daya resorpsi tinggi terhadap Na sehingga Na banyak ditahan di akar dan pangkal batang. Sebaliknya tanaman Hidrofilik (tidak suka Na⁺), resorpsi terhadap Na kecil sehingga Na banyak sampai di daun. Makanan ternak menghendaki Na tinggi (Na daun >> 0,2%) sehingga yang baik dipilih adalah jenis hidrofilik. Contoh hasil penelitian resorpsi dapat dilihat pada distribusi Mo pada buncis dan tomat seperti Tabel 7.

Tabel 7. Distribusi Mo pada buncis dan tomat

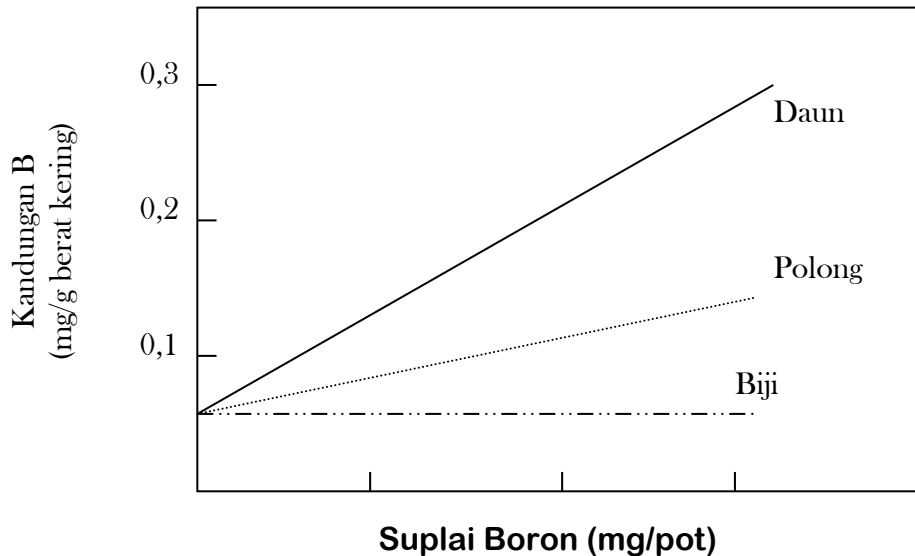
Bagian tanaman	Kandungan Mo (mg/g berat kering)	
	Buncis	Tomat
Daun	85	325
Batang	210	123
Akar	1030	470

Sekresi Hara

Perubahan komposisi hara selama perjalanannya dalam xylem karena adanya pelepasan (sekresi) hara dari sel-sel sekitar pembuluh xylem menuju ke xylem. Proses sekresi sangat penting untuk menjamin kesinambungan pasokan hara ke titik tumbuh. Bila pasokan hara dari akar banyak, kelebihanannya disimpan di sel-sel sekitar pembuluh xylem dan sebaliknya.

Distribusi hara di pucuk dipengaruhi oleh adanya transpirasi. Pengaruh transpirasi terhadap distribusi hara di pucuk terutama ditentukan oleh laju transpirasi. Dalam hal ini bagian atau organ tanaman yang laju transpirasinya lebih tinggi umumnya mendapat hara lebih tinggi. Tanaman parasit dapat hidup pada tanaman inangnya karena laju transpirasi tanaman parasit lebih tinggi dari tanaman inangnya. Hal ini disebabkan potensial airnya lebih rendah, sehingga dengan mudah dapat menyerap air dan hara dari tanaman inangnya. Contoh hasil penelitian laju transpirasi terhadap kandungan boron pada berbagai organ tanaman "Rape" menunjukkan bahwa kandungan boron pada biji lebih sedikit dibandingkan dengan di polong dan kandungan boron di polong lebih sedikit dibandingkan dengan di daun (Gambar 4) karena laju transpirasi biji lebih kecil dari laju transpirasi polong, demikian pula laju transpirasi polong lebih kecil dari

laju transpirasi daun. Pada daun keracunan boron (nekrosis) pada tepi-tepi daun terjadi karena laju transpirasi tangkai daun lebih kecil dibandingkan dengan daun bagian tengah dan laju transpirasi daun tengah lebih kecil dibandingkan daun bagian ujung (Marschner, 1986).



Gambar 4. Perbedaan kandungan Boron di biji, polong dan daun tanaman rape karena pengaruh perbedaan transpirasi.

Laju penyerapan air oleh akar (transport jarak pendek) dan perjalanannya dalam xylem (transport jarak jauh) ditentukan oleh tekanan akar dan laju transpirasi. Pengaruh transpirasi terhadap penyerapan dan translokasi hara ditentukan oleh :

- a) Umur tanaman. Umur muda (kecambah dan tanaman muda) luas daunnya rendah, laju transpirasinya rendah sehingga angkutan hara tergantung pada tekanan akar.

- b) Waktu. Pada siang hari transpirasi tinggi sehingga peranan penyerapan hara lewat transpirasi penting. Menjelang petang transpirasi makin menurun sehingga aliran hara makin tergantung tekanan akar.
- c) Jenis hara. Peranan transpirasi lebih besar pada hara yang tidak bemuatan dibandingkan dalam bentuk ion.
- d) Konsentrasi larutan luar. Makin tinggi konsentrasi larutan luar, peranan transpirasi makin besar.

Tabel 8 menunjukkan pengaruh laju transpirasi pada penyerapan dan translokasi hara K dan Na pada tanaman gula bit. Tabel tersebut menunjukkan bahwa penyerapan dan translokasi K tidak dipengaruhi oleh laju transpirasi rendah atau tinggi, sedangkan penyerapan dan translokasi Na berbeda antara laju transpirasi rendah dan laju transpirasi tinggi.

Tabel 8. Pengaruh laju transpirasi pada penyerapan dan translokasi hara K dan Na pada tanaman gula bit.

Konsentrasi larutan luar (mM)	K		Na	
	Transpirasi rendah	Transpirasi tinggi	Transpirasi rendah	Transpirasi tinggi
	Laju penyerapan ($\mu\text{mol}/\text{tanaman}/4 \text{ hari}$)			
1 K ⁺ + 1 Na ⁺	4,6	4,9	8,4	11,2
10 K ⁺ + 10 Na ⁺	10,3	11,0	12,0	8,1
	Laju translokasi ($\mu\text{mol}/\text{tanaman}/4 \text{ hari}$)			
1 K ⁺ + 1 Na ⁺	2,9	3,0	2,0	3,9
10 K ⁺ + 10 Na ⁺	6,5	7,0	3,4	8,1

2.5. Gerakan Hara dalam Floem

Angkutan hara dalam floem dapat diketahui antara lain berdasarkan analisa larutan dalam floem. Mobilitas hara dalam floem berbeda menurut jenis

haranya. Berbeda halnya dengan gerakan/angkutan hara dalam xylem yang selalu satu arah mengikuti transpirasi, angkutan dalam floem adalah dua arah yaitu dari sumber (*source*) ke wadah (*sink*) dan digerakkan secara aktif.

Pembuluh floem tersusun dari sel-sel hidup, terdiri atas pembuluh tapis, sel-sel pelengkap, dan sel-sel parenchyma. Sel-sel pembuluh tapis punya lapisan sitoplasma tipis disebut Protein-P menghubungkan sel tapis satu dengan yang lainnya. Jadi pola angkutan dalam floem mirip dengan pola pada simplas. Kalau pada simplas melalui plasmodesmata, sedangkan floem melalui protein-P. Lubang pada piringan tapis dilapisi Kalos (Callose), yaitu karbohidrat terdehidrasi. Kalos tsb mengendalikan aliran floem dengan cara membengkak sehingga menutup jalur floem. Pemblokiran dirangsang oleh faktor luar seperti peningkatan suhu mendadak (terbakar) dan luka mekanis. Faktor tersebut mengaktifkan pembengkakan sehingga lubang tertutup. Komposisi isi floem berdasarkan hasil analisis yang dilakukan para peneliti adalah :

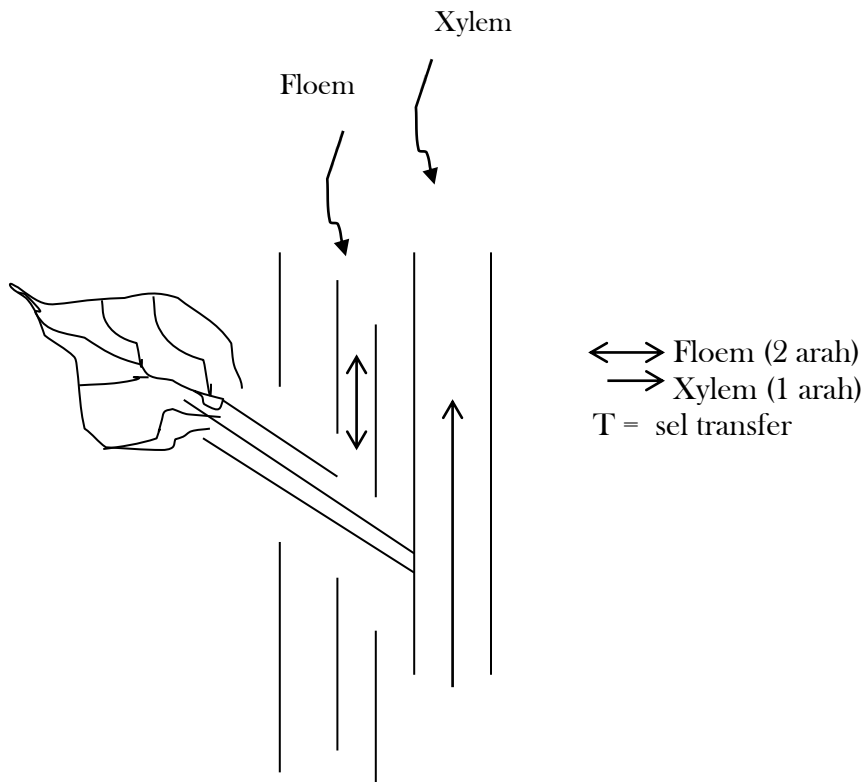
1. Komponen utama adalah sukrosa > 90% bahan padat
2. Bahan kering 15-25%
3. Kemasaman (ph) 7-8
4. Kandungan asam organik dan n-organik tinggi, terutama asam amino dan amida
5. Kandungan k>p>mg>s tereduksi. Kandungan ca selalu rendah
6. Kandungan semua padatan floem >>> xylem kecuali ca
7. Kation an-organik >> anion anorganik

Berdasarkan analisis isi floem dan percobaan perunutan dengan unsur radioatif (seperti ³²P dan ²²Na), mobilitas hara dalam floem dapat diklasifikasikan:

1. Hara mobil dalam floem: P, K, Mg, S, Na, Rb, Cl
2. Intermediet (setengah mobil): Fe, Zn, Co, Mn, Mo
3. Immobil/tidak mobil: Ba, Li, Ca, B, Sr

Dalam kaitan ini dua catatan yang perlu diperhatikan yaitu : (1) walaupun Ca ada dalam floem tetapi dia tidak mobil; dan (2) Boron tidak mobil dalam floem tetapi dapat mobil bila dibutuhkan oleh buah yang sedang membesar. Misalnya ke dalam polong kacang tanah dan buah apel.

Angkutan dalam floem merupakan angkutan jarak jauh (*long distance transport*). Arah angkutan dalam floem terdiri dari 2 arah, yaitu dari “source” (daun) ke “sink” (akar, pucuk, buah, biji) sebagai tempat pembongkaran isi floem; serta dari tempat-tempat tertentu ke daun. Sumber hara adalah apoplast stele akar, xylem batang dan daun, dan sel-sel daun, terutama pada saat adanya remobilisasi hara.



Antara pembuluh floem dan xylem hanya dipisahkan oleh beberapa lapis sel saja, dan hal itu memungkinkan terjadinya transfer hara dari xylem ke floem. Proses transfer tersebut berlangsung secara aktif melalui sel transfer. Transfer hara dari xylem ke floem mempunyai peranan sangat penting karena aliran hara dalam xylem tidak menuju ke bagian-bagian yang membutuhkan hara, tetapi menuju ke bagian-bagian atau organ yang laju transpirasinya tinggi. Rembesan dari floem ke xylem juga telah ditemukan pada gandum setelah antesis.

Penyerapan hara ke daun dapat hanya melalui xylem atau bersama-sama melalui xylem dan floem. Hal tersebut telah ditemukan pada penyerapan hara K pada tanaman jelai seperti Tabel 9. Tabel 9 tersebut menunjukkan bahwa selama pembesaran daun, penyerapan K dapat melalui xylem dan floem. Makin

tua umur daun, angkutan K lewat floem berkurang. Pada daun tua, daun dipasok kebutuhan K-nya oleh xylem dan pada saat yang sama ada sejumlah K yang pergi (mengalami remobilisasi) dari daun melalui floem.

Tabel 9. Laju penyerapan K ke daun lewat xylem dan floem pada tanaman jelai

Angkutan melalui	Umur daun		
	Muda	Setengah Umur	Tua
Xylem	2,0	2,7	1,9
Floem	1,3	0,7	-1,6
Total	3,3	3,4	0,3

2.6. Penyerapan Hara Lewat Daun dan Translokasinya

Peranan daun dalam menyerap substansi dari udara tidak hanya penting untuk nutrisi tanaman itu sendiri, tetapi juga penting bagi siklus global elemen-elemen tertentu yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman. Penyerapan hara melalui daun sangat ditentukan oleh struktur daun dan komponen-komponennya dan permeabilitas kutikel.

Bagi tanaman air, penyerap hara utama adalah daun, sedangkan tanaman darat (terrestrial plant) penyerap hara utama adalah akar. Daun tanaman darat juga bisa menyerap hara tetapi sangat dibatasi oleh dinding sel epidermis bagian luar. Dinding itu diselubungi lapisan kutikula mengandung lilin, pectin, hemiselulosa dan selulosa. Dinding sel bagian luarnya hidrofobik, sedangkan bagian dalamnya hidrofilik. Fungsi lapisan hidrofilik dinding sel adalah : (a) fungsi utama, melindungi daun dari kehilangan air dari transpirasi berlebihan,

dan (b) fungsi tambahan, melindungi tercucinya senyawa organik dan anorganik oleh air hujan. Kedua fungsi tersebut tergantung kondisi iklim.

Kutikula menutupi seluruh permukaan daun termasuk lubang stomata dan bulu-bulu daun (trichomes) sehingga bersifat sebagai penghalang pertama absorpsi. Penetrasi lewat kutikula melalui difusi. Permeabilitas kutikula tergantung pada stadia perkembangan daun. Daun muda lebih mudah ditembus karena kutikulanya masih hidrofilik, sedangkan daun tua bersifat hidrofobik. Urutan penetrasi lewat daun menurut Haile-Mariam (1965, dalam Esptein, 1972) : $Cs=Rb>K>Na=Ba>Sr>Ca$, dan penetrasi molekul besar (kelat logam, virus, dan lain-lain) lewat kutikula sulit. Jadi sama dengan di akar.

Pada daun terdapat ectodesmata, yaitu semacam lubang atau saluran tempat Bergeraknya hara dan zat terlarut menyeberangi lapisan kutikula. Ectodesmata tidak berplasma (non-plasmatic), berguna pula bagi jalur transpirasi kutikula (transpirasi peristomata) dan halangan penetrasi pada bagian kutikula adalah berbeda pada bagian berbeda.

Penetrasi masuknya hara pada kutikula lebih kecil daripada bila hara masuk lewat stomata. Berdasarkan hal itu, penetrasi hara ke dalam jaringan daun melalui stomata terbuka tidak bisa berlangsung dengan mudah karena lapisan kutikula juga menutupi permukaan sel jaga (*guard cell*) pada lubang stomata. Hal tersebut terbukti bahwa laju penyerapan ion pada penyemprotan lewat daun lebih tinggi pada malam hari ketika stomata tertutup.

Stomata merupakan tempat pertukaran gas (CO_2 , O_2) antara daun dengan atmosfer. Hara mineral berbetuk gas seperti SO_2 , NO_2 , NH_3 dan lain-lain juga

dapat masuk ke daun melalui stomata. Hara yang masuk ke daun harus melalui kutikula sampai mencapai WFS. Artinya setelah melalui kutikula, hara terakumulasi di daerah Free Space yaitu daerah yang masih diluar membran plasma dari sel daun. Menurut Epstein (1993), Free Space di daun merupakan ruang antara dinding sel dan membran plasma. Volumennya 3-5% dari total volume daun. Untuk masuk ke sitoplasma daun, hara harus menyeberangi membran plasma secara aktif dengan energi dari respirasi atau fotofosforilasi. Perjalanan hara dalam daun ke jaringan vaskuler (floem daun) kemudian diangkut keluar daun dapat melalui 2 jalur yaitu apoplastik dan simplastik. Transport hara dari daun ke bawah melalui floem. Jadi sama dengan transport hasil fotosintesis.

Karena daun dapat berfungsi sebagai penyerap hara maka pemupukan dapat dilakukan lewat daun. Pemupukan lewat daun dengan metode semprot mempunyai kelebihan penyerapannya cepat, tapi kelemahannya suplai haranya sementara. Setelah cairan yang menempel di permukaan daun habis maka suplai haranya terhenti. Kelemahan-kelemahan lain dari pemupukan lewat daun

:

1. Laju penetrasinya rendah, terutama pada tanaman yang daunnya berkutikula tebal (ex. : jeruk, kopi)
2. Run-off dari permukaan daun yang hidrofobik.
3. Mudah tercuci oleh air hujan
4. Cepat mengering

5. Jumlah hara makro yang dapat disuplai dalam sekali semprot sangat rendah
6. Kerusakan daun bila dosis tidak tepat seperti nekrosis dan terbakar
7. Hara mineral tertentu seperti Ca, laju translokasinya dari tempat diserap (terutama pada daun muda) ke bagian lain sangat lambat.

Kerusakan daun karena konsentrasi tinggi merupakan problem serius pada pemupukan lewat daun karena ketidakseimbangan hara lokal pada daun. Tetapi bukan karena efek osmosis. Namun demikian pengaruh kurang baik dari pemupukan lewat daun dapat dinetralkan antara lain dengan pemberian sukrosa (Tabel 10).

Tabel 10. Pengaruh urea konsentrasi tinggi yang merusak pada pemupukan lewat daun dapat dinetralkan dengan pemberian sukrosa.

Perlakuan ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)		Kerusakan (% dari total luas daun)
Urea	Sukrosa	
159	0	0
478	0	25
478	909	15
478	2726	3

Pada kondisi tertentu teknik pemupukan lewat daun sangat berguna. Hal tersebut terutama sangat bermanfaat pada kondisi :

1. Ketersediaan hara tanah rendah. Contohnya, pada tanah berkapur, kandungan Fe rendah. Pemberian pupuk yang mengandung Fe dapat dilakukan lewat daun. Pada tanah dengan pH tinggi, terjadi defisiensi Mn. Pemberian pupuk yang mengandung Mn saat baik dilakukan lewat daun. Demikian pula pada tanah masam, Mo terikat kuat. Pemberian pupuk yang mengandung Mo dapat dilakukan lewat daun
2. Tanah dengan lapisan top soil kering. Tanah yang permukaannya kering, tetapi di sub-soil ada air. Sangat baik melakukan pemupukan lewat daun.
3. Fase reproduktif. Pada fase ini aktivitas akar menurun akibat kompetisi karbohidrat dengan bunga, buah dan biji sehingga penyerapan akar lewat tanah menurun. Hal ini dapat diatasi dengan pemupukan lewat daun (*foliar application*).
4. Meningkatkan kandungan protein pada sereal. Dengan pemupukan N lewat daun, N yang sifatnya sangat mobil dengan sangat cepat langsung dapat ditransport ke biji yang sedang berkembang. Dengan demikian pembentukan asam amino di biji meningkat.
5. Meningkatkan kandungan Ca pada buah. Ca merupakan komponen yang sangat penting pada buah. Walaupun transport Ca lewat floem sangat kecil, tetapi dengan penyemprotan Ca berkali-kali lewat daun pada apel dapat meningkatkan kandungan Ca pada buah apel (Schumacher 1986).

Faktor-faktor yang mempengaruhi pemupukan lewat daun adalah:

- (1) Cahaya, temperatur dan kelembaban. Pengaruhnya berkaitan dengan fotosintesis, ketebalan kutikula, lapisan lilin dan kecepatan adsorpsi.

- (2) Umur daun dan spesies tanaman. Daun agak muda lebih efisien. Spesies tanaman berkaitan dengan bentuk dan fisik daun.
- (3) Bentuk kimia pupuk. Pada tanaman apel, pemberian N lewat daun dalam bentuk $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ serapannya lebih baik dibandingkan dalam bentuk $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Fosfor dalam bentuk H_3PO_4 diadsorpsi lebih banyak dibandingkan dalam bentuk K_3PO_4 , NO_3PO_4 atau $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.
- (4) Pemberian “wetting agent” atau “surfactan” pengaruhnya lebih baik. Fungsi wetting agent adalah menurunkan tegangan permukaan daun dan membasahi permukaan daun sehingga pupuk lebih banyak dapat diserap.

2.7. Remobilisasi Hara

Remobilisasi hara adalah berpindahnya atau realokasi hara dari suatu organ tanaman ke organ lainnya. Akibat adanya remobilisasi tersebut maka terjadi penurunan jumlah hara neto dari suatu organ. Remobilisasi hara terjadi karena masuk (influx) dan keluarnya (efflux) hara dari organ tanaman dapat berlangsung pada saat bersamaan. Besarnya influx dan efflux sukar diukur. yang diketahui hanya neto keluar dan masuknya hara. Tahapan remobilisasi hara di daun adalah :

1. Mobilisasi hara di sel-sel daun
2. Angkutan jarak dekat secara simplast ke floem
3. Masuk ke pembuluh floem secara aktif
4. Angkutan dalam floem ke organ yang membutuhkan

Remobilisasi hara terjadi pada : (a) Saat perkecambahan biji. Pada saat ini remobilisasi hara (kecuali Ca) terjadi dari biji ke titik-titik tumbuh (akar dan tunas pucuk) melalui xylem dan floem; (b) Saat tanah dalam keadaan kahat hara. Bila kandungan hara tanah rendah atau kadar air rendah, remobilisasi hara dari organ tertentu sangat penting karena pada saat itu tanaman tidak mampu menyerap hara dari tanah; (c) Saat pembentukan bunga, buah dan biji. Pada saat fase reproduksi terjadi pembentukan bunga, buah dan biji yang membutuhkan banyak fotosintat. Akibatnya pasokan fotosintat ke bagian akar menurun drastis, aktivitas akar menurun karena kekurangan energi, sehingga penyerapan hara menurun. Dalam keadaan seperti itu terjadi remobilisasi hara dari daun ke organ generatif. Kadang-kadang menyebabkan kandungan hara daun turun drastis dan proses tsb mengakibatkan gejala kahat hara daun selama fase reproduktif tampak cepat bahkan seringkali diikuti oleh gugurnya daun; dan (d) Saat sebelum gugur daun. Secara alami daun-daun tanaman yang sudah tua akan diikuti oleh gugurnya daun tersebut. Sebelum gugur, akan terjadi remobilisasi hara kebagian-bagian yang metabolismenya masih aktif. Contohnya, ciri khas tanaman tahunan adalah terjadinya remobilisasi hara dari daun tua (kecuali Ca) ke bagian kayu.

Secara umum, untuk membedakan apakah suatu hara mengalami remobilisasi tinggi atau rendah dapat dilihat dari tempat gejala kekurangannya. Bila kahat (defisiensi) hara tersebut terjadi pada daun tua berarti remobilisasinya tinggi, dan sebaliknya bila terjadi pada daun muda atau meristem berarti remobilisasinya rendah (Tabel 11).

Tabel 11. Contoh ciri-ciri gejala defisiensi hara dan tingkat remobilisasinya

Jenis hara mineral	Gejala defisiensinya pada	Tingkat remobilisasinya
N,P,K,Mg	Daun tua	sangat bagus
S	Daun muda	sedang
Fe,Zn,Co,Mo	Daun muda	sangat rendah
Ca,B	Daun muda dan meristem apikal	ekstrim rendah

DAFTAR PUSTAKA

- Baligar, V. C. and R. R. Duncan. 1990. *Crops as Enhancers of Nutrient Use*. Academic Press, Inc. Toronto. 574p.
- Epstein, E. 1972. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. John Wiley and Sons, Inc. Toronto. 412p.
- Foy, C. D., R. L. Chaney and M. C. White. 1978. *The Physiology of Metal Toxicity in Plants*. *Annual Review of Plant Physiology* 29:561-566.
- Hartmann, H. T., W. J. Flocker and A. M. Kofranek. 1981. *Plant Science*. Prentice Hall, Inc. New Jersey. p.206-215.
- Marschner, H. 1986. *Mineral Nutrition in Higher Plants*. Academic Press Inc, London Ltd. 674p.
- Mengel, K. and E.A. Kirkby. (1982). *Principles of plant nutrition*. International potash institute, Bern, Switzerland.
- Reijntjes, C., B. Haverkort and W. Bayers. *Farming for the Future. An Introduction to Low-External-Input and Sustainable Agriculture*. The Macmillan Press Ltd. Terjemahan : Y. Sukoco. *Pertanian Masa Depan. Pengantar untuk Pertanian Berkelanjutan dengan Input Luar Rendah*. Penerbit Kanisius. 270 hal.
- Salisbury, F. B. and C. W. Ross. 1992. *Plant Physiology*. 4th Edition. Terjemahan : Diah R. Lukman dan Sumaryono. *Fisiologi Tumbuhan*. Jilid I. Penerbit ITB Bandung. 241 hal.
- Vegeria, N.K. (1991). *Fertilization and mineral nutrition of rice*, EMBRAPA-CNPAP/Editora Campus, Rio de Janeiro.
- Wijaya, K.A. 2006. *Nutrisi Tanaman Sebagai Penentu Kualitas Hasil dan Resistensi Alami Tanaman*. Prestasi Pustaka Publisher.

