



RESPON EKOSISTEM TANAMAN TERHADAP  
PERUBAHAN IKLIM  
KASUS KELEBIHAN AIR DAN KEKURANGAN AIR



BAMBANG PUJIASMANTO  
DAN TIM

# CARA TANAMAN BERADAPTASI TERHADAP CEKAMAN FISIOLOGIS PADA TANAH TERGENANG DAN KEKERINGAN.

GENANGAN AIR TANAH TELAH LAMA DIIDENTIFIKASI SEBAGAI STRES ABIOTIK UTAMA DAN KENDALA YANG DIBERIKANNYA PADA AKAR MEMILIKI PENGARUH YANG SIGNIFIKAN TERHADAP PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN TANAMAN.

BILA PERISTIWA INI TERJADI, MAKA GENANGAN AIR INI DAPAT MENGURANGI PERKECAMBAHAN BENIH DAN PERKEMBANGAN BIBIT.

# GENANGAN AIR MERUPAKAN FAKTOR PENTING YANG MEMPENGARUHI PERTUMBUHAN, PERKEMBANGAN DAN KELANGSUNGAN HIDUP SPESIES TANAMAN, TIDAK HANYA PADA EKOSISTEM ALAMI, TETAPI JUGA PADA SISTEM PERTANIAN



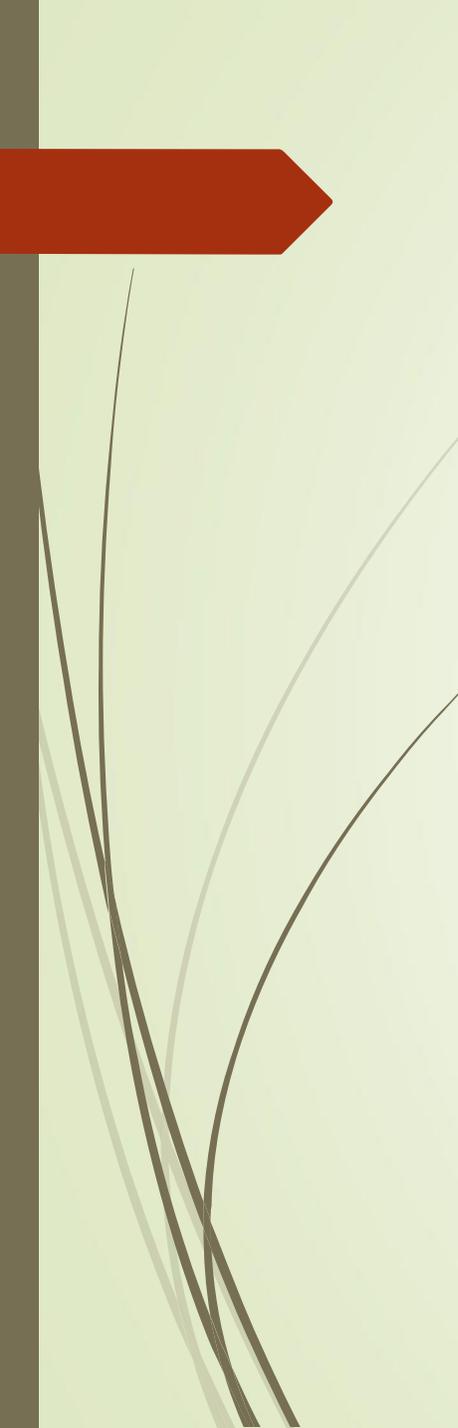


SETELAH PENGGENANGAN, TERJADI PERUBAHAN YANG CEPAT PADA SIFAT TANAH. PADA SAAT AIR MEMENUHI PORI-PORI TANAH, UDARA DIDESAK KELUAR, DIFUSI GAS BERKURANG DAN SENYAWA BERACUN TERAKUMULASI AKIBAT KONDISI ANAEROBIK.



SEMUA PERUBAHAN INI SANGAT MEMPENGARUHI KEMAMPUAN TANAMAN UNTUK BERTAHAN HIDUP. SEBAGAI RESPONSNYA, RESISTENSI STOMATA MENINGKAT, FOTOSINTESIS DAN KONDUKTIVITAS HIDROLIK AKAR MENURUN, DAN TRANSLOKASI FOTOASSIMILAT BERKURANG.

SALAH SATU ADAPTASI TERBAIK TANAMAN TERHADAP HIPOKSIA/ ANOKSIA ADALAH PERALIHAN PROSES BIOKIMIA DAN METABOLISME YANG UMUM TERJADI PADA SAAT KETERSEDIAAN O<sub>2</sub> TERBATAS



**SINTESIS PROTEIN STRES ANAEROBIK ,  
MEMUNGKINKAN TERJADINYA PROSES  
METABOLISME PENGHASIL ENERGI  
TANPA OKSIGEN DI BAWAH KONDISI  
YANG ANAEROB**



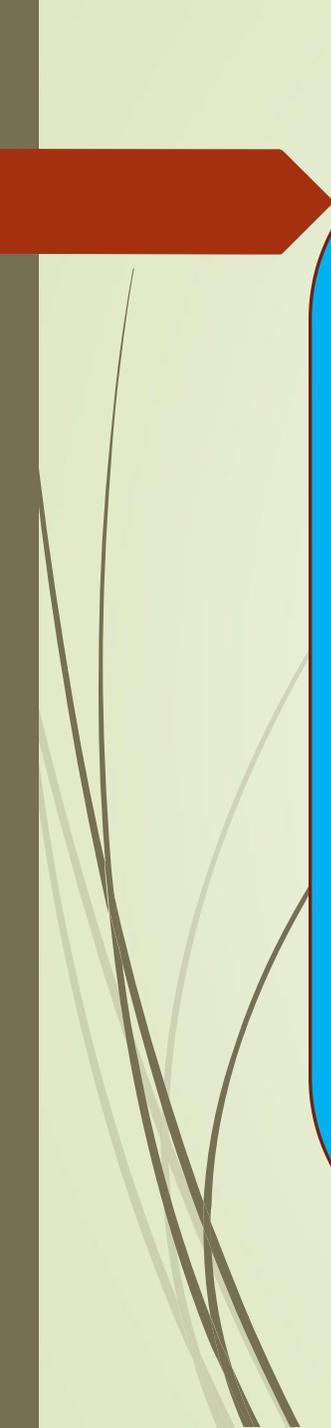
ADAPTASI LAIN YANG DIAMATI ADALAH  
PERUBAHAN MORFOLOGI YANG TERDIRI  
PEMBENTUKAN LENTISEL HIPERTROFI, INISIASI  
AKAR ADVENTIF DAN/ATAU PERKEMBANGAN  
AERENCHYMA.

RESPONS STRES TANAMAN BERAGAM  
TERHADAP HIPOKSIA/ ANOKSIA, YANG  
DISEBABKAN OLEH GENANGAN AIR  
TANAH/BANJIR

## A. PERUBAHAN LINGKUNGAN AKAR SELAMA PENGGENANGAN

PADA SAAT AIR MENGGENANGI TANAH, RUANG UDARA DIPENUHI AIR, MENGAKIBATKAN TERJADINYA PERUBAHAN KARAKTERISTIK BEBERAPA FISIKO-KIMIA TANAH.

PERTAMA YANG TERJADI ADANYA PENINGKATAN H<sub>2</sub>O:  
TANAH JENUH AIR CIRI DARI BANJIR  
MEKANISME YANG MEMICU RESPONS TANAMAN  
ADALAH PRODUK DARI BANJIR ZONA AKAR  
(PERUBAHAN REDOKS DAN pH TANAH, DAN  
PENURUNAN KADAR O<sub>2</sub>)



POTENSIAL REDOKS (Eh) TANAH SERING DIANGGAP SEBAGAI INDIKATOR YANG PALING TEPAT DARI PERUBAHAN KIMIA YANG TERJADI SAAT BANJIR. Eh UMUMNYA MENURUN SELAMA TERGENANG AIR TANAH. POTENSIAL REDOKS TIDAK HANYA MERUPAKAN INDIKATOR DARI KADAR O<sub>2</sub> (Eh SEKITAR +350 mV DALAM KONDISI ANAEROB)



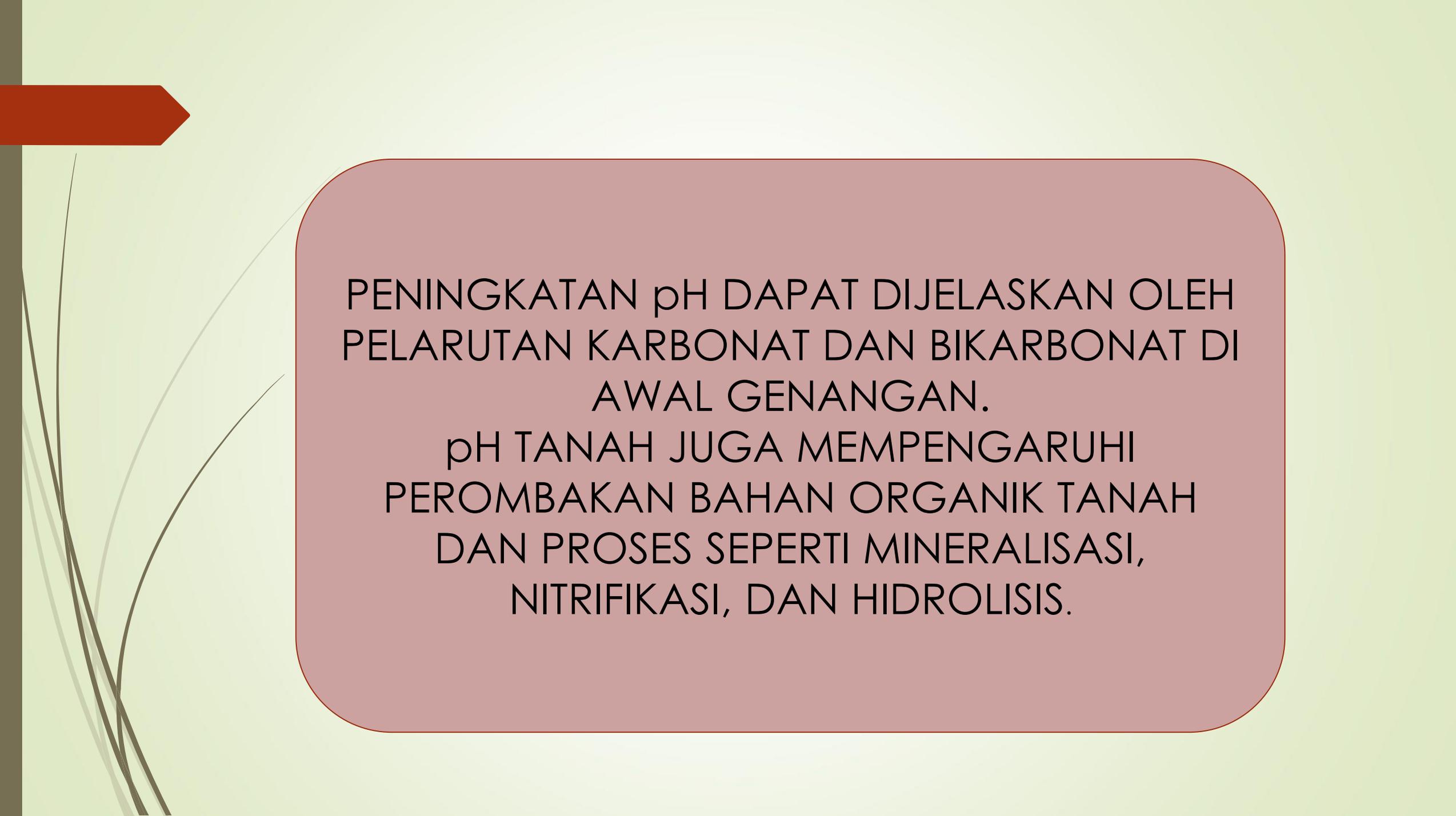
KONDISI REDUKTIF MENYEBABKAN KOMPETISI  
TINGGI O<sub>2</sub>, JUGA MEMPENGARUHI KETERSEDIAAN  
DAN KONSENTRASI PELBAGAI NUTRISI TANAMAN  
PERUBAHAN Eh DIPENGARUHI OLEH BAHAN  
ORGANIK SERTA Fe DAN Mn.  
REDUKSI TANAH MEMACU PELEPASAN KATION  
DAN FOSFOR MELALUI ADSORPSI ION BESI DAN  
PELARUTAN OKSIDA.

**KONDISI TANAH YANG REDUKTIF  
JUGA MENDUKUNG PRODUKSI  
ETANOL, ASAM LAKTAT,  
ASETALDEHIDA, DAN ASAM ASETAT  
DAN FORMIAT**



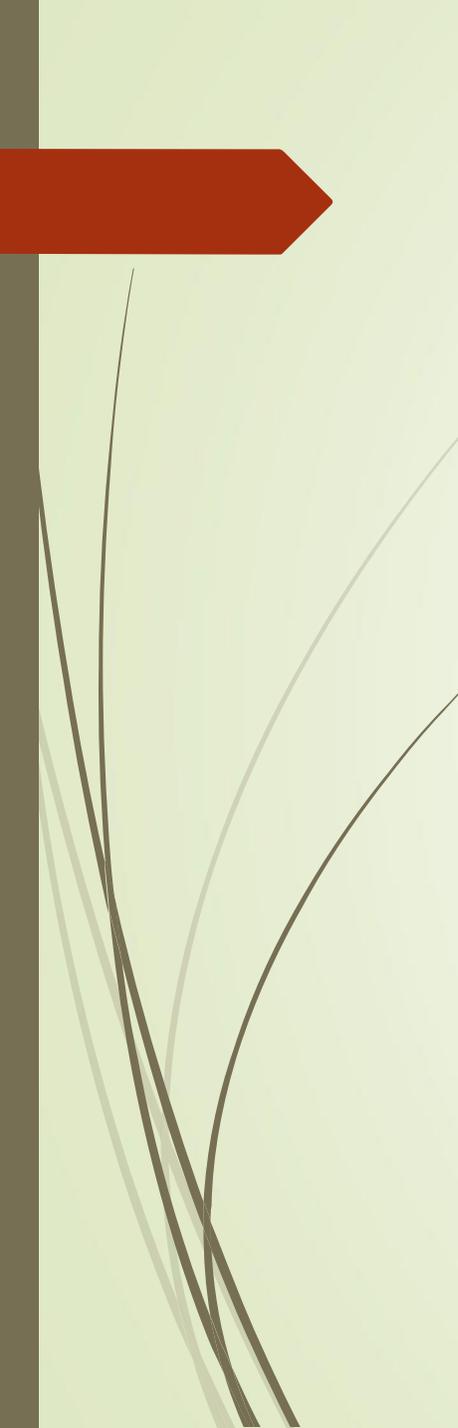
KARAKTERISTIK KIMIA TANAH LAINNYA  
YANG SANGAT DIPENGARUHI OLEH  
KONDISI GENANGAN ADALAH pH  
TANAH, YANG BERKORELASI NEGATIF  
DENGAN Eh.

pH TANAH UMUMNYA CENDERUNG  
MENINGKAT MENUJU NETRAL PADA  
KONDISI TERGENANG AIR.



PENINGKATAN pH DAPAT DIJELASKAN OLEH  
PELARUTAN KARBONAT DAN BIKARBONAT DI  
AWAL GENANGAN.

pH TANAH JUGA MEMPENGARUHI  
PEROMBAKAN BAHAN ORGANIK TANAH  
DAN PROSES SEPERTI MINERALISASI,  
NITRIFIKASI, DAN HIDROLISIS.



SECARA KESELURUHAN, SALAH SATU EFEK UTAMA GENANGAN AIR ADALAH RENDAHNYA KEBERADAAN O<sub>2</sub> DI BAGIAN TANAMAN YANG TERENDAM, KARENA GAS O<sub>2</sub> BERDIFUSI 10.000 LEBIH CEPAT DI UDARA DIBANDINGKAN DI DALAM AIR.



PENGARUH TERBATASNYA O<sub>2</sub> PADA  
METABOLISME SEL TERGANTUNG PADA  
KONSENTRASINYA DAN PENURUNAN  
KETERSEDIAAN O<sub>2</sub> SECARA GRADUAL  
PADA AKAR MEMILIKI BERBAGAI  
PENGARUH PADA METABOLISME  
TANAMAN

- 
1. NORMOXIA MEMUNGKINKAN RESPIRASI AEROBIK DAN METABOLISME NORMAL DAN SEBAGIAN BESAR ATP DIHASILKAN MELALUI FOSFORILASI OKSIDATIF,
  2. HIPOKSIA TERJADI KETIKA PENURUNAN  $O_2$  YANG TERSEDIA MULAI MENJADI FAKTOR PEMBATAS UNTUK PRODUKSI ATP MELALUI FOSFORILASI OKSIDATIF DAN,
  3. ANOXIA KETIKA ATP HANYA DIHASILKAN MELALUI GLIKOLISIS FERMENTASI, KARENA TIDAK ADA  $O_2$  YANG TERSEDIA LAGI.



KONDISI ANAEROBIK BERKEMBANG DI  
TANAH TERGENANG AIR, MAKA ADA  
PENINGKATAN JUMLAH PRODUK  
SAMPINGAN DARI METABOLISME  
FERMENTASI YANG TERAKUMULASI DI  
LINGKUNGAN PERAKARAN DAN KADAR CO<sub>2</sub>,  
METANA, DAN ASAM LEMAK VOLATILE  
MENINGKAT

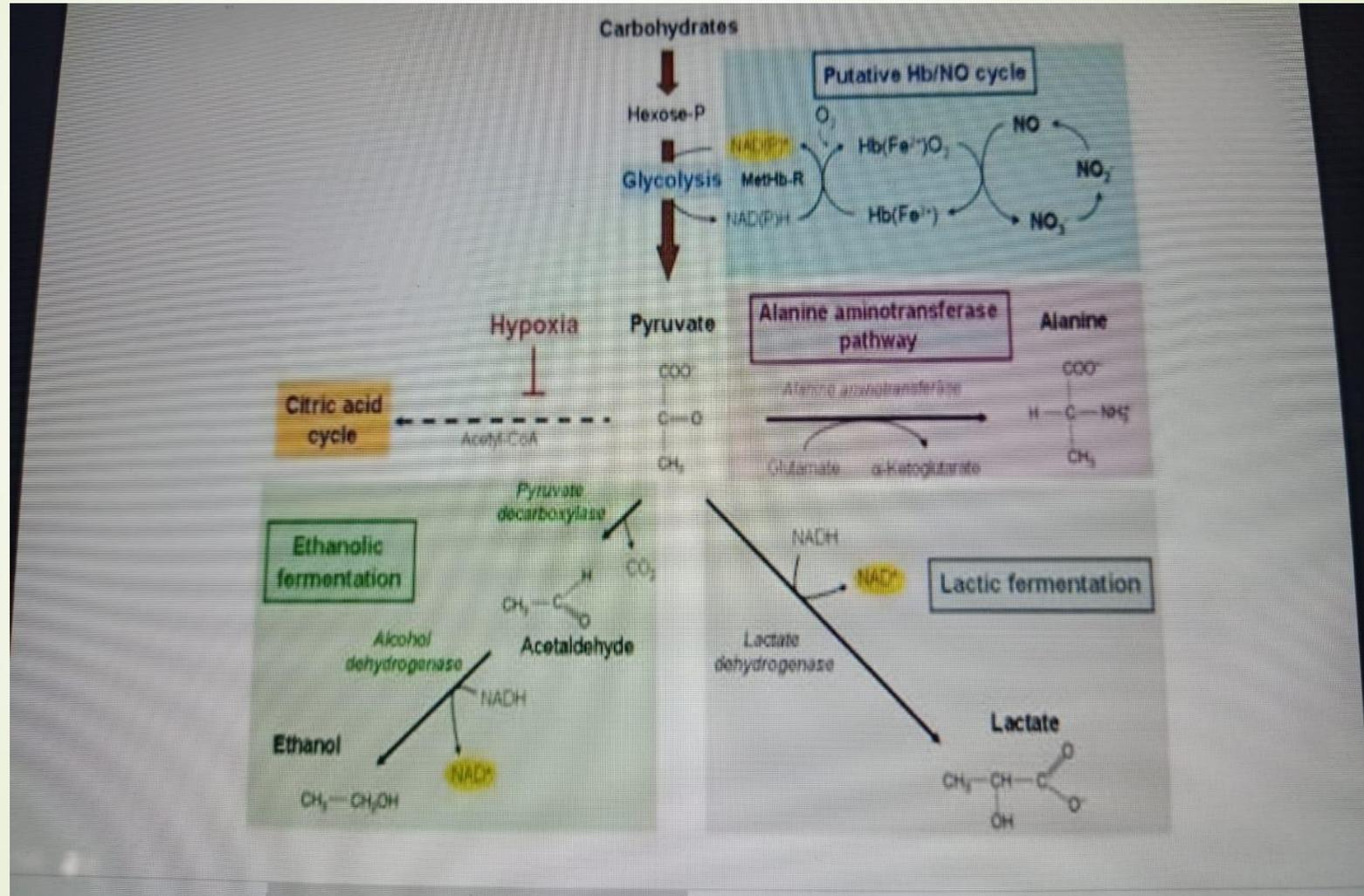


**PENURUNAN ENERGI YANG  
TERSEDIA MEMILIKI  
KONSEKUENSI YANG DRAMATIS  
PADA PROSES SELULER, YANG  
MENYEBABKAN  
KETIDAKSEIMBANGAN DAN/ATAU  
KEKURANGAN AIR DAN HARA  
NUTRISI.**



**SELAIN ITU, PERUBAHAN LINGKUNGAN  
INI JUGA DAPAT MEMBUAT TANAMAN  
LEBIH RENTAN TERHADAP STRES  
LAINNYA, KHUSUS TERHADAP INFEKSI  
PATOGEN**

# GAMBAR 3. SKEMA DIAGRAM JALUR METABOLIK UTAMA YANG PADA SAAT TANAMAN MENGALAMI STRES GENANGAN.





HIPOKSIA MENYEBABKAN PENURUNAN RESPIRASI MITOKONDRIA, YANG SEBAGIAN DIKOMPENSASI OLEH PENINGKATAN BAIK PADA GLIKOLISIS MAUPUN PADA FERMENTASI. NITRAT TELAH DIUSULKAN SEBAGAI AKSEPTOR ELEKTRON PERANTARA KETIKA KONSENTRASI  $O_2$  RENDAH DAN MUNGKIN IKUT SERTA PADA OKSIDASI NAD(P)H SELAMA HIPOKSIA.



NO (NITRAT OKSIDA) DAPAT DIOKSIDENASI MENJADI NITRAT DENGAN  $O_2$  YANG TERIKAT ERAT PADA HEMOGLOBIN KELAS-1  $[Hb(Fe^{2+})O_2]$ , YANG DIOKSIDASI MENJADI metHb $[Hb(Fe^{3+})]$ . ENZIM ALANIN AMINOTRANSFERASE YANG MENGUBAH PIRUVAT MENJADI ALANIN BANYAK DIINDUKSI DALAM KONDISI HIPOKSIA. TIDAK SEPERTI PEMBENTUKAN ETANOL, TIDAK ADA KONSUMSI NAD(P)H DALAM PROSES INI:  
metHEMOGLOBIN REDUKTASE

## B. RESPONS METABOLISME DAN ADAPTASI TERHADAP HIPOKSIA DAN ANOKSIA

AKIBAT LANGSUNG DARI GENANGAN AIR ADALAH PERIODE HIPOKSIA, DIKUTI OLEH PENURUNAN TAJAM DARI  $O_2$  YANG MENYEBABKAN KONDISI ANOKSIA. KEKURANGAN OKSIGEN SELULER DISEBUT "HIPOKSIA" KETIKA KADAR OKSIGEN MEMBATASI RESPIRASI MITOKONDRIA DAN "ANOKSIA" SAAT RESPIRASI BENAR-BENAR TERHAMBAT.



KETIKA RESPIRASI MENURUN, ALIRAN ELEKTRON MELALUI JALUR RESPIRASI BERKURANG, SEHINGGA MENGURANGI PRODUKSI ATP. AKIBATNYA, BAHAN KIMIA PENGOKSIDASI (YAITU NICOTINAMIDE ADENIN DINUKLEOTIDA, NAD) HARUS DIHASILKAN MELALUI JALUR ALTERNATIF YANG TIDAK MENGGUNAKAN  $O_2$  SEBAGAI AKSEPTOR ELEKTRON TERMINAL.



KETIKA FOSFORILASI OKSIDATIF ADENOSINE DIFOSFAT (ADP) TERBATAS, MAKA TANAMAN MENGUBAH METABOLISMENYA DARI RESPIRASI AEROBIK MENJADI FERMENTASI ANAEROB (GAMBAR 3).





JALUR FERMENTASI ANAEROB BERFUNGSI SEBAGAI RUTE METABOLISME AMAN DAN MENCAKUP DUA TAHAP: KARBOKSILASI PIRUVAT MENJADI ASETALDEHIDA (DIKATALISIS OLEH PIRUVAT DEKARBOKSILASE, PDC) DAN BERIKUTNYA REDUKSI ASETALDEHIDA MENJADI ETANOL DENGAN DIIRINGI OKSIDASI NAD (P) H MENJADI NAD (P), DIKATALISIS OLEH ALKOHOL DEHIDROGENASE (ADH).



JALUR METABOLISME FERMENTASI  
HANYA MEMUNGKINKAN SINTESIS 2  
MOL ATP DIBANDINGKAN 36 ATP PER  
MOL GLUKOSA YANG DIHASILKAN PADA  
RESPIRASI AEROBIK.  
UNTUK MENGIMBANGI DEFISIT ENERGI,  
GLIKOLISIS DIPERCEPAT,  
MENYEBABKAN MENIPISNYA  
CADANGAN KARBOHIDRAT

**SPESES YANG TOLERAN TERHADAP  
GENANGAN AIR UMUMNYA DIANGGAP  
YANG MAMPU MEMPERTAHANKAN  
STATUS ENERGINYA MELALUI  
FERMENTASI.**

**SELAIN KEMAMPUANNYA UNTUK  
MENJAGA TINGKAT ENERGI YANG  
TEPAT, PEMELIHARAAN pH SITOSOL  
SANGAT PENTING**

KARENA O<sub>2</sub> KURANG DALAM KONDISI HIPOKSIA, MAKA DIGANTI DENGAN AKSEPTOR ELEKTRON ALTERNATIF NITRAT TELAH LAMA DIANGGAP SEBAGAI AKSEPTOR ELEKTRON TERMINAL BAGI MITOKONDRIA TANAMAN DI BAWAH KONDISI HIPOKSIA ATAU ANOXIA

## C. RESPONS FISIOLOGIS TERHADAP GENANGAN

SALAH SATU RESPONS FISIOLOGIS AWAL TANAMAN TERHADAP GENANGAN ADALAH PENGURANGAN KONDUKTANSI STOMATA (GAMBAR 4). GENANGAN TIDAK HANYA MENINGKATKAN RESISTENSI STOMATA TETAPI JUGA MEMBATASI PENYERAPAN AIR, SEHINGGA KEMUDIAN MENGARAH KEPADA DEFISIT AIR INTERNAL.



KEKURANGAN O<sub>2</sub> UMUMNYA MENYEBABKAN SANGAT CEPAT BERKURANGNYA LAJU FOTOSINTESIS PADA TANAMAN YANG TIDAK TOLERAN GENANGAN, YANG UMUMNYA DIANGGAP SEBAGAI HASIL DARI BERKURANGNYA MULUT STOMATA.

FAKTOR-FAKTOR LAIN SEPERTI PENURUNAN KADAR KLOROFIL DAUN, PENUAAN DINI DAUN, DAN PENURUNAN LUAS DAUN JUGA DAPAT MENYEBABKAN PENGHAMBATAN FOTOSINTESIS PADA TAHAP BERIKUTNYA.



**KETIKA BERKEPANJANGAN, STRES  
DAPAT MENYEBABKAN  
PENGHAMBATAN AKTIVITAS  
FOTOSINTESIS PADA JARINGAN  
MESOFIL, SERTA PENURUNAN  
AKTIVITAS METABOLIK DAN  
TRANSLOKASI FOTOASIMILAT**

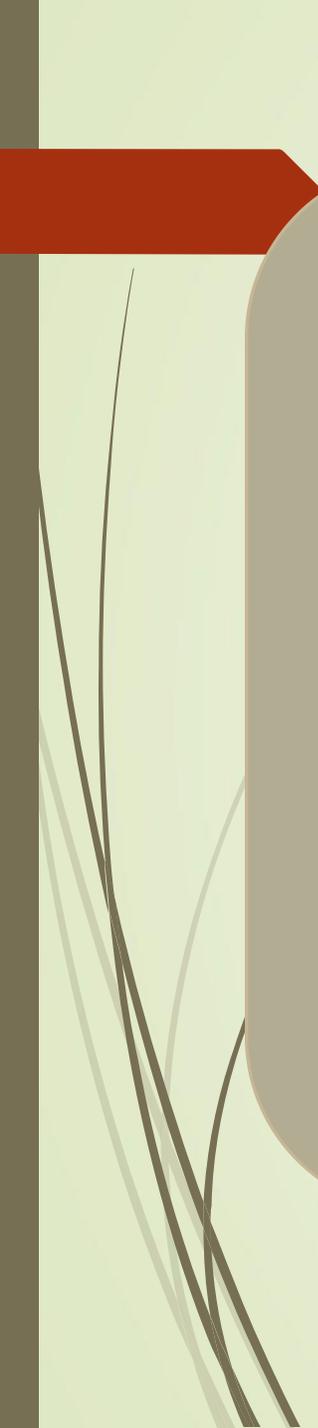


**DAMPAK DARI BERKURANGNYA  
FOTOSINTESIS PADA PERTUMBUHAN DAN  
PERKEMBANGAN TANAMAN BISA JADI  
SANGAT DRAMATIS DAN SECARA  
BERSAMAAN DAPAT MENYEBABKAN  
DISFUNGSI FISIOLOGIS SEPERTI  
PENGHAMBATAN TRANSPORTASI AIR DAN  
PERUBAHAN KESEIMBANGAN HORMON.**



UNTUK MEMPERTAHANKAN AKTIVITAS METABOLIKNYA, TANAMAN HARUS MENGGUNAKAN CADANGAN KARBOHIDRATNYA. KARENA PASOKAN KARBOHIDRAT AWAL BERKORELASI DENGAN TINGKAT TOLERANSI TERHADAP HIPOKSIA/ANOKSIA PADA BANYAK SPESIES, MUNGKIN MELALUI KETERLIBATAN DALAM MENYEDIAKAN ENERGI SELAMA KONDISI ANAEROBIK, MAKA TINGKAT CADANGAN KARBOHIDRAT MENJADI FAKTOR PENTING DARI TOLERANSI TERHADAP GENANGAN DALAM JANGKA PANJANG.

**SEBAGAI CONTOH,  
PENINGKATAN KEMAMPUAN  
UNTUK MEMANFAATKAN GULA  
MELALUI JALUR GLIKOLISIS  
MEMUNGKINKAN BIBIT PADI  
UNTUK BERTAHAN HIDUP  
LEBIH LAMA DALAM  
GENANGAN**



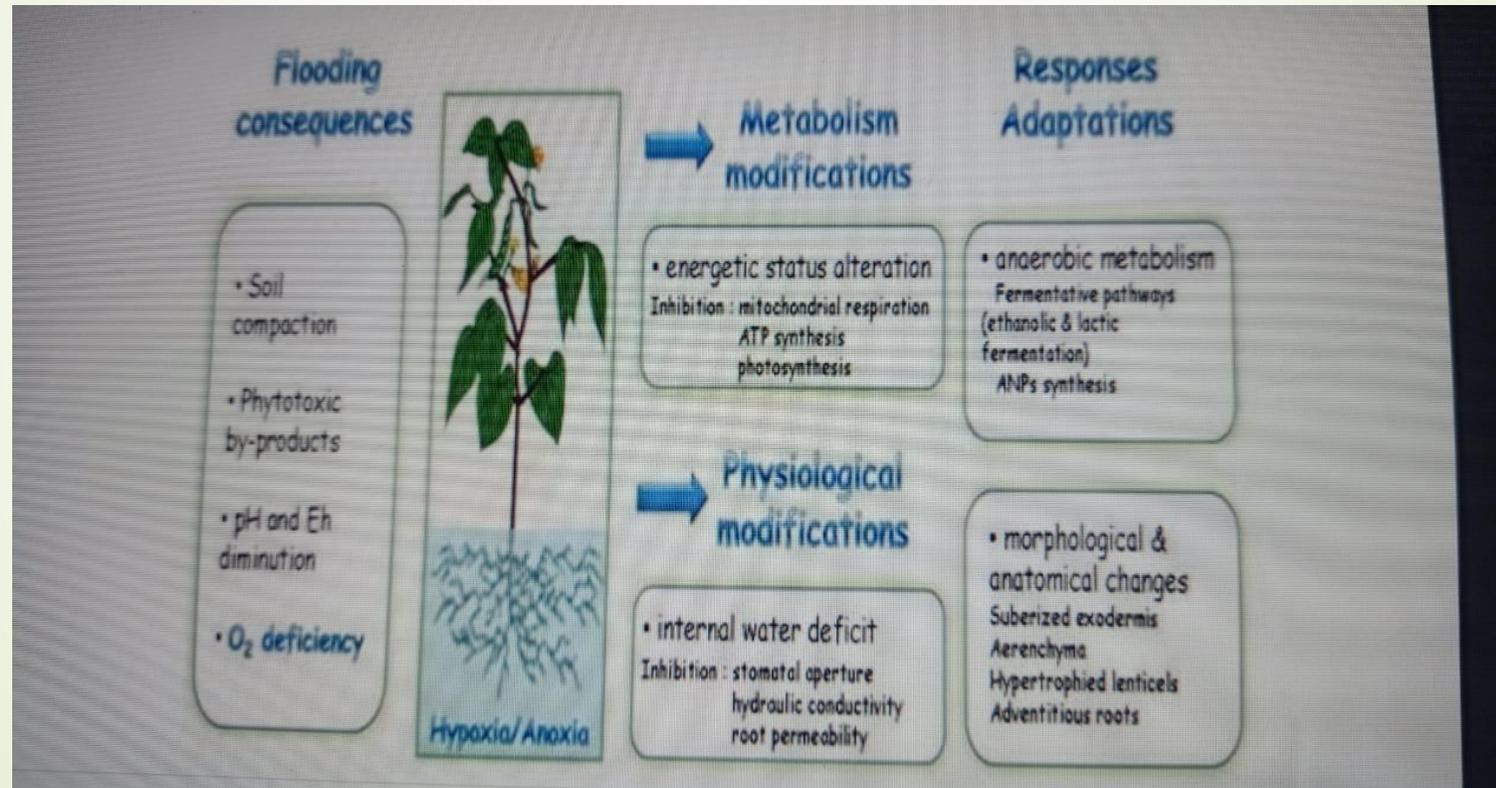
MESKIPUN TANAMAN MEMILIKI CADANGAN GULA TINGGI, NAMUN CADANGAN GULANYA HARUS TERSEDIA DAN MUDAH DIKONVERSI MELALUI JALUR GLIKOLISIS YANG EFISIEN.

KENYATAANNYA, KETERSEDIAAN FOTOASSIMILAT BAGI SEL PADA KONDISI ANAEROBIK TELAH DIUSULKAN SEBAGAI SALAH SATU TAHAP PEMBATAS BAGI TANAMAN UNTUK BERTAHAN HIDUP DALAM KONDISI TERGENANG.

SESUNGGUHNYA, TANAH YANG TERGENANG AIR CENDERUNG MENGURANGI TRANSLOKASI PRODUK FOTOSINTESIS DARI "SOURCE" DAUN KEPADA "SINK" AKAR.

PEMELIHARAAN AKTIVITAS FOTOSINTESIS DAN AKUMULASI GULA TERLARUT KE AKAR MERUPAKAN ADAPTASI PENTING TERHADAP GENANGAN AIR.

GAMBAR 4. KEADAAN FISIKO-KIMIA UTAMA YANG TERJADI PADA RIZOSFER SELAMA TERGENANG AIR DAN PERUBAHAN METABOLISME DAN FISILOGIS YANG DIKUTI OLEH INISIASI RESPON ADAPTASI.





**D. ADAPTASI MORFOLOGI DAN  
ANATOMI TERHADAP GENANGAN**

**TERBENTUKNYA LENTISEL HIPERTROFI  
MERUPAKAN PERUBAHAN ANATOMI  
UMUM YANG DIAMATI PADA PELBAGAI  
SPESIES TANAMAN BERKAYU SELAMA  
TERGENANG (GAMBAR 5).**

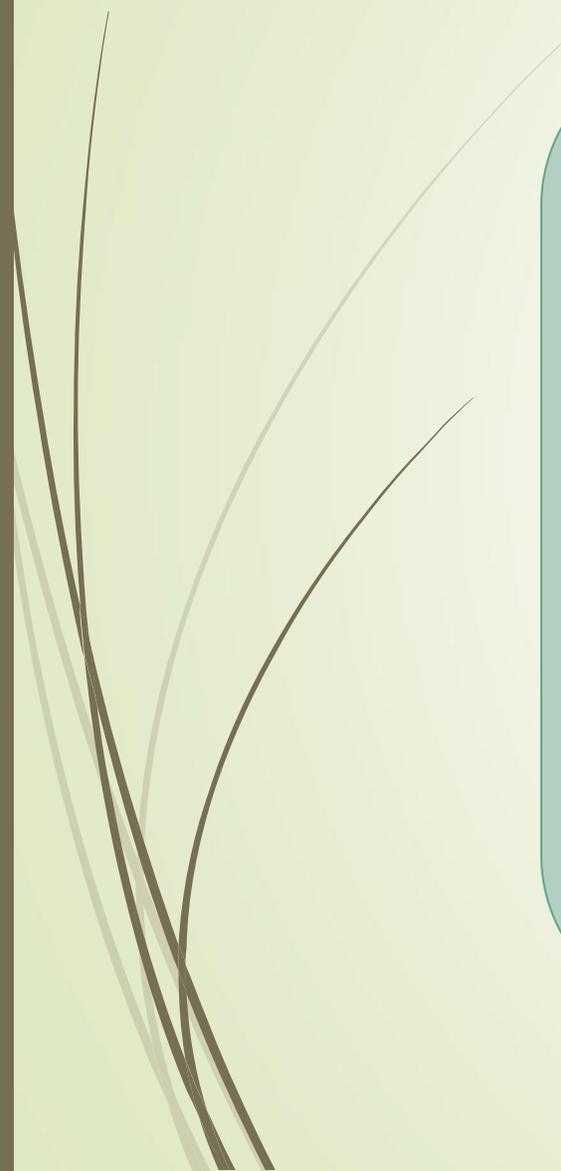




PERTUMBUHAN HIPERTROFI TERLIHAT  
SEBAGAI PEMBENGKAKAN JARINGAN DI  
DASAR BATANG DAN DIYAKINI  
MERUPAKAN HASIL DARI PEMBELAHAN  
DAN PEMBESARAN SEL RADIAL.  
FENOMENA INI TELAH LAMA DIKAITKAN  
DENGAN KEBERADAAN AUKSIN (IAA)  
DAN PRODUKSI ETILEN



Perkembangan lentisel hipertrofi ini diyakini untuk memfasilitasi difusi  $O_2$  ke arah bawah dan menjadi ventilasi potensial bagi senyawa yang diproduksi di akar sebagai produk samping dari metabolisme anaerobik (etanol,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ).



ADAPTASI MORFOLOGI PENTING LAINNYA TERHADAP GENANGAN ADALAH PERKEMBANGAN AKAR ADVENTIF (GAMBAR 5), YANG BERFUNGSI MENGGANTIKAN AKAR UTAMA. PEMBENTUKAN AKAR KHUSUS INI TERJADI KETIKA SISTEM PERAKARAN ASLI TIDAK MAMPU MEMASOK AIR DAN MINERAL YANG DIBUTUHKAN TANAMAN



AKAR ADVENTIF BIASANYA TERBENTUK DI DEKAT PANGKAL BATANG ATAU DI WILAYAH DI MANA LENTISEL BERLIMPAH, DAN PERTUMBUHAN MEREKA ADALAH LATERAL, SEJAJAR DENGAN PERMUKAAN AIR/TANAH. KEHADIRAN AKAR ADVENTIF DI PERBATASAN ANTARA PERMUKAAN TANAH JENUH AIR DENGAN ATMOSFIR MENCERMINKAN PENTINGNYA AKAR INI DALAM MENGGANTIKAN SISTEM AKAR YANG NORMAL BAIK DI DALAM AIR MAUPUN JAUH DI PERMUKAAN AIR TANAH.



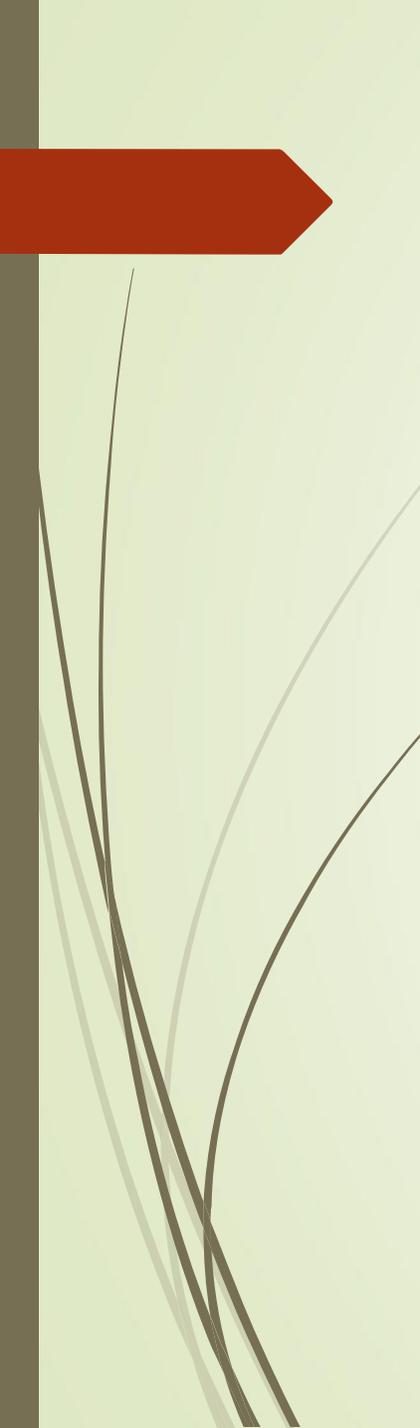
**SELAIN ITU, KEMAMPUAN UNTUK  
MEMPRODUKSI AKAR ADVENTIF UMUMNYA  
TERKAIT DENGAN MENINGKATKNYA  
TOLERANSI TERHADAP GENANGAN DAN  
PERKEMBANGAN AKAR ADVENTIF INI TELAH  
BANYAK DIKAITKAN DENGAN PRODUKSI  
ETILEN.**



SESUNGGUHNYA, DATA TERAKHIR  
MENUNJUKKAN BAHWA PRODUKSI NO  
BEKERJA SEARAH DENGAN IAA DALAM  
PENGENDALIAN PEMBENTUKAN AKAR  
ADVENTIF. NAMUN, PEMAHAMAN TENTANG  
PERAN NO DALAM PEMBENTUKAN AKAR  
ADVENTIF MASIH DINI DAN TEMUAN  
MENGENAI PERAN PENTING NO TERHADAP  
TOLERANSI STRES GENANGAN ADA DI MASA  
DEPAN.



TERAKHIR, SALAH SATU RESPONS YANG PALING PENTING TERHADAP GENANGAN AIR ADALAH TERBENTUKNYA RUANG KOSONG (AERENKHIMA) PADA KORTEKS AKAR (GAMBAR 5). TERBENTUKNYA AERENKHIMA INI MUNGKIN MERUPAKAN RESPONS TERHADAP GENANGAN BAIK PADA SPESIES YANG TOLERAN MAUPUN YANG TIDAK TOLERAN.

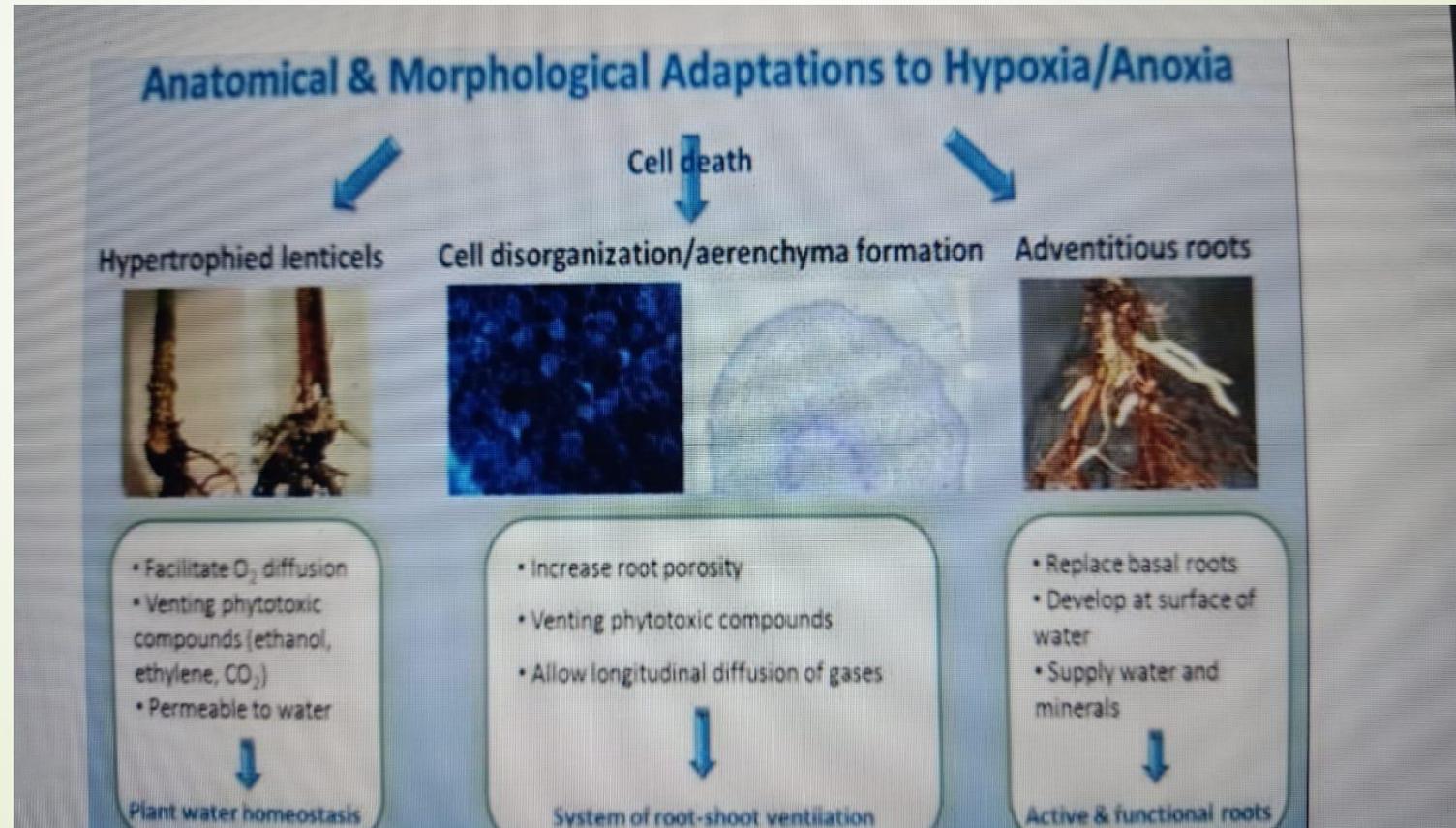


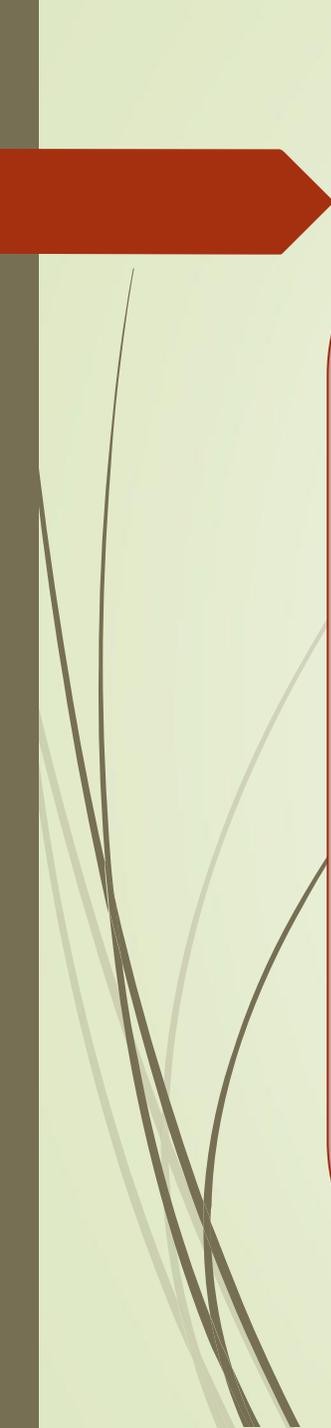
TERNYATA, PROPORSI AERENKHIMA UMUMNYA DIANGGAP SEBAGAI FAKTOR PEMBEDA UTAMA ANTARA TUMBUHAN LAHAN BASAH DAN TUMBUHAN BUKAN LAHAN BASAH. TERBENTUKNYA JARINGAN AERENKHIMA ATAU RUANG KOSONG INI TIDAK HANYA PADA AKAR SAJA. JARINGAN INI JUGA TERLIHAT PADA SELUDANG DAUN KETIKA TERENDAM AIR DAN MEMBENTUK SISTEM INTERKONEKSI VENTILASI TUNAS-AKAR.



AERENKHIMA MENINGKATKAN POROSITAS JARINGAN YANG DAPAT TERBENTUK DENGAN SENDIRINYA SEBAGAI AKIBAT DARI PERUBAHAN YANG TERKAIT DENGAN TEKANAN OSMOTIK DARI BENTUK SEL (GAMBAR 5). PERUBAHAN BENTUK SEL DAN BONGKAHANNYA PADA KORTEKS AKAR SANGAT MUNGKIN TERKAIT DENGAN MENINGKATNYA AKTIVITAS ENZIM PELUNAK DINDING SEL DAN DENGAN DEPOSIT SUBERIN PADA EKSODERMIS.

Gambar 5. Adaptasi anatomi dan morfologi yang terjadi selama tanaman tergenang air

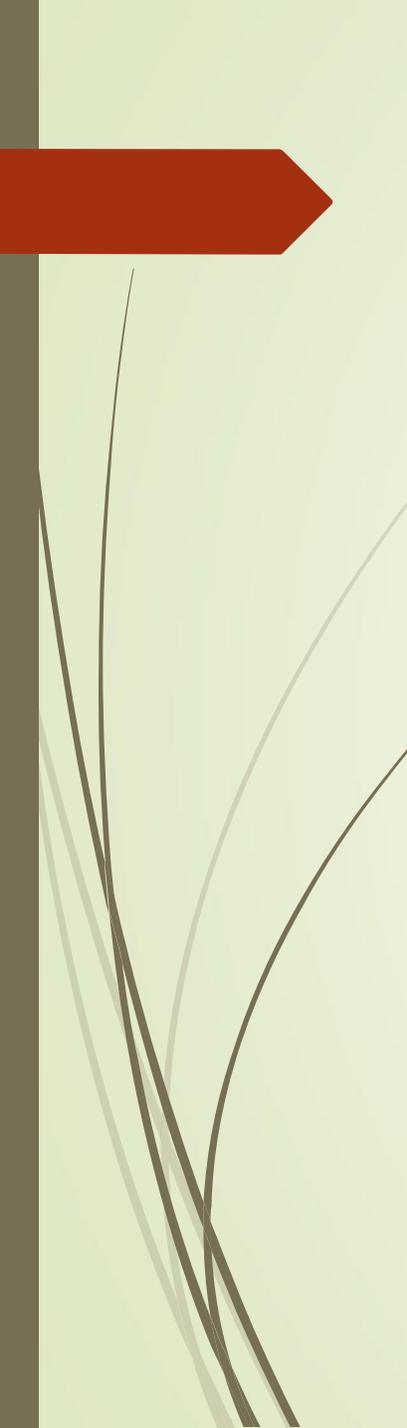




TERBENTUKNYA EKSODERMIS YANG BERSUBERIN BERKORELASI DENGAN TERBENTUKNYA AERENKHIMA PADA JAGUNG DAN BERHUBUNGAN DENGAN BERKURANGNYA KEHILANGAN O<sub>2</sub> AKAR. ADANYA PENGHALANG DI PERMUKAAN KORTEKS ITU BISA JADI TIDAK HANYA MENGURANGI KEHILANGAN O<sub>2</sub> KE RHIZOSFER, TETAPI JUGA DAPAT MELINDUNGI TANAMAN DARI FITOTOKSIN YANG DIHASILKAN OLEH MIKROORGANISME DI SEKITAR AKAR



PROSES KEMATIAN SEL AKTIF YANG BERLANGSUNG SELAMA PEMBENTUKAN AERENKHIMA DIKENDALIKAN SECARA GENETIK DAN MENUNJUKKAN BANYAK KESAMAANNYA DENGAN APOPTOSIS, MESKIPUN ADA BANYAK BUKTI BAHWA HAL ITU UMUMNYA KURANG MEMILIKI BEBERAPA FITUR DARI KEMATIAN SEL



**FAKTOR AIR DALAM FISIOLOGI  
TANAMAN MERUPAKAN FAKTOR  
UTAMA YANG SANGAT PENTING.  
TANAMAN TIDAK AKAN DAPAT HIDUP  
TANPA AIR, KARENA AIR ADALAH  
MATRIK DARI KEHIDUPAN, BAHKAN  
MAKHLUK LAIN AKAN PUNAH TANPA  
AIR.**



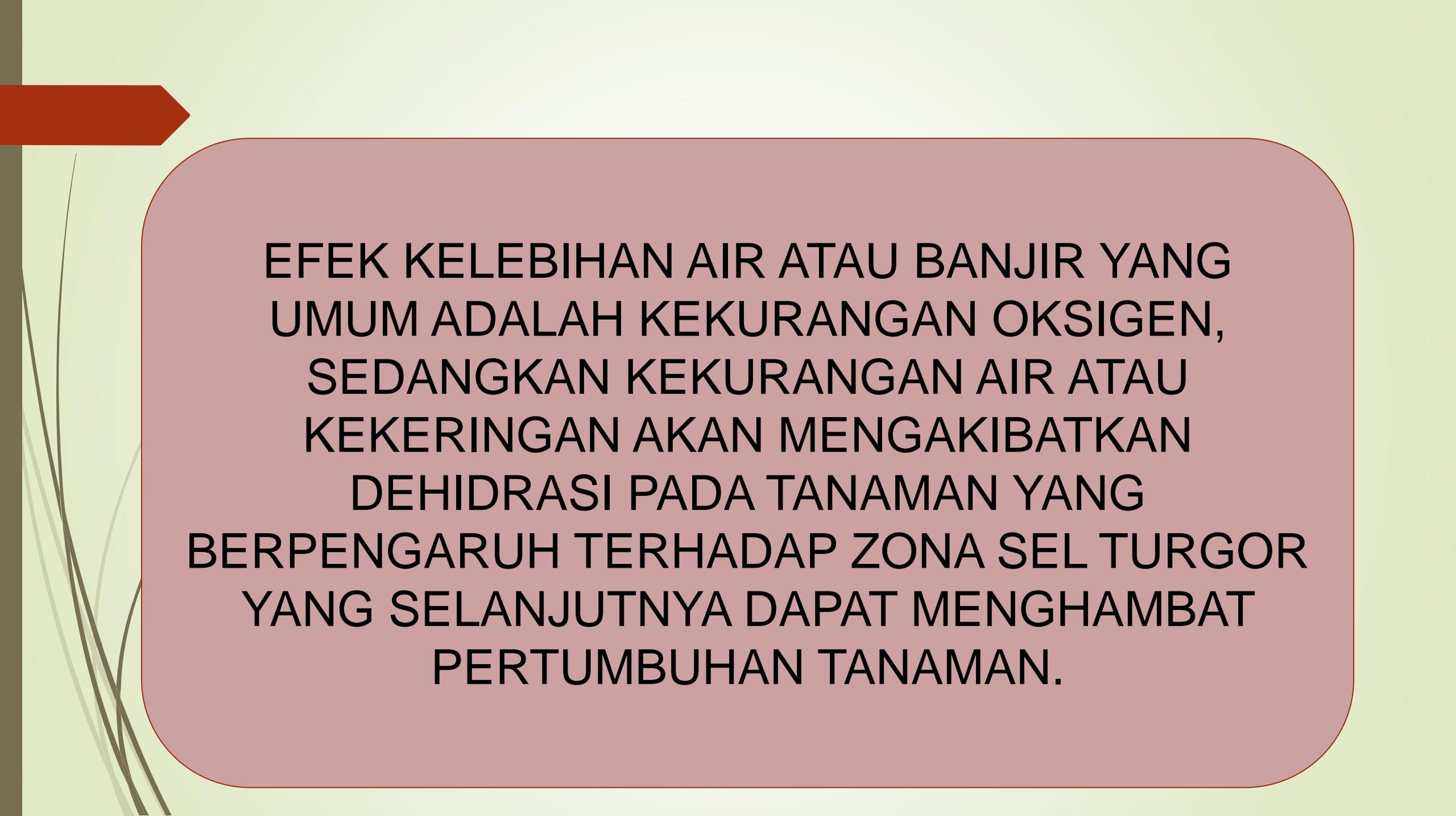
PERANAN AIR BAGI TUMBUHTUMBUHAN;  
YAKNI AIR MERUPAKAN BAGIAN DARI  
PROTOPLASMA (85-90% DARI BERAT  
KESELURUHAN BAHAGIAN HIJAU  
TUMBUH-TUMBUHAN (JARINGAN YANG  
SEDANG TUMBUH) ADALAH AIR.  
SELANJUTNYA DIKATAKAN BAHWA AIR  
MERUPAKAN REAGEN YANG PENTING  
DALAM PROSES-PROSES FOTOSINTESA  
DAN DALAM PROSES-PROSES HIDROLIK



DISAMPING ITU JUGA MERUPAKAN PELARUT DARI GARAM-GARAM, GAS-GAS DAN MATERIAL-MATERIAL YANG BERGERAK KEDALAM TUMBUH TUMBUHAN, MELALUI DINDING SEL DAN JARINGAN ESENSIAL UNTUK MENJAMIN ADANYA TURGIDITAS, PERTUMBUHAN SEL, STABILITAS BENTUK DAUN, PROSES MEMBUKA DAN MENUTUPNYA STOMATA, KELANGSUNGAN GERAK STRUKTUR TUMBUHTUMBUHAN.



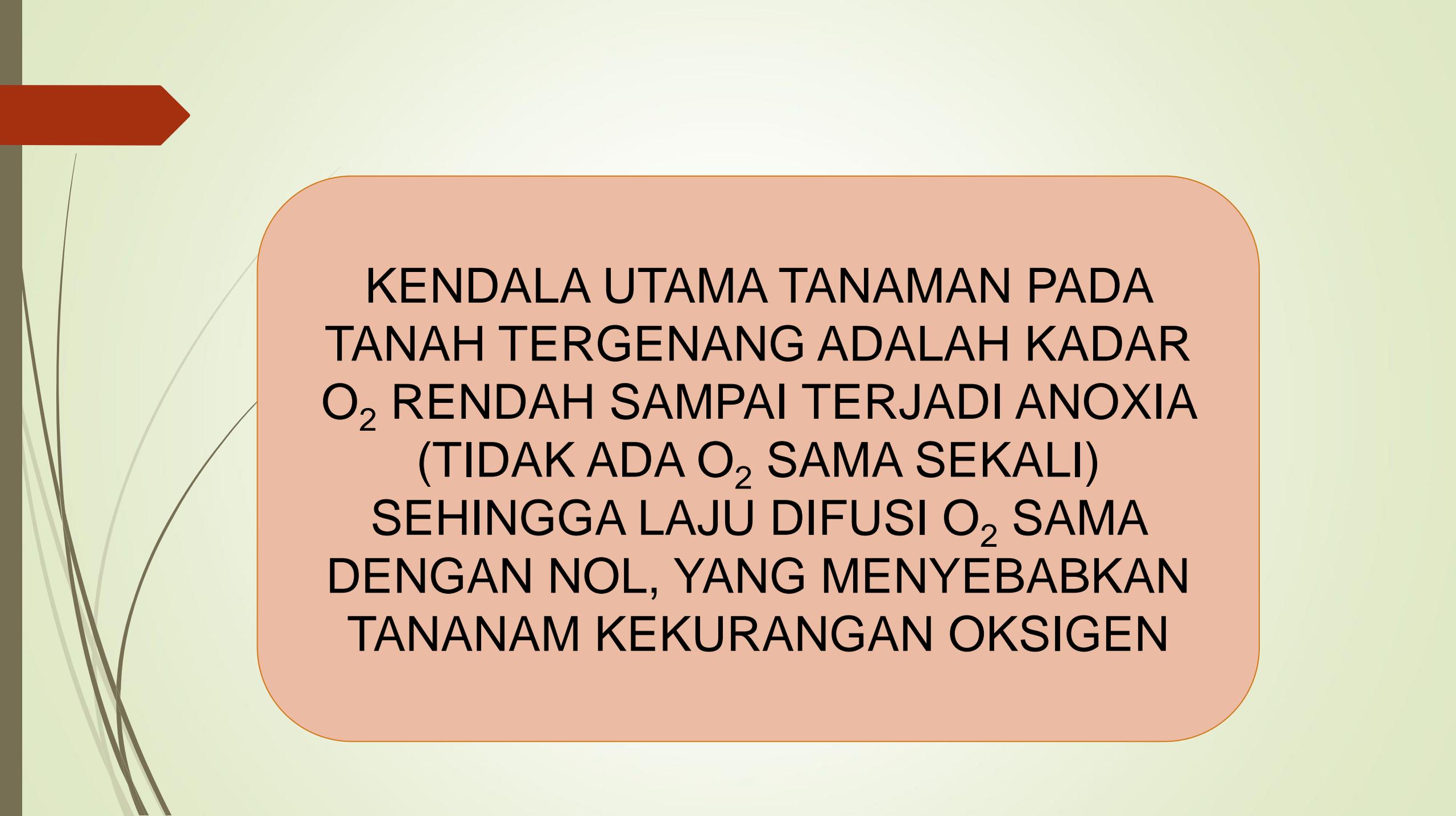
PERAN AIR YANG SANGAT PENTING  
TERSEBUT MENIMBULKAN  
KONSEKUENSI BAHWA LANGSUNG  
ATAU TIDAK LANGSUNG KEKURANGAN  
AIR PADA TANAMAN AKAN  
MEMPENGARUHI SEMUA PROSES  
METABOLIKNYA SEHINGGA DAPAT  
MENURUNKAN PERTUMBUHAN  
TANAMAN.



EFEK KELEBIHAN AIR ATAU BANJIR YANG UMUM ADALAH KEKURANGAN OKSIGEN, SEDANGKAN KEKURANGAN AIR ATAU KEKERINGAN AKAN MENGAKIBATKAN DEHIDRASI PADA TANAMAN YANG BERPENGARUH TERHADAP ZONA SEL TURGOR YANG SELANJUTNYA DAPAT MENGHAMBAT PERTUMBUHAN TANAMAN.



TANAH TERGENANG (WATERLOGGED SOIL) ADALAH TANAH YANG KADAR AIRNYA BERLEBIH, PORI TANAH PENUH TERISI AIR BAIK PADA TOP SOIL MAUPUN SUB SOIL. PENYEBABNYA BISA KARENA CURAH HUJAN BERLEBIH, TINGGINYA MUKA AIR TANAH (WATER TABLE), DAN LAIN-LAIN.



KENDALA UTAMA TANAMAN PADA  
TANAH TERGENANG ADALAH KADAR  
 $O_2$  RENDAH SAMPAI TERJADI ANOXIA  
(TIDAK ADA  $O_2$  SAMA SEKALI)  
SEHINGGA LAJU DIFUSI  $O_2$  SAMA  
DENGAN NOL, YANG MENYEBABKAN  
TANANAM KEKURANGAN OKSIGEN



TANAMAN YANG TIDAK ADAPTIF  
TERHADAP WATER LOGGING  
MENAMPAKKAN GEJALA INJURI  
SECARA GRADUAL.

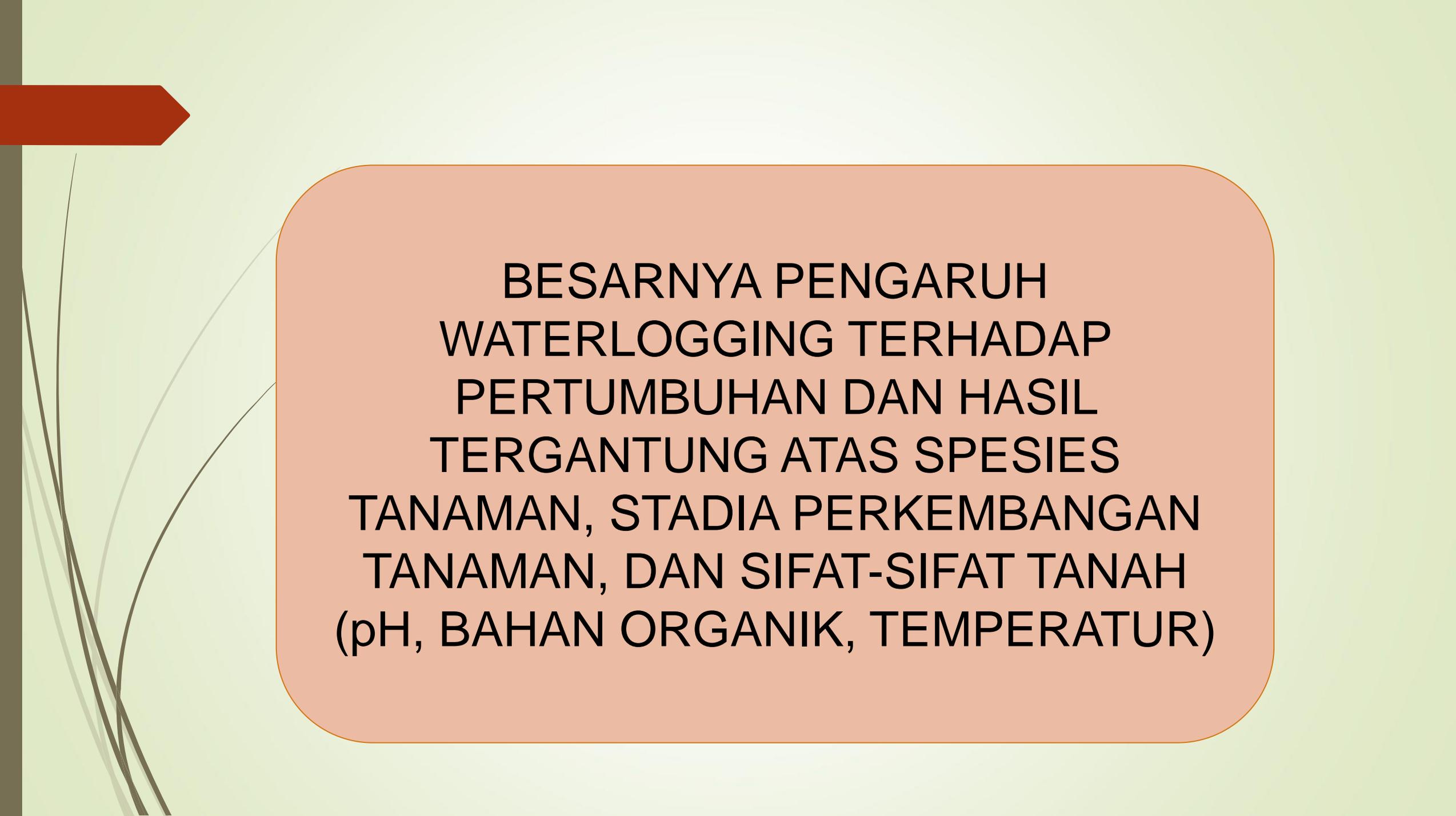
SIMTOM PERTAMA ADALAH LAYU  
DAN EPINASTI (DAUN MEMBENGGOK  
KE BAWAH). TERAKUMULASINYA  
ETILEN DI PUCUK ADALAH  
PENYEBAB LAYU (WILTING) DAN  
EPINASTI DAUN.



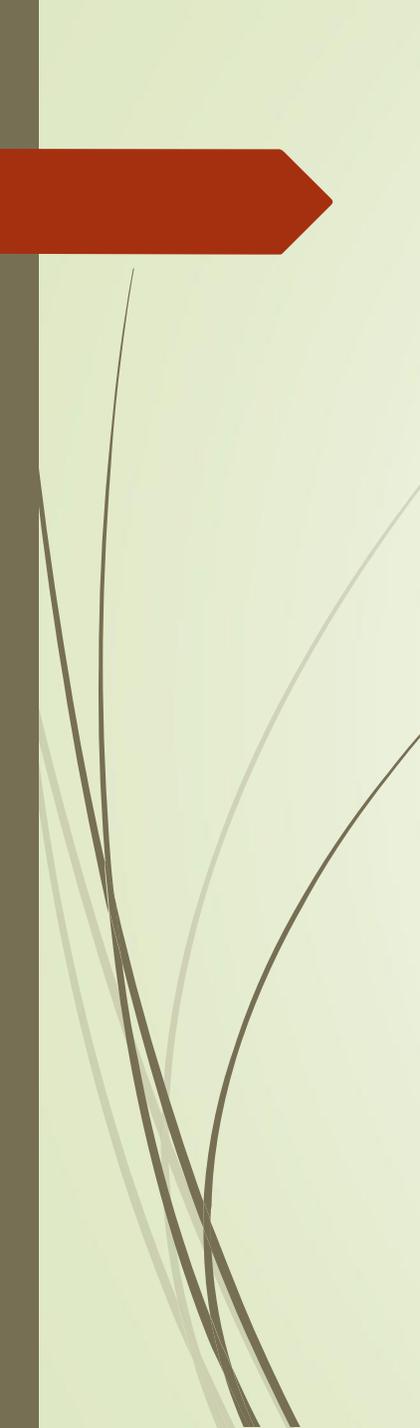
PADA TANAH TERGENANG,  
METABOLISME CARBON SECARA  
ANAEROBIK MENYEBABKAN  
AKUMULASI ETILEN DI TANAH.  
DISAMPING ITU TERJADI PULA  
AKUMULASI ASAM LEMAK BEBAS DAN  
FENOLIK. HAL ITU MERUSAK  
METABOLISME DAN PERTUMBUHAN  
AKAR.



PENGARUH LEBIH LANJUT,  
PERPANJANGAN DAUN MENURUN,  
SENESCEN DAUN BAWAH DAN  
NODULASI MENURUN (KARENA KADAR  
NO<sub>3</sub> - MENURUN). PENYEBAB  
WATERLOGGING INJURY BISA SECARA  
LANGSUNG KARENA DEFISIENSI O<sub>2</sub>  
ATAU SECARA TIDAK LANGSUNG  
KARENA AKUMULASI SENYAWA TOKSIK.



**BESARNYA PENGARUH  
WATERLOGGING TERHADAP  
PERTUMBUHAN DAN HASIL  
TERGANTUNG ATAS SPESIES  
TANAMAN, STADIA PERKEMBANGAN  
TANAMAN, DAN SIFAT-SIFAT TANAH  
(pH, BAHAN ORGANIK, TEMPERATUR)**



**WATERLOGGING DIKETAHUI  
BERPENGARH TERHADAP KEMAMPUAN  
MENYERAP HARA, PRODUKSI  
FITOHORMON TERUTAMA ETILEN,  
PRODUKSI ETANOL DAN SENYAWA  
ORGANIK TOKSIK AINNYA.**



MEKANISME ADAPTASI TERHADAP  
TANAH TERGENANG DENGAN  
KONDISI DEFISIT O<sub>2</sub> DAPAT MELALUI  
PENGHINDARAN/MENGHINDARI  
STRES (STRESS AVOIDANCE) ATAU  
TOLERAN TERHADAP STRES  
(STRESS TOLERANCE).



MEKANISME ADAPTASI DENGAN  
PENGHINDARAN STRES DILAKUKAN  
DENGAN ADAPTASI SECARA ANATOMIS DAN  
MORFOLOGIS SERTA ADAPTASI METABOLIK.  
MENGHIDARI STRES UMUMNYA  
MERUPAKAN MEKANISME ADAPTASI UTAMA,  
SEDANGKAN TOLERAN BERPERAAN  
SEBAGAI UPAYA ADAPTASI TAMBAHAN  
(GAMBAR 6).



PADA PADI, ADAPTASI ANATOMIS  
TERJADI DENGAN ADANYA  
POROSITAS AKAR YANG BESAR,  
YAITU PROPORSI ANTARA RUANG  
INTERSELULER YANG TERISI UDARA  
(AIR-FILLED INTERCELLULER SPACE)  
DENGAN AERENCHIMA.



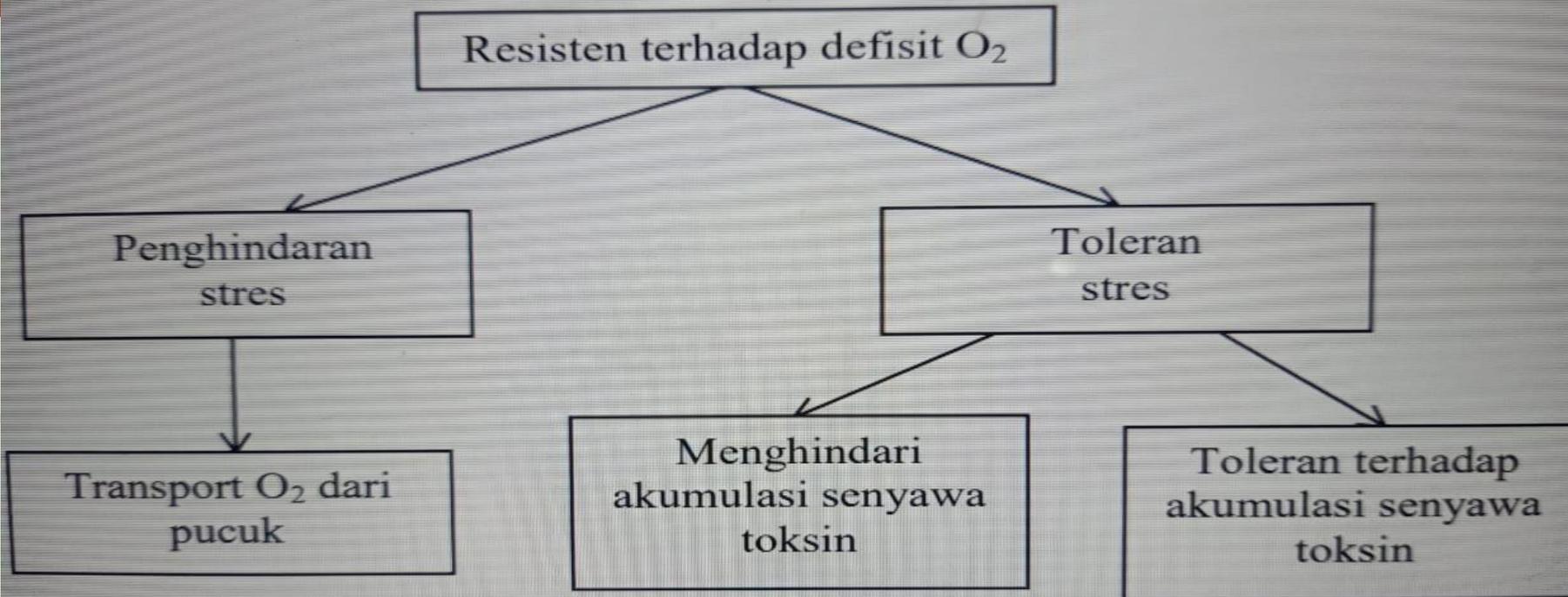
POROSITAS AKAR PADI 1,0 DAN JAGUNG 0,25. DENGAN POROSITAS AKAR YANG BESAR PADA PADI, MAKA TRANSPORT O<sub>2</sub> DARI DAUN KE AKAR KEMUDIAN DILANJUTKAN KE DAERAH RIZOSFIR TERJADI LEBIH BESAR SEHINGGA DAPAT MENGATASI KONDISI ANAEROBIK. TANAMAN TIDAK KEKURANGAN OKSIGEN BEBAS.



PERUBAHAN ANATOMI AKAR  
BERKORELASI ERAT DENGAN  
PERUBAHAN MORFOLOGI AKAR. PADA  
JENIS YANG TOLERAN, SETELAAH  
PENGGENANGAN AKAR TUANYA MATI,  
TETAPI 30 SEJUMLAH AKAR ADVENTIF  
DENGAN AERENCHYMA YANG  
BERKEMBANG BAIK TUMBUH DARI  
BAGIAN DASAR BATANG.



TEORI ADAPTASI METABOLIK DIAJUKAN OLEH CROWFOR YANG BERKAITAN DENGAN REAKSI BIOKIMIA PADA TANAMAN. TANAMAN YANG TOLERAN TANAH TERGENANG TERJADI PERUBAHAN REAKSI METABOLISME (METABOLIC SWITCH) DIMANA DARI REAKSI GLIKOLISIS DIHASILKAN MALAT, SEDANGKAN PADA TANAMAN NON-TOLERAN DARI REAKSI GLIKOLISIS DIHASILKAN ETANOL



Gambar 6. Mekanisme adaptasi tanaman terhadap kondisi tanah tergenang



# RESPON TANAMAN TERHADAP CEKAMAN KEKERINGAN



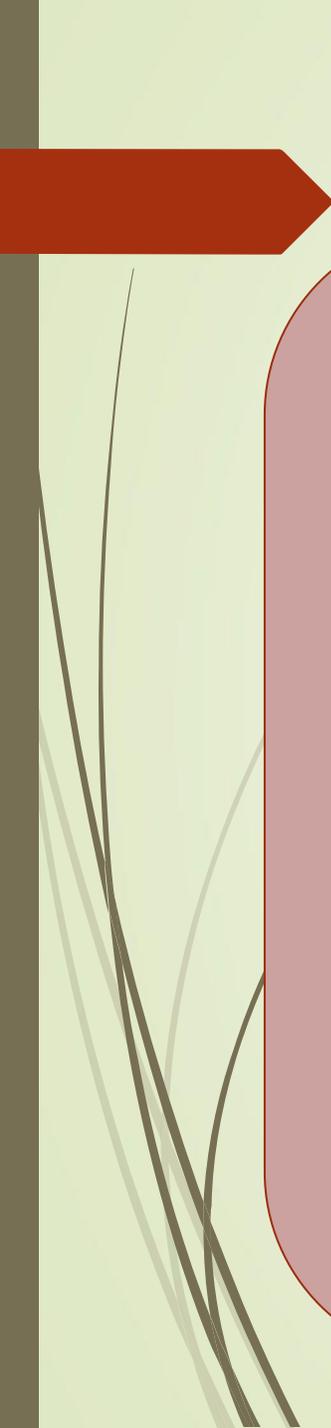
CEKAMAN KEKERINGAN PADA TANAMAN  
DISEBABKAN OLEH KEKURANGAN SUPLAI AIR  
DI DAERAH PERAKARAN DAN PERMINTAAN AIR  
YANG BERLEBIHAN OLEH DAUN DALAM  
KONDISI LAJU EVAPOTRANSPIRASI MELEBIHI  
LAJU ABSORPSI AIR OLEH AKAR TANAMAN.  
SERAPAN AIR OLEH AKAR TANAMAN  
DIPENGARUHI OLEH LAJU TRANSPIRASI,  
SISTEM PERAKARAN, DAN KETERSEDIAAN AIR  
TANAH



KEKURANGAN AIR AKAN MENGGANGGU  
AKTIFITAS FISILOGIS MAUPUN MORFOLOGIS,  
SEHINGGA MENGAKIBATKAN TERHENTINYA  
PERTUMBUHAN.  
DEFISIENSI AIR YANG TERUS MENERUS AKAN  
MENYEBABKAN PERUBAHAN IRREVERSIBEL  
(TIDAK DAPAT BALIK)



Respon tanaman terhadap stres air sangat ditentukan oleh tingkat stres yang dialami dan fase pertumbuhan tanaman saat mengalami cekaman



RESPON TANAMAN YANG MENGALAMI CEKAMAN KEKERINGAN MENCAKUP PERUBAHAN DITINGKAT SELULER DAN MOLEKULER SEPERTI PERUBAHAN PADA PERTUMBUHAN TANAMAN, VOLUME SEL MENJADI LEBIH KECIL, PENURUNAN LUAS DAUN, DAUN MENJADI TEBAL, ADANYA RAMBUT PADA DAUN, PENINGKATAN RATIO AKAR-TAJUK, SENSITIVITAS STOMATA, PENURUNAN LAJU FOTOSINTESIS, PERUBAHAN METABOLISME KARBON DAN NITROGEN, PERUBAHAN PRODUKSI AKTIVITAS ENZIM DAN HORMON, SERTA PERUBAHAN EKSPRESI.



Tumbuhan merespon kekurangan air dengan mengurangi laju transpirasi untuk penghematan air. Terjadinya kekurangan air pada daun akan menyebabkan sel-sel penjaga kehilangan turgornya. Suatu mekanisme control tunggal yang memperlambat transpirasi dengan cara menutup stomata.





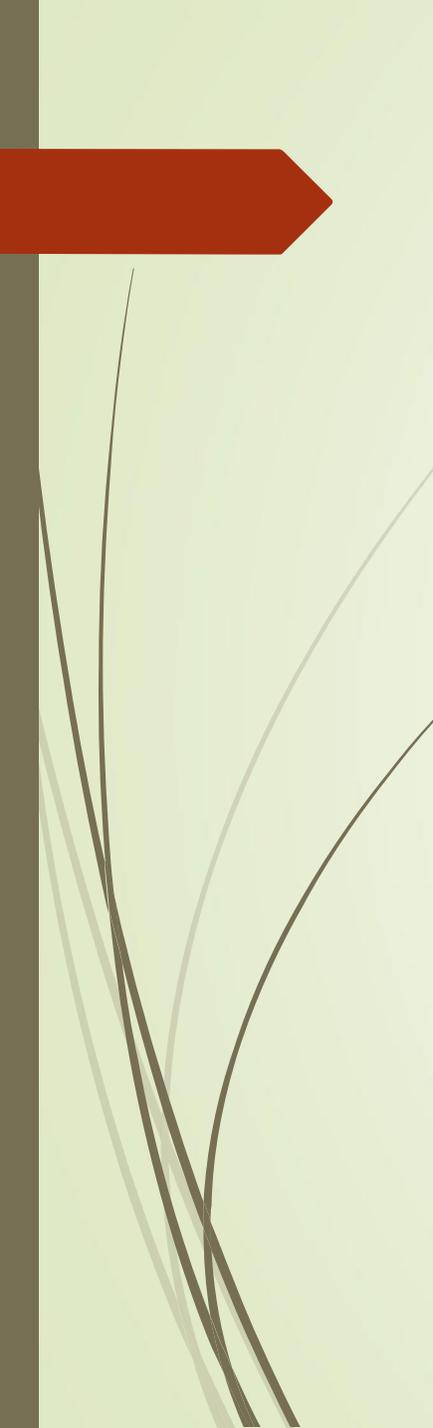
Kekurangan air juga merangsang peningkatan sintesis dan pembebasan asam absisat dari sel-sel mesofil daun.

Hormon ini membantu mempertahankan stomata tetap tertutup dengan cara bekerja pada membrane sel penjaga.



KARENA PEMBESARAN SEL ADALAH SUATU PROSES YANG TERGANTUNG PADA TURGOR, MAKA KEKURANGAN AIR AKAN MENGHAMBAT PERTUMBUHAN DAUN MUDA.

RESPON INI MEMINIMUMKAN KEHILANGAN AIR MELALUI TRANSPIRASI DENGAN CARA MEMPERLAMBAT PENINGKATAN LUAS PERMUKAAN DAUN.



KETIKA DAUN DARI KEBANYAKAN RUMPUT DAN KEBANYAKAN TUMBUHAN LAIN LAYU AKIBAT KEKURANGAN AIR, MEREKA AKAN MENGGULUNG MENJADI SUATU BENTUK YANG DAPAT MENGURANGI TRANSPIRASI DENGAN CARA MEMAPARKAN SEDIKIT SAJA PERMUKAAN DAUN KE MATAHARI.



RESPON DAUN MENGGULUNG  
SELAIN MEMBANTU TUMBUHAN  
UNTUK MENGHEMAT AIR, JUGA  
MENGURANGI FOTOSINTESIS.



PERTUMBUHAN AKAR JUGA MEMBERIKAN RESPON TERHADAP KEKURANGAN AIR. SELAMA KURANG AIR, TANAH UMUMNYA MONGERING DARI PERMUKAAN HINGGA BAWAHNYA. KEADAAN INI MENGHAMBAT PERTUMBUHAN AKAR DANGKAL, KARENA SELSELNYA TIDAK DAPAT MEMPERTAHANKAN TURGOR YANG DIPERLUKAN UNTUK PEMANJANGAN.



AKAR YANG LEBIH DALAM YANG  
DIKELILINGI OLEH TANAH YANG  
MASIH LEMBAB TERUS TUMBUH.  
DENGAN DEMIKIAN, SISTEM AKAR  
MEMPERBANYAK DIRI DENGAN  
CARA YANG MEMAKSIMUMKAN  
PEMAPARAN TERHADAP AIR  
TANAH