P8S6R3

അധ്യായം 13

പ്രകാശസംശ്ലേഷണം – ഉയർന്ന തലത്തിലുള്ള സസ്യങ്ങളിൽ

(Photosynthesis in Higher Plants)

13.1. നമുക്ക് എന്തെല്ലാം അറിയാം?

13.2. ആദ്യകാല പരീക്ഷണങ്ങൾ

13.3 എവിടെയാണ് പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്നത്?

13.4 പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിൽ എത്രതരം വർണകങ്ങളാണ് ഉൾപ്പെട്ടിരിക്കുന്നത്?

13.5 എന്താണ് പ്രകാശ ഘട്ടം?

13.6 ഇലക്ട്രോൺ സംവഹനം

13.7 ATP, NADPH എന്നിവ എവിടെയാണ് ഉപയോഗിക്കപ്പെടുന്നത്?

13.8 C_4 പാത

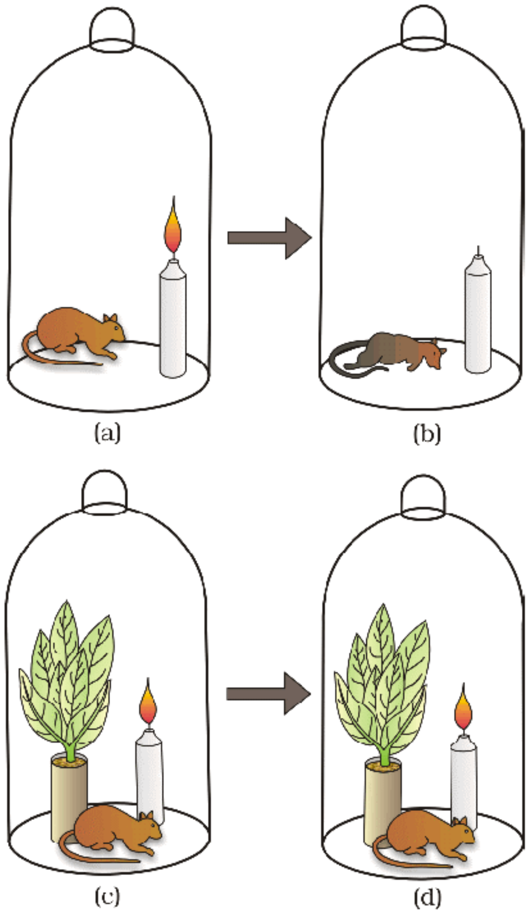
13.9 പ്രകാശശ്വസനം

13.10 പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ സ്വാധീനിക്കുന്ന ഘടകങ്ങൾ

മനുഷ്യനുൾപ്പെടെയുള്ള എല്ലാ ജന്തുക്കളും അവയുടെ ആഹാരത്തിനായി സസ്യങ്ങളെയാണ് ആശ്രയിക്കുന്നത്. സസ്യങ്ങൾക്ക് എവിടെനിന്നാണ് ആഹാരം ലഭ്യമാകുന്നതെന്ന് നിങ്ങൾ എപ്പോഴെങ്കിലും ചിന്തിച്ചിട്ടുണ്ടോ? യഥാർഥത്തിൽ ഹരിതസസ്യങ്ങൾക്ക് അവയ്ക്ക് ആവശ്യമായ ആഹാരം നിർമിക്കുകയോ സംശ്ലേഷിക്കുകയോ ചെയ്യേണ്ടിവരുന്നു. മറ്റുള്ള ജീവികൾ അവയുടെ ആഹാര ആവശ്യങ്ങൾക്കായി സസ്യങ്ങളെ ആശ്രയിക്കുകയും ചെയ്യുന്നു. ഹരിതസസ്യങ്ങൾ അവയ്ക്ക് ആവശ്യമായ ആഹാരം പ്രകാശസംശ്ലേഷണം വഴി നിർമിക്കുന്നതിനാൽ അവയെ സ്വപോഷികൾ (Autotrophs) എന്നുപറയുന്നു. സ്വപോഷണം (Autotrophic nutrition) സസ്യങ്ങളിൽ മാത്രമാണ് കാണപ്പെടുന്നതെന്നും ആഹാരത്തിനായി ഹരിതസസ്യങ്ങളെ ആശ്രയിക്കുന്ന മറ്റു ജീവികൾ പരപോഷികൾ (Heterotrophs) ആണെന്നും നിങ്ങൾ പഠിച്ചിട്ടുണ്ട്. ഹരിതസസ്യങ്ങളിൽ നടക്കുന്ന ഭൗതിക-രാസപ്രക്രിയ ആയ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിൽ പ്രകാശോർജത്തെ ഉപയോഗപ്പെടുത്തിക്കൊണ്ട് അവ കാർബണിക സംയുക്തങ്ങളുടെ നിർമാണം നടത്തുന്നു. അത്യന്തികമായി ഭൂമിയിലെ എല്ലാ ജീവജാലങ്ങളും ഊർജത്തിനായി സൂര്യപ്രകാശത്തെ ആശ്രയിക്കുന്നു. സൗരോർജം ഉപയോഗിച്ച് സസ്യങ്ങൾ നടത്തുന്ന പ്രകാശസംശ്ലേഷണമാണ് ഭൂമിയിൽ ജീവന്റെ അടിസ്ഥാനം. രണ്ട് കാരണങ്ങളാൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം വളരെയധികം പ്രാധാന്യം അർഹിക്കുന്നു. ഒന്നാമതായി, ഭൂമിയിൽ ആഹാരത്തിന്റെ പ്രാഥമിക ഉറവിടം പ്രകാശസംശ്ലേഷണമാണ്. രണ്ടാമതായി, ഈ പ്രക്രിയയിലൂടെയാണ് ഹരിതസസ്യങ്ങൾ അന്തരീക്ഷത്തിലേക്ക് ഓക്സിജനെ പുറന്തള്ളുന്നത്. *ശ്വസിക്കാൻ ഓക്സിജൻ ഇല്ലാത്ത അവസ്ഥയിൽ എന്ത് സംഭവിക്കുമെന്ന് നിങ്ങൾ എപ്പോഴെങ്കിലും ചിന്തിച്ചിട്ടുണ്ടോ?* ഈ അധ്യായത്തിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിനുള്ള ഘടനാപരമായ സംവിധാനത്തെയും പ്രകാശോർജത്തെ രാസോർജമായി മാറ്റുന്ന വിവിധ രാസപ്രവർത്തനങ്ങളുമാണ് പ്രധാനമായും പ്രതിപാദിക്കുന്നത്.

13.1 നമുക്ക് എന്തെല്ലാം അറിയാം?

പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെക്കുറിച്ച് നമുക്ക് എന്തൊക്കെ അറിയാമെന്ന് പരിശോധിക്കാം. മുൻ ക്ലാസുകളിൽ ഏർപ്പെട്ട ചില ലഘു പരീക്ഷണങ്ങളിൽ നിന്നും ഹരിതകം (ഇലകളിൽ I mW s¸ Sp¶ I cnX hÀW hk Xp), {] I mi w, CO_2 എന്നിവ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന് ആവശ്യമാണെന്ന് നിങ്ങൾ മനസ്സിലാക്കിയിട്ടുണ്ടാകും.



ചിത്രം 13.1 പ്രീസ്റ്റിലിയുടെ പരീക്ഷണം

ഇലകളിൽ അന്നജ നിർമാണം തെളിയിക്കുന്നതിനുള്ള പരീക്ഷണം നിങ്ങൾ ചെയ്തിട്ടുണ്ടാവുമല്ലോ? അതായത് ഒരു വർണ വൈവിധ്യമുള്ള (Variegated) ഇലയിലോ ഭാഗികമായി കറുത്ത പേപ്പർ കൊണ്ട് മറച്ച സാധാരണ ഇലയിലോ സൂര്യപ്രകാശം പതിപ്പിക്കുന്നു. ഈ ഇലകളിലെ അന്നജസാന്നിധ്യം പരിശോധിക്കുമ്പോൾ ഇലകളുടെ പച്ചനിറമുള്ള ഭാഗങ്ങളിൽ മാത്രമാണ് സൂര്യപ്രകാശത്തിന്റെ സാന്നിധ്യത്തിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടന്നതെന്ന് വ്യക്തമാകുന്നു.

നിങ്ങൾ ചെയ്തിട്ടുള്ള മറ്റൊരു പരീക്ഷണം നോക്കാം. ഒരു ഇലയുടെ പകുതി ഭാഗം കുറച്ച് KOH ൽ കുതിർത്ത പഞ്ഞിയുള്ള (ഇത് CO_2 ആഗിരണം ചെയ്യുന്നു) ടെസ്റ്റ്ട്യൂബിലേക്ക് ഇറക്കി വയ്ക്കുന്നു. ബാക്കി പകുതി വായുവുമായി സമ്പർക്കത്തിൽ വയ്ക്കുന്നു. ഈ സംവിധാനം കുറച്ച് സമയം പ്രകാശത്തിൽ വയ്ക്കുകയും തുടർന്ന് ഈ ഇലയിൽ അന്നജ പരിശോധന നടത്തുകയും ചെയ്യുന്നു. വായുവുമായി സമ്പർക്കത്തിലായിരുന്ന ഭാഗത്തിൽ അന്നജം ഉണ്ടായതായും ടെസ്റ്റ്ട്യൂബിനുള്ളിൽ ആയിരുന്ന ഭാഗത്തിൽ അന്നജ നിർമാണം നടന്നിട്ടില്ല എന്നും നിങ്ങൾ കണ്ടിട്ടുണ്ടാകും. ഇതിൽ നിന്ന് പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന് CO_2 അത്യാവശ്യമാണെന്ന് മനസിലാക്കാം. *എങ്ങനെയാണ് ഈ നിഗമനത്തിൽ എത്തിച്ചേർന്നത് എന്ന് നിങ്ങൾക്ക് വിശദീകരിക്കാമോ?*

13.2 ആദ്യകാല പരീക്ഷണങ്ങൾ (Early Experiments)

പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെക്കുറിച്ചുള്ള നമ്മുടെ അറിവുകളുടെ ക്രമാനുഗതമായ വളർച്ചയിലേക്ക് നയിച്ച ലഘുപരീക്ഷണങ്ങളെക്കുറിച്ച് മനസ്സിലാക്കുന്നത് നന്നായിരിക്കും.

1770 – ൽ ജോസഫ് പ്രീസ്റ്റിലി (1733–1804) നടത്തിയ ഒട്ടേറെ പരീക്ഷണങ്ങളാണ് ഹരിതസസ്യങ്ങളുടെ വളർച്ചയിൽ വായുവിനുള്ള പ്രധാന പങ്ക് വ്യക്തമാക്കിയത്. പ്രീസ്റ്റിലി ഓക്സിജൻ കണ്ടെത്തിയത് 1774 – ലാണ് എന്ന് നിങ്ങൾ ഓർക്കുന്നുണ്ടാകും.

വായു സഞ്ചാരമില്ലാത്ത ഒരു അടഞ്ഞ സ്ഥലത്ത്, അതായത് ഒരു ബെൽ ജാറിനകത്ത് കത്തിക്കൊണ്ടിരിക്കുന്ന മെഴുകുതിരി, പെട്ടെന്ന് അണഞ്ഞുപോകുന്നതായി പ്രീസ്റ്റിലി നിരീക്ഷിച്ചു (ചിത്രം 13.1 a, b, c, d). അതുപോലെ വായു സഞ്ചാരമില്ലാത്ത

ബെൽജാറിൽ എലിക്ക് ശ്വാസംമുട്ടുന്നതായും അദ്ദേഹം നിരീക്ഷിച്ചു. കത്തിക്കൊണ്ടിരിക്കുന്ന മെഴുകുതിരിയും വായു ശ്വസിക്കുന്ന ജീവിയും ബെൽ ജാറിലെ വായുവിനെ മലിനപ്പെടുത്തുന്നു എന്ന നിഗമനത്തിൽ പ്രീസ്റ്റിലി എത്തിച്ചേർന്നു. എന്നാൽ അതേ ബെൽ ജാറിൽ ഒരു പുതിനച്ചെടി (Mint plant) കൂടി വച്ചപ്പോൾ എലി ജീവിക്കുന്നതായും മെഴുകുതിരി അണയാതിരിക്കുന്നതായും അദ്ദേഹത്തിന് കാണാൻ കഴിഞ്ഞു. ഇതിൽ നിന്നും മെഴുകുതിരി കത്തുമ്പോഴും ജീവികൾ ശ്വസിക്കുമ്പോഴും നീക്കം ചെയ്യപ്പെടുന്ന വായു സസ്യങ്ങൾ പുനസ്ഥാപിക്കുന്നു എന്ന പരികൽപ്പനയിൽ പ്രീസ്റ്റിലി എത്തിച്ചേർന്നു.

മെഴുകുതിരിയും സസ്യവും ഉപയോഗിച്ച് എങ്ങനെയാണ് പ്രീസ്റ്റിലി പരീക്ഷണം നടത്തിയതെന്ന് സങ്കൽപ്പിച്ച് നോക്കൂ. ഏതാനും ദിവസങ്ങൾക്ക് ശേഷം മെഴുകുതിരി കത്തുമോ എന്ന് പരിശോധിക്കുന്നതിനായി അദ്ദേഹത്തിന് വീണ്ടും മെഴുകുതിരി കത്തിക്കേണ്ടതായി വന്നു. *പരീക്ഷണ സംവിധാനത്തിന് തടസ്സമുണ്ടാകാതെ ഏതൊക്കെ വ്യത്യസ്ത രീതികളിൽ മെഴുകുതിരി കത്തിക്കാമെന്ന് ആലോചിച്ച് നോക്കൂ.*

പ്രീസ്റ്റിലി സജ്ജീകരിച്ചതിന് സമാനമായ പരീക്ഷണ സംവിധാനം ജാൻ ഇൻജൻഹ്യൂസും (Jan Ingenhousz, 1730-1799) ഉപയോഗിച്ചു. അദ്ദേഹം ഇരുട്ടിലും പ്രകാശത്തിലും മാറിമാറി ആണ് ഈ സംവിധാനം സജ്ജീകരിച്ചത്. ജീവികൾ ശ്വസിക്കുമ്പോഴും മെഴുകുതിരി കത്തുമ്പോഴും മലിനമാക്കപ്പെടുന്ന വായുവിനെ ശുദ്ധീകരിക്കാനായി സസ്യങ്ങൾ നടത്തുന്ന പ്രക്രിയകൾക്ക് പ്രകാശം അത്യന്താപേക്ഷിതമാണെന്ന് അദ്ദേഹം തെളിയിച്ചു. ഇൻജൻഹ്യൂസ് ജല സസ്യത്തെ ഉപയോഗിച്ച് നടത്തിയ മറ്റൊരു പരീക്ഷണത്തിലൂടെ തെളിഞ്ഞ സൂര്യപ്രകാശത്തിൽ സസ്യത്തിന്റെ പച്ച നിറമുള്ള ഭാഗങ്ങൾക്ക് ചുറ്റും ചെറിയ കുമിളകൾ ഉണ്ടാകുന്നതായും ഇരുട്ടിൽ കുമിളകൾ ഉണ്ടാകുന്നില്ല എന്നും കണ്ടെത്തി. ഈ കുമിളകൾ ഓക്സിജൻ ആണെന്ന് പിന്നീട് അദ്ദേഹം തിരിച്ചറിഞ്ഞു. ഇങ്ങനെ സസ്യങ്ങളുടെ പച്ചനിറമുള്ള ഭാഗം മാത്രമാണ് ഓക്സിജൻ പുറത്തു വിടുന്നതെന്ന് അദ്ദേഹം തെളിയിച്ചു.

1854 – ഓടു കൂടി ജൂലിയസ് ഫോൺ സാക്സ് (Julius von Sachs) സസ്യങ്ങൾ വളരുമ്പോൾ ഗ്ലൂക്കോസ് നിർമിക്കുന്നു എന്നതിനുള്ള തെളിവു നൽകി. സാധാരണയായി ഗ്ലൂക്കോസ് അന്നജമായാണ് സംഭരിക്കപ്പെടുന്നത്. സസ്യങ്ങളിലെ പച്ച നിറത്തിന് കാരണമായ വസ്തു (ഹരിതകം – Chlorophyll ആണ് എന്ന് ഇന്ന് നമുക്കറിയാം) സസ്യകോശങ്ങൾക്കുള്ളിലെ ചില സവിശേഷ കണങ്ങൾക്കുള്ളിലാണ് (പിന്നീട് ഹരിതകണം– chloroplast എന്നുവിളിച്ചു) കാണപ്പെടുന്നത് എന്നും അദ്ദേഹം പിന്നീട് നടത്തിയ പഠനങ്ങളിൽ തെളിയിക്കപ്പെട്ടു. സസ്യങ്ങളുടെ പച്ച നിറമുള്ള ഭാഗത്താണ് ഗ്ലൂക്കോസ് നിർമിക്കുന്നത് എന്നും ഗ്ലൂക്കോസ് സാധാരണയായി അന്നജമായാണ് സംഭരിക്കുന്നത് എന്നും അദ്ദേഹം കണ്ടെത്തി.

റ്റി. ഡബ്ലിയു. എംഗൾമാൻ (T.W. Engelmann) (1843-1909) നടത്തിയ ചില രസകരമായ പരീക്ഷണങ്ങൾ നോക്കാം. അദ്ദേഹം വായവ (Aerobic) ബാക്ടീരിയകളുടെ സസ്പെൻഷനിൽ ഹരിത ആൽഗകളായ *ക്ലാഡോഫോറ (Cladophora)* യെ വളർത്തി. സൂര്യപ്രകാശത്തെ പ്രിസം ഉപയോഗിച്ച് വിഘടിപ്പിച്ച്, വ്യത്യസ്ത വർണരാജികളുടെ സാന്നിധ്യത്തിൽ ഇവയെ വളരാനനുവദിച്ചു. ഓക്സിജൻ സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെടുന്ന ഭാഗങ്ങൾ തിരിച്ചറിയാനായിരുന്നു വായവ ബാക്ടീരിയകളെ ഉപയോഗിച്ചത്.

വിഘടിത വർണരാജിയിലെ നീല വെളിച്ചത്തിന്റെയും ചുവന്ന വെളിച്ചത്തിന്റെയും ഭാഗത്താണ് ബാക്ടീരിയകൾ പ്രധാനമായും കുമിഞ്ഞുകൂടുന്നതെന്ന് അദ്ദേഹം കണ്ടെത്തി. അങ്ങനെ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ ആദ്യത്തെ പ്രാവർത്തിക വർണരാജി (Action spectrum) വിശദീകരിക്കപ്പെട്ടു. ഇത് ഹരിതകം *a*, *b* എന്നിവയുടെ ആഗിരണ വർണരാജിക്ക് (Absorption spectrum) ഏകദേശം സമാനമാണ് (13.4 എന്ന ഭാഗത്ത് ചർച്ചചെയ്തിട്ടുണ്ട്).

CO_2, ജലം എന്നിവയിൽ നിന്ന് കാർബോഹൈഡ്രേറ്റ് (ധാന്യകം) നിർമിക്കുന്നതിന് സസ്യങ്ങൾ പ്രകാശോർജം ഉപയോഗിക്കുന്നു എന്ന പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ പ്രധാന സവിശേഷത പത്തൊമ്പതാം നൂറ്റാണ്ടിന്റെ മധ്യത്തോടെ ലോകത്തിന് അറിയാൻ കഴിഞ്ഞു. ഓക്സിജൻ പുറന്തള്ളുന്ന ജീവജാലങ്ങളിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ മുഴുവൻ പ്രക്രിയകളെയും സൂചിപ്പിക്കുന്ന രാസവാക്യം ചുവടെ നൽകിയിരിക്കുന്ന രീതിയിലാണെന്ന് അങ്ങനെ കണ്ടെത്തി.

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{\text{പ്രകാശം}} [CH_2O] + O_2$$

ഇവിടെ $[CH_2O]$ എന്നത് കാർബോഹൈഡ്രേറ്റിനെ സൂചിപ്പിക്കുന്നു (ഉദാ. ഗ്ലൂക്കോസ് – ഒരു ആറ് കാർബൺ പഞ്ചസാര).

പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ കുറിച്ചുള്ള ധാരണയിൽ നാഴികക്കല്ലായ സംഭാവന നൽകിയ മൈക്രോബയോളജിസ്റ്റായിരുന്നു കൊർണീലിയസ് വാൻ നീൽ (Cornelius van Niel, 1897-1985). പർപ്പിൾ ബാക്ടീരിയ, ഹരിത ബാക്ടീരിയ എന്നിവയിൽ അദ്ദേഹം നടത്തിയ പരീക്ഷണങ്ങളിലൂടെ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം പൂർണമായും പ്രകാശത്തെ ആശ്രയിച്ച് നടക്കുന്ന രാസപ്രവർത്തനമാണെന്നും അതിൽ അനുയോജ്യമായ ഒരു ഓക്സീകാരിയിൽ നിന്നുമുള്ള ഹൈഡ്രജൻ കാർബൺ ഡൈഓക്സൈഡിനെ നിരോക്സീകരിച്ച് കാർബോഹൈഡ്രേറ്റാക്കി മാറ്റുന്നു എന്നും അദ്ദേഹം വിശദീകരിച്ചു: ഇത് താഴെക്കാണും പ്രകാരം വിവരിക്കാം.

$$2H_2A + CO_2 \xrightarrow{\text{പ്രകാശം}} 2A + CH_2O + H_2O$$

ഹരിതസസ്യങ്ങളിൽ ഹൈഡ്രജൻ ദാതാവായ H_2O ഓക്സീകരിക്കപ്പെട്ട് ഓക്സിജൻ ഉണ്ടാകുന്നു. ചില ജീവികൾ പ്രകാശസംശ്ലേഷണ സമയത്ത് ഓക്സിജൻ പുറത്തു വിടുന്നില്ല. പർപ്പിൾ ബാക്ടീരിയയിലും ഹരിത സൾഫർ ബാക്ടീരിയയിലും H_2S ആണ് ഹൈഡ്രജൻ ദാതാവായി വർത്തിക്കുന്നത്. ഇവിടെ ജീവികൾക്കനുസൃതമായി, ഹൈഡ്രജൻ സൾഫൈഡിന്റെ 'ഓക്സീകരണ' ഉൽപ്പന്നമായി ഓക്സിജന് പകരം സൾഫർ അല്ലെങ്കിൽ സൾഫേറ്റ് ഉണ്ടാകുന്നു. ഇതിൽ നിന്നും ഹരിത സസ്യങ്ങൾ ഓക്സിജനെ പുറന്തള്ളുന്നത് CO_2 ൽ നിന്നുമല്ല, മറിച്ച് H_2O ൽ നിന്നുമാണെന്ന നിഗമനത്തിൽ അദ്ദേഹം എത്തിച്ചേർന്നു. റേഡിയോ ഐസോടോപ്പ് സാങ്കേതികവിദ്യ ഉപയോഗിച്ച് പിൽക്കാലത്ത് നടത്തിയ പരീക്ഷണങ്ങളിലൂടെ ഇത് തെളിയിക്കപ്പെട്ടു. ആകയാൽ, പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിലെ മുഴുവൻ പ്രക്രിയകളെയും സൂചിപ്പിക്കുന്ന ശരിയായ രാസവാക്യം ചുവടെ നൽകിയിരിക്കുന്നു:

$$6CO_2 + 12H_2O \xrightarrow{\text{പ്രകാശം}} C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$

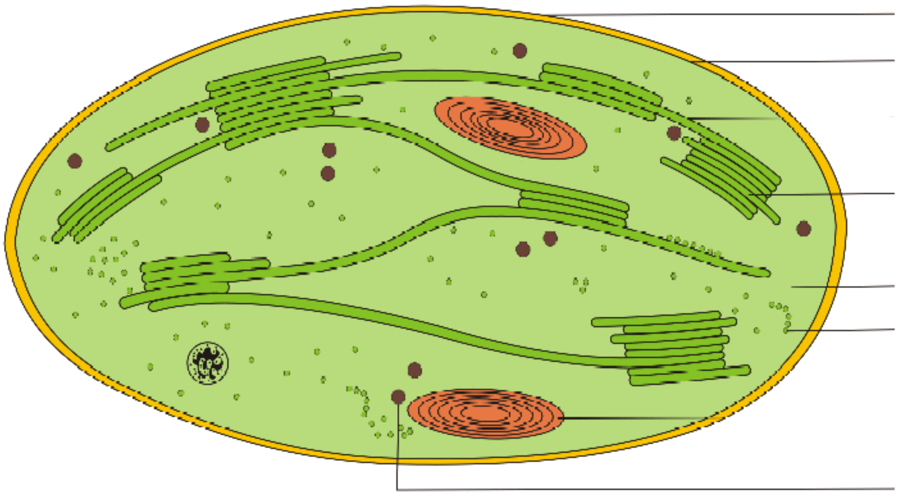
ഇതിൽ $C_6H_{12}O_6$ ഗ്ലൂക്കോസ് ആണ്. ഓക്സിജൻ സ്വതന്ത്രമാകുന്നത് ജലത്തിൽ നിന്നാണ്; ഇത് തെളിയിച്ചത് റേഡിയോ ഐസോടോപ്പ് സാങ്കേതികത ഉപയോഗിച്ചാണ്. ഈ രാസവാക്യം ഒരു രാസപ്രവർത്തനത്തെ സൂചിപ്പിക്കുന്നതല്ല എന്നും പ്രകാശസംശ്ലേഷണമെന്ന ബ്രഹത് പ്രക്രിയയുടെ വിശദീകരണം ആണെന്നും ശ്രദ്ധിക്കുക. *മുകളിൽ നൽകിയ രാസവാക്യത്തിൽ 12 ജലതന്മാത്രകൾ അഭികാരകമായി ഉപയോഗിച്ചത് എന്തുകൊണ്ടാണെന്ന് വിശദീകരിക്കാമോ?*

13.3 എവിടെയാണ് പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്നത്?

'പച്ചനിറമുള്ള ഇലകളിലോ' 'ഹരിതകണത്തിലോ' ആണെന്ന് നിങ്ങൾ അധ്യായം 8 ൽ പഠിച്ചതിന്റെ അടിസ്ഥാനത്തിൽ തീർച്ചയായും ഉത്തരം നൽകിയേക്കാം. പ്രകാശസംശ്ലേഷണം സസ്യങ്ങളുടെ പച്ച നിറമുള്ള ഇലകളെ കൂടാതെ ഹരിതവർണമുള്ള മറ്റു സസ്യഭാഗങ്ങളിലും നടക്കുന്നു. *പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്നു എന്നു നിങ്ങൾ കരുതുന്ന മറ്റു ചില സസ്യഭാഗങ്ങൾ ഏതൊക്കെയാണെന്ന് പറയാമോ?*

ഇലകളിലെ മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ ഹരിതകണങ്ങൾ ധാരാളമായി കാണപ്പെടുന്നു എന്ന് മുൻ അധ്യായങ്ങളിൽ നിങ്ങൾ മനസ്സിലാക്കിയത് ഓർമിക്കുക. പരമാവധി പതനരശ്മികൾ (Incident light) ലഭിക്കുന്നതിന് സാധാരണയായി മീസോഫിൽ കോശങ്ങളുടെ ഭിത്തിക്കരികിലായി ഹരിതകണങ്ങൾ ക്രമീകരിച്ചിരിക്കുന്നു. ഹരിതകണങ്ങളുടെ പരന്ന പ്രതലം മീസോഫിൽ കോശങ്ങളുടെ ഭിത്തിക്ക് സമാന്തരമായി ക്രമീകരിക്കപ്പെടുന്നത് എപ്പോഴാണ്? എപ്പോഴാണ് ഇവ പതനരശ്മിക്ക് ലംബമായി വരുന്നത്?

ഹരിതകണത്തിന്റെ ഘടന നിങ്ങൾ എട്ടാം അധ്യായത്തിൽ പഠിച്ചിട്ടുണ്ട്. ഹരിതകണത്തിനകത്ത് ഗ്രാന ഉൾപ്പെടുന്ന ഒരു സ്തര വ്യൂഹം, സ്ട്രോമ ലാമെല്ല, ദ്രാവകഭാഗമായ സ്ട്രോമ എന്നിവ കാണപ്പെടുന്നു (ചിത്രം 13.2). ഹരിതകണത്തിനുള്ളിലെ ധർമവിഭജനം വ്യക്തമാണ്. അതായത് സ്തര വ്യൂഹം പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്യുകയും ATP, NADPH എന്നിവ നിർമിക്കുകയും ചെയ്യുന്നു.



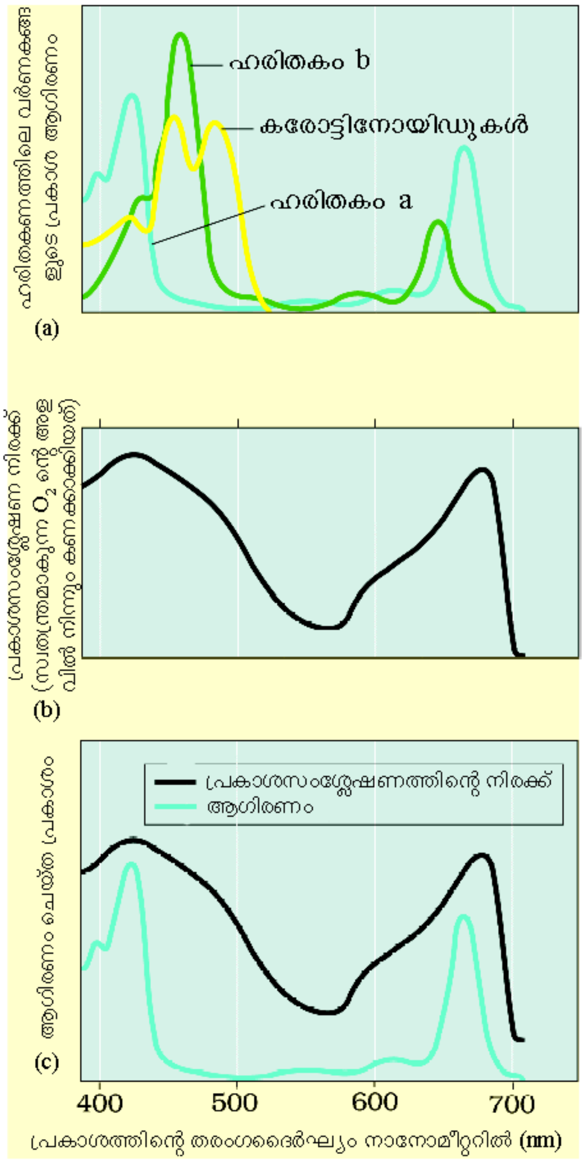
ചിത്രം 13.2 ഹരിതകണത്തിന്റെ ഛേദം - ഒരു ഇലക്ട്രോൺ മൈക്രോഗ്രാഫ് ചിത്രീകരണം

എന്നാൽ രാസാഗ്നികളുടെ സഹായത്താൽ പഞ്ചസാര നിർമാണവും തുടർന്നുള്ള അന്നജരൂപീകരണവും നടക്കുന്നത് സ്ട്രോമയിലാണ്. പ്രകാശം നേരിട്ട് ഉപയോഗിച്ച് ആദ്യം നടക്കുന്ന രാസപ്രവർത്തനങ്ങളെ **പ്രകാശഘട്ടം** (**Light reactions** or Photochemical reactions) എന്നറിയപ്പെടുന്നു. എന്നാൽ രണ്ടാമത് നടക്കുന്ന പ്രവർത്തനങ്ങളിൽ പ്രകാശം നേരിട്ട് ഉപയോഗിക്കാതെ പ്രകാശഘട്ടത്തിലെ ഉൽപ്പന്നങ്ങളായ ATP, NADPH എന്നിവ ഉപയോഗിക്കുന്നു. അതിനാൽ രണ്ടാമത് നടക്കുന്ന ഈ പ്രവർത്തനങ്ങളെ **ഇരുണ്ട ഘട്ടം** (**Dark reactions** or Carbon reactions) എന്ന് പരമ്പരാഗതമായി അറിയപ്പെടുന്നു. എന്നിരുന്നാലും ഇരുണ്ടഘട്ടം ഇരുട്ടത്താണ് നടക്കുന്നതെന്നോ പ്രകാശത്തെ ആശ്രയിക്കാതെ നടക്കുന്നുവെന്നോ വ്യാഖ്യാനിക്കരുത്.

13.4 പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിൽ എത്രതരം വർണകങ്ങളാണ് ഉൾപ്പെട്ടിരിക്കുന്നത്?

സസ്യങ്ങളുടെ ഇലകളെ നിരീക്ഷിക്കൂ. ഇലകളുടെ പച്ച നിറത്തിൽ, അവ ഒരേ സസ്യത്തിന്റേതാണെങ്കിൽക്കൂടി വൈവിധ്യം കാണപ്പെടുന്നില്ലേ? ഏതെങ്കിലും ഹരിത സസ്യത്തിന്റെ ഇലയിലെ വർണകങ്ങൾ പേപ്പർ ക്രൊമാറ്റോഗ്രാഫിയിലൂടെ വേർതിരിച്ച് ഇതിന്റെ കാരണം നമുക്ക് കണ്ടെത്താൻ ശ്രമിക്കാം. ഇലയുടെ നിറത്തിന് കാരണം ഒരു വർണകമല്ലെന്നും നാല് തരം വർണകങ്ങളാണെന്നും ക്രൊമാറ്റോഗ്രാഫിയിലൂടെ വേർതിരിച്ച് കാണാവുന്നതാണ്. **ഹരിതകം a** (ക്രൊമാറ്റോഗ്രാമിൽ കടും പച്ച അല്ലെങ്കിൽ നീല കലർന്ന പച്ച നിറം) **ഹരിതകം b** (മഞ്ഞ കലർന്ന പച്ച നിറം), **സാന്തോഫിൽ** (മഞ്ഞ നിറം), **കരോട്ടിനോയിഡുകൾ** (മഞ്ഞ നിറം അല്ലെങ്കിൽ മഞ്ഞ കലർന്ന ഓറഞ്ച് നിറം) എന്നിവയാണ് ഇലയിലുള്ള വർണകങ്ങൾ. പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിൽ ഈ വർണകങ്ങളുടെ പങ്ക് എന്താണെന്ന് നോക്കാം.

നിശ്ചിത തരംഗ ദൈർഘ്യമുള്ള പ്രകാശത്തെ ആഗിരണം ചെയ്യാൻ കഴിവുള്ള സംയുക്തങ്ങളാണ് വർണകങ്ങൾ. *ലോകത്തിൽ ഏറ്റവും കൂടുതലായി കാണപ്പെടുന്ന സസ്യ വർണകം ഏതാണെന്ന് ഊഹിക്കാമോ?* ഹരിതകം a യ്ക്ക് ആഗിരണം ചെയ്യാൻ കഴിയുന്ന വ്യത്യസ്ത തരംഗദൈർഘ്യം ഉള്ള പ്രകാശത്തെ സൂചിപ്പിക്കുന്ന ഗ്രാഫ് നമുക്ക് നിരീക്ഷിക്കാം (ചിത്രം 13.3 a). ദൃശ്യപ്രകാശവർണരാജിയുടെയും VIBGYOR ന്റെയും തരംഗദൈർഘ്യത്തെ കുറിച്ച് നിങ്ങൾക്ക് അറിയാവുന്നതാണ്.



ചിത്രം 13.3a ഹരിതകം a, b, കരോട്ടിനോയിഡുകൾ എന്നിവയുടെ ആഗിരണ വർണരാജി കാണിക്കുന്ന ഗ്രാഫ്.

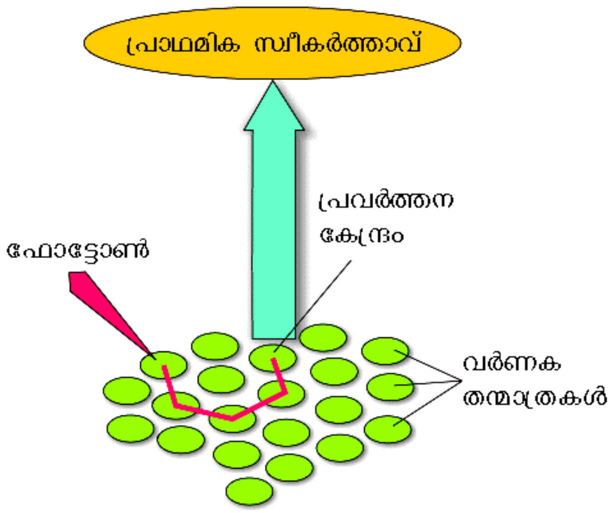
ചിത്രം 13.3b പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ പ്രാവർത്തിക വർണരാജി സൂചിപ്പിക്കുന്ന ഗ്രാഫ്.

ചിത്രം 13.3c പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ പ്രാവർത്തിക വർണരാജി ഹരിതകം a യുടെ ആഗിരണവർണരാജിക്ക് മുകളിലായി സൂചിപ്പിച്ചിരിക്കുന്ന ഗ്രാഫ്.

ചിത്രം 13.3 a നിരീക്ഷിച്ച് ഹരിതകം a പരമാവധി ആഗിരണം ചെയ്യുന്ന തരംഗ ദൈർഘ്യം (പ്രകാശത്തിന്റെ നിറം) ഏതാണെന്ന് കണ്ടെത്താമോ? അതിന് മറ്റേതെങ്കിലും തരംഗദൈർഘ്യത്തിൽ കൂടുതൽ ആഗിരണം നടത്താൻ കഴിയുമോ? എങ്കിൽ ഏതിലാണ്?

ഒരു സസ്യത്തിൽ പരമാവധി പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്ന തരംഗ ദൈർഘ്യങ്ങൾ സൂചിപ്പിക്കുന്ന ചിത്രം 13.3 b നിരീക്ഷിക്കൂ. ഹരിതകം a പരമാവധി ആഗിരണം ചെയ്യുന്ന തരംഗദൈർഘ്യങ്ങളായ നീലയിലും ചുവപ്പിലും പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ തോതും കൂടുതലായി കാണുന്നു. അതുകൊണ്ട് പ്രകാശ സംശ്ലേഷണവുമായി ബന്ധപ്പെട്ട പ്രധാനവർണകം ഹരിതകം a ആണെന്ന നിഗമനത്തിലെത്താവുന്നതാണ്. *എന്നാൽ ചിത്രം 13.3 c നിരീക്ഷിക്കുമ്പോൾ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ പ്രാവർത്തിക വർണരാജിയും ഹരിതകം a യുടെ ആഗിരണവർണരാജിയും പൂർണമായും ഒന്നിന് മുകളിൽ മറ്റൊന്ന് (Overlap) എന്ന ക്രമത്തിൽ കാണപ്പെടുന്നുണ്ടോ?*

ഈ ഗ്രാഫുകൾ സൂചിപ്പിക്കുന്നതുപോലെ ദൃശ്യപ്രകാശത്തിന്റെ വർണരാജിയിൽ നീല, ചുവപ്പ് എന്നീ തരംഗദൈർഘ്യങ്ങളുള്ള ഭാഗങ്ങളിലാണ് ഭൂരിഭാഗം പ്രകാശസംശ്ലേഷണവും നടക്കുന്നത്. ദൃശ്യപ്രകാശത്തിലെ മറ്റു ചില തരംഗദൈർഘ്യങ്ങളിലും ചെറിയ തോതിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്നുണ്ട്. ഇത് എങ്ങനെയാണ് നടക്കുന്നതെന്ന് നോക്കാം. പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്യുന്നത് പ്രധാനമായും ഹരിതകം a ആണെങ്കിലും സഹായക വർണകങ്ങൾ (Accessory pigments) എന്നറിയപ്പെടുന്ന മറ്റ് തൈലക്കോയ്ഡ് വർണകങ്ങളായ ഹരിതകം b, സാന്തോഫിൽ, കരോട്ടിനോയിഡ് എന്നിവയും പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്യുന്നു. ഇവ ആഗിരണം ചെയ്യുന്ന പ്രകാശത്തിലെ ഊർജം ഹരിതകം a യ്ക്ക് കൈമാറുന്നു. ഇവ വ്യത്യസ്ത തരംഗദൈർഘ്യമുള്ള പ്രകാശരശ്മികളെ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന് ഉപയോഗപ്പെടുത്താൻ സഹായിക്കുക മാത്രമല്ല ഹരിതകം a യെ പ്രകാശ ഓക്സീകരണത്തിൽ (Photo-oxidation) നിന്ന് സംരക്ഷിക്കുകയും ചെയ്യുന്നു.



ചിത്രം 13.4 പ്രകാശം ആഗിരണം നടത്തുന്ന സഞ്ചയം

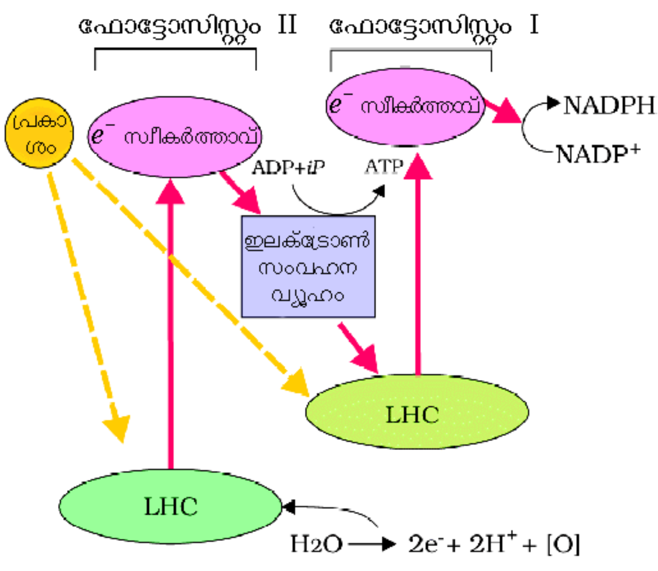
13.5 എന്താണ് പ്രകാശ ഘട്ടം?

പ്രകാശത്തിന്റെ ആഗിരണം, ജലത്തിന്റെ വിഘടനം, ഓക്സിജൻ പുറന്തള്ളൽ, ഊർജ സമ്പുഷ്ടമായ രാസ തന്മാത്രകളായ ATP, NADPH എന്നിവയുടെ രൂപീകരണം എന്നിവ ഉൾപ്പെട്ടതാണ് പ്രകാശഘട്ടം (പ്രകാശ രാസഘട്ടം). അനേകം മാംസ്യസഞ്ചയങ്ങൾ (Protein complexes) ഈ പ്രക്രിയയിൽ ഉൾപ്പെട്ടിരിക്കുന്നു. പ്രകാശത്തെ ആഗിരണം ചെയ്യുന്ന രണ്ട് വ്യത്യസ്ത തരം **പ്രകാശരാസീയ സഞ്ചയങ്ങളായി (Light harvesting complex - LHC)** വർണകങ്ങൾ **ഫോട്ടോസിസ്റ്റം I ലും (PS I) ഫോട്ടോസിസ്റ്റം II (PS II)** ലുമായി ക്രമീകരിച്ചിരിക്കുന്നു.

ഇവ കണ്ടുപിടിച്ചതിന്റെ ക്രമത്തിലാണ് പേര് നൽകിയിരിക്കുന്നത്. അല്ലാതെ പ്രകാശഘട്ടത്തിൽ ആരാണ് ആദ്യം പ്രവർത്തിക്കുന്നത് എന്നതിന്റെ അടിസ്ഥാനത്തിലല്ല. **പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്യുന്ന സഞ്ചയങ്ങൾ (Light harvesting complexes - LHC)** നിർമ്മിക്കപ്പെട്ടിരിക്കുന്നത് നൂറുകണക്കിന് വർണക തന്മാത്രകൾ പ്രോട്ടീനുമായി കൂടിച്ചേർന്നാണ്. ഓരോ ഫോട്ടോസിസ്റ്റത്തിലും എല്ലാ വർണകങ്ങളും (ഹരിതകം a യുടെ ഒരു തന്മാത്ര ഒഴികെ) ചേർന്ന് പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്യുന്ന ഒരു വ്യവസ്ഥയായി രൂപപ്പെട്ടിരിക്കുന്നു. ഇത് **ആന്റിനേ (Antennae)** എന്നും അറിയപ്പെടുന്നു (ചിത്രം 13.4). ഇവ വ്യത്യസ്ത തരംഗദൈർഘ്യത്തിലുള്ള പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്ത് പ്രകാശസംശ്ലേഷണം കൂടുതൽ കാര്യക്ഷമമാക്കുന്നു. ഫോട്ടോസിസ്റ്റത്തിൽ കാണപ്പെടുന്ന ഹരിതകം a തന്മാത്രയാണ് **പ്രവർത്തനകേന്ദ്രം (Reaction centre)** ആകുന്നത്. രണ്ട് ഫോട്ടോസിസ്റ്റത്തിലെയും പ്രവർത്തന കേന്ദ്രം വ്യത്യസ്തമാണ്. PS I ലെ പ്രവർത്തന കേന്ദ്രമായ ഹരിതകം a പരമാവധി ആഗിരണം ചെയ്യുന്നത് 700 nm ആണ്. അതിനാൽ ഇത് **P700** എന്നറിയപ്പെടുന്നു. എന്നാൽ PS II പരമാവധി ആഗിരണം ചെയ്യുന്നത് 680 nm ആണ്. അതിനാൽ ഇത് **P 680** എന്നറിയപ്പെടുന്നു.

13.6 ഇലക്ട്രോൺ സംവഹനം

ഫോട്ടോസിസ്റ്റം II ലെ പ്രവർത്തനകേന്ദ്രമായ ഹരിതകം a, 680 nm തരംഗദൈർഘ്യമുള്ള ചുവന്ന പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്ത് ഇലക്ട്രോണുകളെ ഉത്തേജിപ്പിക്കുന്നു. ഇത്തരത്തിൽ ഉത്തേജിപ്പിക്കപ്പെട്ട ഇലക്ട്രോണുകൾ അറ്റോമിക ന്യൂക്ലിയസിൽ നിന്ന് അകലെയുള്ള ഒരു ഓർബിറ്റിലേക്ക് ചാടുന്നു. ഈ ഇലക്ട്രോണുകളെ ഒരു ഇലക്ട്രോൺ സ്വീകർത്താവ് സ്വീകരിച്ച് അവിടെ നിന്നും **സൈറ്റോക്രോമുകൾ (Cytochromes)** ഉൾപ്പെടുന്ന **ഇലക്ട്രോൺ സംവഹന വ്യവസ്ഥ**യിലേക്ക് കടത്തിവിടുന്നു (ചിത്രം 13.5). ഓക്സീകരണ നിരോക്സീകരണക്ഷമത അല്ലെങ്കിൽ റിഡോക്സ് ക്ഷമത നിരക്കിനെ ആധാരമാക്കിയുള്ള ഈ ഇലക്ട്രോൺ സഞ്ചാരം അവരോഹണ ക്രമത്തിലാണ് (Downhill) നടക്കുന്നത്. ഇലക്ട്രോൺ സംവഹനശൃംഖലയിലൂടെ ഇലക്ട്രോണുകൾ സഞ്ചരിക്കുമ്പോൾ അവ ഉപയോഗിക്കപ്പെടാതെ ഫോട്ടോസിസ്റ്റം I ലെ വർണകങ്ങളിലൂടെ കടന്നുപോകുന്നു. അതേസമയം PS I ലെ പ്രവർത്തന കേന്ദ്രത്തിലെ ഇലക്ട്രോണുകളും ചുവന്ന പ്രകാശത്തിന്റെ 700nm തരംഗദൈർഘ്യം സ്വീകരിച്ച് ഉത്തേജിപ്പിക്കപ്പെടുന്നു. ഇവ ഉയർന്ന ഓക്സീകരണ നിരോക്സീകരണ ക്ഷമതയുള്ള മറ്റൊരു സ്വീകരണ തന്മാത്രയിലേക്ക് മാറ്റപ്പെടുന്നു. ഈ ഇലക്ട്രോണുകൾ വീണ്ടും അവരോഹണക്രമത്തിൽ ഊർജസമ്പുഷ്ടമായ $NADP^+$ തന്മാത്രയിലേക്ക് സഞ്ചരിക്കുന്നു. ഈ ഇലക്ട്രോണുകൾ കൂട്ടിച്ചേർക്കുമ്പോൾ $NADP^+$, $NADPH + H^+$ ആയി നിരോക്സീകരിക്കുന്നു. PS II ൽ നിന്നും ആരോ



ചിത്രം 13.5 പ്രകാശഘട്ടത്തിന്റെ Z സ്കീം

ഹണക്രമത്തിൽ (Uphill) സ്വീകരണതന്മാത്രയിലേക്കും അവരോഹണ ക്രമത്തിൽ ഇലക്ട്രോൺ സംവഹനപാതയിലൂടെ PS I ലേക്കുമുള്ള ഇലക്ട്രോണുകളുടെ കൈമാറ്റം, ഇലക്ട്രോണുകളുടെ ഉത്തേജനം, മറ്റൊരു സ്വീകരണ തന്മാത്രയിലേയ്ക്കുള്ള കൈമാറ്റം, അന്തിമമായി അവരോഹണക്രമത്തിൽ $NADP^+$ ലേക്ക് കൈമാറ്റം ചെയ്യുക വഴി $NADP^+$ ന്റെ നിരോക്സീകരണവും $NADPH+H^+$ ന്റെ രൂപീകരണം എന്നിവയെല്ലാം ഉൾപ്പെട്ടുള്ള വ്യവസ്ഥയാണ് **Z സ്കീം** (ചിത്രം 13.5). എല്ലാ വാഹകരെയും ഓക്സീകരണ നിരോക്സീകരണ നിരക്ക് പ്രകാരം ക്രമീകരിക്കുമ്പോഴാണ് ഈ ആകൃതി കൈവരുന്നത്.

13.6.1 ജലത്തിന്റെ വിഘടനം

PS II തുടർച്ചയായി ഇലക്ട്രോണുകളെ പ്രദാനം ചെയ്യുന്നത് എങ്ങനെയാണ് എന്ന് നിങ്ങൾ ചോദിച്ചേക്കാം. ഫോട്ടോസിസ്റ്റം II ൽ നിന്ന് പുറപ്പെട്ട ഇലക്ട്രോണുകൾക്ക് പകരം ഇലക്ട്രോണുകൾ പുനസ്ഥാപിക്കേണ്ടതുണ്ട്. ജലത്തിന്റെ വിഘടനത്തിലൂടെ ലഭ്യമാകുന്ന ഇലക്ട്രോണുകളിലൂടെയാണ് ഇത് സാധ്യമാകുന്നത്. PS IIമായി ബന്ധപ്പെട്ടാണ് ജലത്തിന്റെ വിഘടനം നടക്കുന്നത്. ജലം വിഘടിച്ച് $2H^+$, [O], ഇലക്ട്രോണുകൾ എന്നിവയുണ്ടാകുന്നു. ഇതിലൂടെ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ അവസാന ഉൽപ്പന്നങ്ങളിൽ ഒന്നായ ഓക്സിജൻ ഉണ്ടാകുന്നു. ഫോട്ടോസിസ്റ്റം I ൽ നിന്ന് നീക്കം ചെയ്യപ്പെട്ട ഇലക്ട്രോണുകൾക്ക് പകരം ഇലക്ട്രോണുകളെ നൽകുന്നത് ഫോട്ടോസിസ്റ്റം II ആണ്.

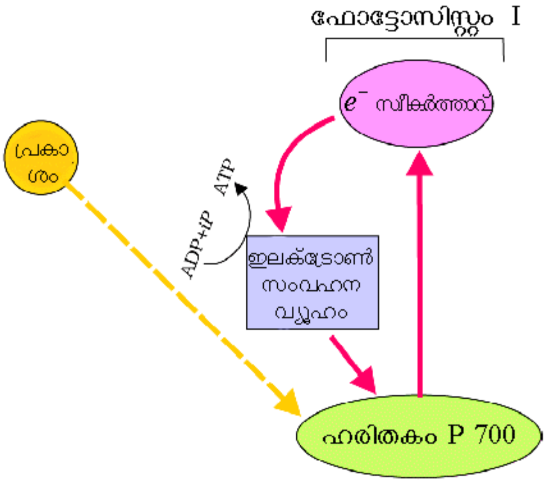
$$2H_2O \longrightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^-$$

ജലവിഘടനസഞ്ചയം (Water splitting complex) പ്രധാനമായും ബന്ധപ്പെട്ടിരിക്കുന്നത് തൈലക്കോയ്ഡ് സ്തരത്തിന്റെ ഉള്ളിൽ സ്ഥിതി ചെയ്യുന്ന PS II മായാണ് എന്നത് ശ്രദ്ധേയമാണ്. അങ്ങനെയെങ്കിൽ ഉൽപ്പാദിപ്പിക്കപ്പെട്ട പ്രോട്ടോണുകളും ഓക്സിജനും എവിടെയാണ് സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെടുന്നത്? സ്തര അറയിലേയ്ക്കോ സ്തരത്തിന്റെ പുറത്തേക്കോ?

13.6.2 സൈക്ലിക് ഫോട്ടോ ഫോസ്ഫോറിലേഷനും നോൺ സൈക്ലിക് ഫോട്ടോ ഫോസ്ഫോറിലേഷനും (Cyclic and Non-cyclic photo-phosphorylation)

ഓക്സീകരിക്കാവുന്ന വസ്തുക്കളിൽ നിന്ന് ഊർജം ലഭ്യമാക്കാനും അതിനെ ബന്ധന ഊർജത്തിന്റെ (Bond energy) രൂപത്തിൽ സംഭരിക്കാനുമുള്ള കഴിവ് ജീവജാലങ്ങൾക്കുണ്ട്. ATP എന്ന സവിശേഷ തന്മാത്രകളാണ് ഊർജത്തെ അവയുടെ രാസബന്ധനങ്ങളിൽ വഹിക്കുന്നത്. കോശങ്ങൾ (മൈറ്റോകോൺഡ്രിയ, ഹരിതകണം എന്നിവയിൽ) ATP നിർമിക്കുന്ന പ്രക്രിയയെ ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ എന്നിറയപ്പെടുന്നു. അകാർബണിക ഫോസ്ഫേറ്റും ADP യും ഉപയോഗിച്ച് പ്രകാശത്തിന്റെ സാന്നിധ്യത്തിൽ ATP നിർമിക്കുന്ന പ്രക്രിയയാണ് ഫോട്ടോ ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ. ആദ്യം PS II തുടർന്ന് PS I എന്ന ക്രമത്തിൽ രണ്ട് ഫോട്ടോസിസ്റ്റവും ഒരു ശ്രേണിയായി പ്രവർത്തിക്കുമ്പോൾ നടക്കുന്ന പ്രക്രിയയാണ് നോൺ സൈക്ലിക് ഫോട്ടോ ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ. മുൻപ് നൽകിയ Z സ്കീമിൽ ഈ രണ്ട് ഫോട്ടോസിസ്റ്റവും ഇലക്ട്രോൺ സംവഹന ശൃംഖല വഴി ബന്ധപ്പെട്ടിരിക്കുന്നതായി കാണാവുന്നതാണ്.

ഇത്തരത്തിലുള്ള ഇലക്ട്രോൺ പ്രവാഹത്തിലൂടെ ATP, NADPH+H^+ എന്നിവ നിർമിക്കപ്പെടുന്നു (ചിത്രം 13.5 നിരീക്ഷിക്കൂ).



ചിത്രം 13.6 സൈക്ലിക് ഫോട്ടോ ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ

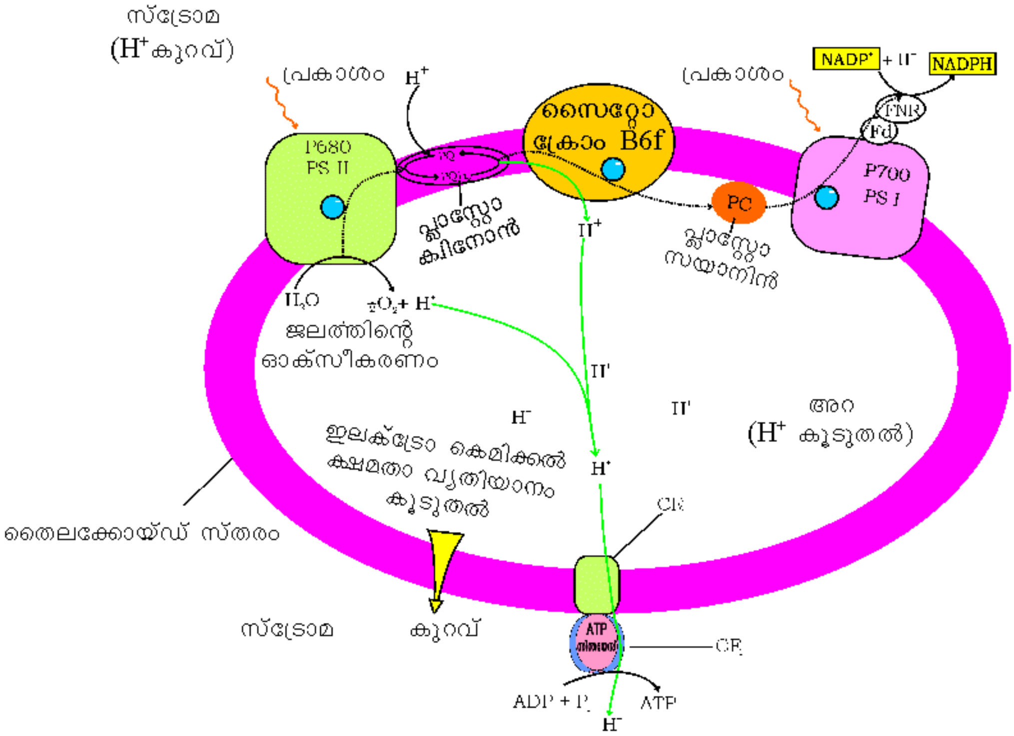
PS I മാത്രം പ്രവർത്തിക്കുമ്പോൾ ഫോട്ടോസിസ്റ്റത്തിനുള്ളിൽ തന്നെ ഇലക്ട്രോൺ ചാക്രികമായി സഞ്ചരിക്കുന്നു. ഇവിടെ ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ നടക്കുന്നത് ഇലക്ട്രോണുകളുടെ ചാക്രിക പ്രവാഹത്തിലൂടെയാണ് (ചിത്രം 13.6). ഇത് നടക്കാൻ സാധ്യതയുള്ളത് സ്ട്രോമ ലാമെല്ലയിലാണ്. ഗ്രാനയുടെ സ്തരം അല്ലെങ്കിൽ ലാമെല്ലയിൽ PS I, PS II എന്നിവ കാണപ്പെടുന്നു. എന്നാൽ സ്ട്രോമ ലാമെല്ലയുടെ സ്തരത്തിൽ PS II, NADP റിഡക്ടേസ് എൻസൈം (NADP reductase enzyme) എന്നിവ കാണപ്പെടുന്നില്ല. ഉത്തേജിപ്പിക്കപ്പെട്ട ഇലക്ട്രോൺ $NADP^+$ലേക്ക് പ്രവഹിക്കാതെ ഇലക്ട്രോൺ സംവഹന വ്യൂഹത്തിലൂടെ PS I ലേക്ക് ചാക്രികമായി തിരിച്ചുപോകുന്നു (ചിത്രം 13.6). അതിനാൽ ഇത്തരത്തിലുള്ള ചാക്രിക പ്രവാഹത്തിലൂടെ NADPH+H^+ നിർമിക്കാതെ ATP മാത്രം നിർമിക്കപ്പെടുന്നു. മാത്രവുമല്ല ഇലക്ട്രോണുകൾ ഉത്തേജിപ്പിക്കപ്പെടുന്നതിനാവശ്യമായ 680 nmൽ കൂടുതൽ തരംഗദൈർഘ്യമുള്ള പ്രകാശം ലഭിക്കുമ്പോൾ മാത്രമാണ് സൈക്ലിക് ഫോട്ടോ ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ നടക്കുന്നത്.

13.6.3 കെമിയോസ്മോട്ടിക് പരികൽപ്പന

എങ്ങനെയാണ് ഹരിതകണത്തിനുള്ളിൽ ATP നിർമിക്കുന്നതെന്ന് നോക്കാം. ഈ പ്രക്രിയ വിശദീകരിക്കുന്നതിനാണ് കെമിയോസ്മോട്ടിക് പരികൽപ്പന മുന്നോട്ട് വച്ചത്. ശ്വസനത്തിൽ എന്ന പോലെ ഒരു സ്തരത്തിനിരുവശത്തും ഉണ്ടാകുന്ന പ്രോട്ടോണുകളുടെ ഗാഢതാവ്യതിയാനമാണ് പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിലും ATP നിർമാണത്തിന് കാരണമാകുന്നത്. ഇവിടെ സൂചിപ്പിക്കുന്ന സ്തരം തൈലക്കോയ്ഡിന്റെ സ്തരമാണ്. സ്തരത്തിനുള്ളിലെ അറയിലാണ് (Lumen) പ്രോട്ടോണുകൾ കൂടുതൽ കാണപ്പെടുന്നത് എന്നതാണ് ഇവിടത്തെ ഒരു വ്യത്യാസം. എന്നാൽ ശ്വസനത്തിൽ ഇലക്ട്രോണുകൾ ETS ലൂടെ (അധ്യായം 14) പ്രവഹിക്കുമ്പോൾ മൈറ്റോകോൺഡ്രിയയുടെ സ്തരാന്തര ഭാഗത്താണ് (Intermembrane space) പ്രോട്ടോണുകൾ കൂടുതൽ കാണപ്പെടുന്നത്.

എങ്ങനെയാണ് സ്തരത്തിന് ഇരുവശത്തും പ്രോട്ടോണുകളുടെ ഗാഢതയിൽ വ്യതിയാനം ഉണ്ടാകുന്നത് എന്ന് നോക്കാം. ഇലക്ട്രോണുകൾ ഉത്തേജിപ്പിക്കപ്പെടുമ്പോൾ നടക്കുന്ന പ്രക്രിയകളും ഇലക്ട്രോണുകളുടെ സംവഹനവും പ്രോട്ടോൺ ഗാഢതാ വ്യതിയാനത്തിന് കാരണമാകുന്നു (ചിത്രം 13.7).

(a) ജലത്തിന്റെ വിഘടനം നടക്കുന്നത് തൈലക്കോയ്ഡ് സ്തരത്തിനുള്ളിലായതിനാൽ, തൽഫലമായുണ്ടാകുന്ന പ്രോട്ടോണുകൾ (ഹൈഡ്രജൻ അയോണുകൾ) തൈലക്കോയ്ഡിനകത്തുള്ള അറയിൽ അടിഞ്ഞു കൂടുന്നു.



ചിത്രം 13.7 കെമിയോസ്മോസിസിലൂടെ ATP നിർമാണം

(b) ഫോട്ടോസിസ്റ്റത്തിലൂടെ ഇലക്ട്രോണുകൾ സഞ്ചരിക്കുമ്പോൾ സ്തരത്തിന് കുറുകെ പ്രോട്ടോണുകൾ സംവഹനം ചെയ്യപ്പെടുന്നു. സ്തരത്തിന്റെ ബാഹ്യഭാഗത്ത് സ്ഥിതി ചെയ്യുന്ന പ്രാഥമിക ഇലക്ട്രോൺ സ്വീകർത്താവ് അതിന്റെ ഇലക്ട്രോൺ, ഇലക്ട്രോൺ വാഹകനിലേക്ക് കൈമാറ്റം ചെയ്യാതെ പ്രോട്ടോൺ വാഹകനിലേക്ക് കൈമാറ്റം ചെയ്യുന്നത് കൊണ്ടാണ് ഇങ്ങനെ സംഭവിക്കുന്നത്. അങ്ങനെ ഈ തന്മാത്ര ഇലക്ട്രോൺ സംവഹനം നടത്തുമ്പോൾ സ്ട്രോമയിൽ നിന്ന് ഒരു പ്രോട്ടോണിനെ നീക്കം ചെയ്യുന്നു. ഈ തന്മാത്ര അതിന്റെ ഇലക്ട്രോണിനെ സ്തരത്തിന്റെ ഉൾവശത്തുള്ള ഇലക്ട്രോൺ വാഹകനിലേക്ക് കൈമാറ്റം ചെയ്യുമ്പോൾ, പ്രോട്ടോൺ സ്തരത്തിന്റെ അറയുടെ വശത്തേക്ക് അല്ലെങ്കിൽ അകത്തേക്ക് സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെടുന്നു.

(c) NADP റിഡക്ടേസ് എൻസൈം സ്തരത്തിന്റെ സ്ട്രോമ ഭാഗത്താണ് സ്ഥിതി ചെയ്യുന്നത്. $NADP^+$, $NADPH+H^+$ ആയി നിരോക്സീകരിക്കുവാൻ PS I ലെ ഇലക്ട്രോൺ സ്വീകർത്താക്കളിലൂടെ വരുന്ന ഇലക്ട്രോണുകൾക്കൊപ്പം പ്രോട്ടോണുകളും ആവശ്യമാണ്. ഈ പ്രോട്ടോണുകളും സ്ട്രോമയിൽ നിന്ന് നീക്കം ചെയ്യപ്പെടുന്നു.

അതിനാൽ ഹരിതകണത്തിനുള്ളിലെ സ്ട്രോമയിൽ പ്രോട്ടോണുകൾ കുറയുകയും സ്തര അറയ്ക്കകത്ത് പ്രോട്ടോണുകൾ കൂടുകയും ചെയ്യുന്നു. ഇത് തൈലക്കോയ്ഡ് സ്തരത്തിന് ഇരുവശത്തും പ്രോട്ടോണുകളുടെ ഗാഢതയ്ക്ക് വ്യത്യാസം വരുത്തുന്നു. കൂടാതെ സ്തരയറയ്ക്കകത്ത് pH ഗണ്യമായി കുറയുകയും ചെയ്യുന്നു.

എന്തുകൊണ്ടാണ് പ്രോട്ടോണുകളുടെ ഗാഢതാവ്യത്യാസം ഏറെ പ്രാധാന്യം അർഹിക്കുന്നത്? ഗാഢതയിൽ വ്യത്യാസം ഇല്ലാതാകുമ്പോഴാണ് ATP നിർമി ക്കപ്പെടുന്നത് എന്നതിനാലാണ് ഗാഢതാ വ്യതിയാനത്തിന് ഇത്രയേറെ പ്രാധാന്യം. ATP സിന്തേസിന്റെ (ATPase) ന്റെ സ്തരാന്തര പാതയായ (Transmembrane channel) CFo യിലൂടെ തൈലക്കോയ്ഡിന്റെ സ്തരത്തിന് കുറുകെ പ്രോട്ടോണുകൾ സ്ട്രോമയിലെത്തുമ്പോഴാണ് ഈ ഗാഢതാവ്യതിയാനം ഇല്ലാതെ ആകുന്നത്. ATP സിന്തേസ് രാസാഗ്നിക്ക് രണ്ട് ഭാഗങ്ങളുണ്ട്. ആദ്യഭാഗ മായ CFo തൈലക്കോയ്ഡ് സ്തരത്തിൽ നിമഗ്നമായി കാണപ്പെടുന്നു. സ്തര ത്തിലൂടെ പ്രോട്ടോണുകൾ സുഗമമാക്കപ്പെട്ട വ്യാപനം (Facilitated diffusion) വഴി കടന്നു പോകാൻ സഹായകമായ സ്തരാന്തര പാതയായി ഇത് വർത്തിക്കുന്നു. അടുത്ത ഭാഗമാണ് CF_1. ഇത് തൈലക്കോയ്ഡ് സ്തരത്തിന്റെ ബാഹ്യപ്രതല ത്തിൽ നിന്നും സ്ട്രോമാ ഭാഗത്തേക്ക് തള്ളി നിൽക്കുന്നു. ഗാഢതാ വ്യതിയാനം ഇല്ലാതാകുന്നത് വഴി ഉണ്ടാകുന്ന ഊർജം ATP സിന്തേസിന്റെ CF_1 കണികയുടെ ഘടനയിൽ മാറ്റം വരുത്തുന്നതിന് കാരണമാകുന്നു. ഇത് ധാരാളം ഊർജ സമ്പു ഷ്ടമായ ATP തന്മാത്രകളെ നിർമിക്കാൻ രാസാഗ്നിയെ പ്രാപ്തമാക്കുന്നു.

ഒരു സ്തരം, ഒരു പ്രോട്ടോൺ പമ്പ്, പ്രോട്ടോണുകളുടെ ഗാഢതാ വ്യതിയാനം, ATP സിന്തേസ് എന്നിവയാണ് കെമിയോസ്മോസിസിന് ആവശ്യമായവ. തൈല ക്കോയ്ഡ് സ്തരയറയ്ക്കുള്ളിൽ പ്രോട്ടോണുകളുടെ അളവ് കൂട്ടുന്നതിന് അല്ലെ ങ്കിൽ ഗാഢതാ വ്യതിയാനം ഉണ്ടാക്കുന്നതിന്, പ്രോട്ടോണുകളെ ഊർജം ഉപ യോഗിച്ച് പമ്പ് ചെയ്യുന്നു. സ്തരത്തിന് കുറുകെ, പ്രോട്ടോണുകളുടെ തിരികെ യുള്ള വ്യാപനം സാധ്യമാക്കുന്ന ഒരു പാത ATP സിന്തേസിനുണ്ട്. ATP സിന്തേസ് രാസാഗ്നിയെ ഉത്തേജിപ്പിച്ച് ATP നിർമാണം ത്വരിതപ്പെടുത്താൻ ആവശ്യമായ ഊർജം ഇത് വഴി സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെടുന്നു.

CO_2 സ്ഥിരീകരണം, പഞ്ചസാരകളുടെ (Sugars) നിർമാണം എന്നിവയിലേക്ക് നയി ക്കുന്ന ജൈവസംശ്ലേഷണ രാസപ്രവർത്തനം നടക്കുന്നത് സ്ട്രോമയിലാണ്. ഇലക്ട്രോണുകളുടെ പ്രവാഹത്തിന്റെ ഫലമായി ഉണ്ടാകുന്ന NADPH നോടൊപ്പം ATP യും ഉടൻ തന്നെ ഈ രാസപ്രവർത്തനത്തിൽ ഉപയോഗിക്കപ്പെടുന്നു.

13.7 ATP, NADPH എന്നിവ എവിടെയാണ് ഉപയോഗിക്കപ്പെടുന്നത്?

പ്രകാശഘട്ടത്തിലെ ഉൽപ്പന്നങ്ങൾ ATP, NADPH, O_2 എന്നിവയാണെന്ന് നമ്മൾ പഠിച്ചു. ഇവയിൽ ഓക്സിജൻ ഹരിതകണത്തിന് പുറത്തേക്ക് വ്യാപനം ചെയ്യ പ്പെടുന്നു. എന്നാൽ ATP, NADPH എന്നിവ ആഹാരം (പ്രത്യേകിച്ചും പഞ്ച സാരകൾ) നിർമിക്കുന്ന പ്രക്രിയകൾ നടക്കുന്നതിനായി ഉപയോഗിക്കുന്നു. ഇതിനെ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ **ജൈവസംശ്ലേഷണ ഘട്ടം (Biosynthetic phase)** എന്നു പറയുന്നു. ഈ പ്രക്രിയ നേരിട്ട് പ്രകാശത്തെ ആശ്രയിച്ചു നടക്കു ന്നില്ലെങ്കിലും CO_2, ജലം എന്നിവ കൂടാതെ പ്രകാശഘട്ടത്തിലുണ്ടാകുന്ന ATP, NADPH എന്നീ ഉൽപ്പന്നങ്ങളെ ആശ്രയിച്ചാണ് നടക്കുന്നത്. എങ്ങനെയാണ് ഇത് തെളിയിച്ചതെന്ന് നിങ്ങൾ ചിന്തിച്ചിട്ടുണ്ടാകും. ഇത് വളരെ ലളിതമാണ്. അതായത് പെട്ടെന്ന് പ്രകാശം ലഭ്യമല്ലാതെ വരുമ്പോൾ കുറച്ച് സമയത്തേക്ക്

ജൈവസംശ്ലേഷണ പ്രക്രിയ തുടർന്നതിന് ശേഷം നിൽക്കുന്നു. എന്നാൽ പ്രകാശം ലഭ്യമാക്കുമ്പോൾ സംശ്ലേഷണ പ്രക്രിയ വീണ്ടും ആരംഭിക്കുന്നു.

അതിനാൽ ജൈവസംശ്ലേഷണ പ്രക്രിയയെ ***ഇരുണ്ടഘട്ടം*** *എന്നു വിളിക്കുന്നത് തെറ്റിദ്ധാരണാജനകമല്ലേ? നിങ്ങൾ ചർച്ച ചെയ്യൂ.*

ഇനി നമുക്ക് ATP, NADPH എന്നിവ എങ്ങനെയാണ് ജൈവസംശ്ലേഷണ പ്രക്രിയയിൽ ഉപയോഗിക്കുന്നത് എന്ന് നോക്കാം. CO_2 ജലവുമായി കൂടിച്ചേർന്ന് $(CH_2O)_n$ അഥവാ പഞ്ചസാര ഉണ്ടാകുന്നതായി ഈ അധ്യായത്തിന്റെ തുടക്കത്തിൽ നിങ്ങൾ കണ്ടു. ഈ രാസപ്രവർത്തനം എങ്ങനെയാണ് നടക്കുന്നതെന്നും CO_2 രാസപ്രവർത്തനത്തിൽ പങ്കെടുക്കുമ്പോൾ അല്ലെങ്കിൽ സ്ഥിരീകരിക്കുമ്പോൾ ഉണ്ടാകുന്ന ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം ഏതാണെന്നും അറിയാൻ ശാസ്ത്രജ്ഞർക്ക് അതീവ താൽപ്പര്യം ഉണ്ടായി. രണ്ടാം ലോകമഹായുദ്ധത്തിന് ശേഷം റേഡിയോ ഐസോടോപ്പുകളെ ഗുണപരമായ ആവശ്യങ്ങൾക്ക് ഉപയോഗപ്പെടുത്താൻ പല ശ്രമങ്ങളും ഉണ്ടായി. ഇതിൽ മെൽവിൻ കാൽവിന്റെ (Melvin Calvin) പരീക്ഷണങ്ങൾ എടുത്തു പറയേണ്ടതാണ്. ^{14}C (റേഡിയോ ആക്ടീവ് കാർബൺ) ഉപയോഗിച്ച് ആൽഗകളിലെ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നിരീക്ഷിച്ച അദ്ദേഹം, CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം മൂന്ന് കാർബൺ അടങ്ങിയ കാർബണിക ആസിഡാണെന്ന് കണ്ടെത്തി. ജൈവസംശ്ലേഷണ പാത പൂർണമായും കണ്ടെത്തുന്നതിൽ കാൽവിൻ നിർണായക പങ്ക് വഹിച്ചതിനാൽ ഈ പാത **കാൽവിൻ ചക്രം (Calvin cycle)** എന്നറിയപ്പെടുന്നു. ഈ പാതയുടെ ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം **3 – ഫോസ്ഫോഗ്ലിസറിക് ആസിഡ് (3-Phosphoglyceric acid)** അഥവാ ചുരുക്കത്തിൽ **PGA** ആണ്. ഇതിൽ എത്ര കാർബൺ ആറ്റങ്ങൾ ആണുള്ളത്?

CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ ഫലമായി എല്ലാ സസ്യങ്ങളിലെയും ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം PGA ആണോ എന്നും ഏതെങ്കിലും സസ്യങ്ങളിൽ മറ്റേതെങ്കിലും ഉൽപ്പന്നം ഉണ്ടാകുന്നുണ്ടോ എന്നും അറിയാനുള്ള ശ്രമം ശാസ്ത്രജ്ഞർ നടത്തി. ഒരു വിഭാഗം സസ്യങ്ങളിൽ CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ ഫലമായി ഉണ്ടാകുന്ന സ്ഥിരതയുള്ള ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം നാല് കാർബൺ ആറ്റങ്ങൾ ഉള്ള മറ്റൊരു കാർബണിക ആസിഡ് ആണെന്ന് മറ്റനേകം സസ്യങ്ങളിൽ നടത്തിയ പരീക്ഷണങ്ങളിൽ നിന്ന് കണ്ടെത്തി. ഈ ആസിഡ് **ഓക്സാലോ അസറ്റിക് ആസിഡ് (OAA)** ആണെന്ന് തിരിച്ചറിഞ്ഞു. അതിനാൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിൽ CO_2 ന്റെ സ്വാംശീകരണം രണ്ട് തരത്തിൽ നടക്കുന്നു എന്ന് പറയാം. അതായത് CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം C_3 ആസിഡ് (PGA) ആയ സസ്യങ്ങളിൽ **C_3 പാത** എന്നും C_4 ആസിഡ് (OAA) ഉണ്ടാകുന്ന സസ്യങ്ങളിൽ **C_4 പാത** എന്നും വിശേഷിപ്പിക്കാവുന്നതാണ്. ഈ രണ്ട് വിഭാഗം സസ്യങ്ങളിലും കാണപ്പെടുന്ന മറ്റു സവിശേഷതകളെ കുറിച്ച് പിന്നീട് ചർച്ച ചെയ്യാം.

13.7.1 CO_2 ന്റെ പ്രാഥമിക സ്വീകർത്താവ്

ഇരുണ്ടഘട്ടത്തെ കുറിച്ച് മനസിലാക്കാൻ ബുദ്ധിമുട്ടിയ ശാസ്ത്രജ്ഞർ ചോദിച്ച ചോദ്യം നമുക്ക് നമ്മോട് തന്നെ ചോദിക്കാം. *CO_2 നെ സ്വീകരിച്ച് (സ്ഥിരീകരിച്ച്) 3 കാർബണുകൾ ഉള്ള PGA ആയി മാറുന്ന ഒരു തന്മാത്രയിൽ എത്ര കാർബൺ ആറ്റങ്ങൾ ഉണ്ടാകും?*

5 കാർബൺ കീറ്റോസ് പഞ്ചസാരയായ റിബുലോസ് ബിസ്ഫോസ്ഫേറ്റ് (RuBP-Ribulose bisphosphate) ആണ് സ്വീകർത്താവായ തന്മാത്ര എന്ന് പഠനങ്ങളിൽ നിന്ന് ആകസ്മികമായി കണ്ടെത്തി. ഈ സാധ്യതയെക്കുറിച്ച് നിങ്ങൾ ആരും ചിന്തിച്ചില്ല, അല്ലേ? സാരമില്ല, ശാസ്ത്രജ്ഞരും കാലങ്ങളോളം നടത്തിയ വിവിധ പരീക്ഷണങ്ങളിൽ നിന്നാണ് ഈ നിഗമനത്തിലെത്തിയത്. ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം ഒരു C_3 ആസിഡായതിനാൽ പ്രാഥമിക സ്വീകർത്താവ് ഒരു 2 കാർബൺ സംയുക്തമായിരിക്കും എന്നാണ് ശാസ്ത്രജ്ഞരും വിശ്വസിച്ചിരുന്നത്. 5 കാർബൺ സംയുക്തമായ RuBP യെ കണ്ടെത്തുന്നതിന് മുമ്പ് 2 കാർബൺ സംയുക്തത്തെ തിരിച്ചറിയുന്നതിനായി അവർ അനേകം വർഷങ്ങൾ ചെലവഴിച്ചു.

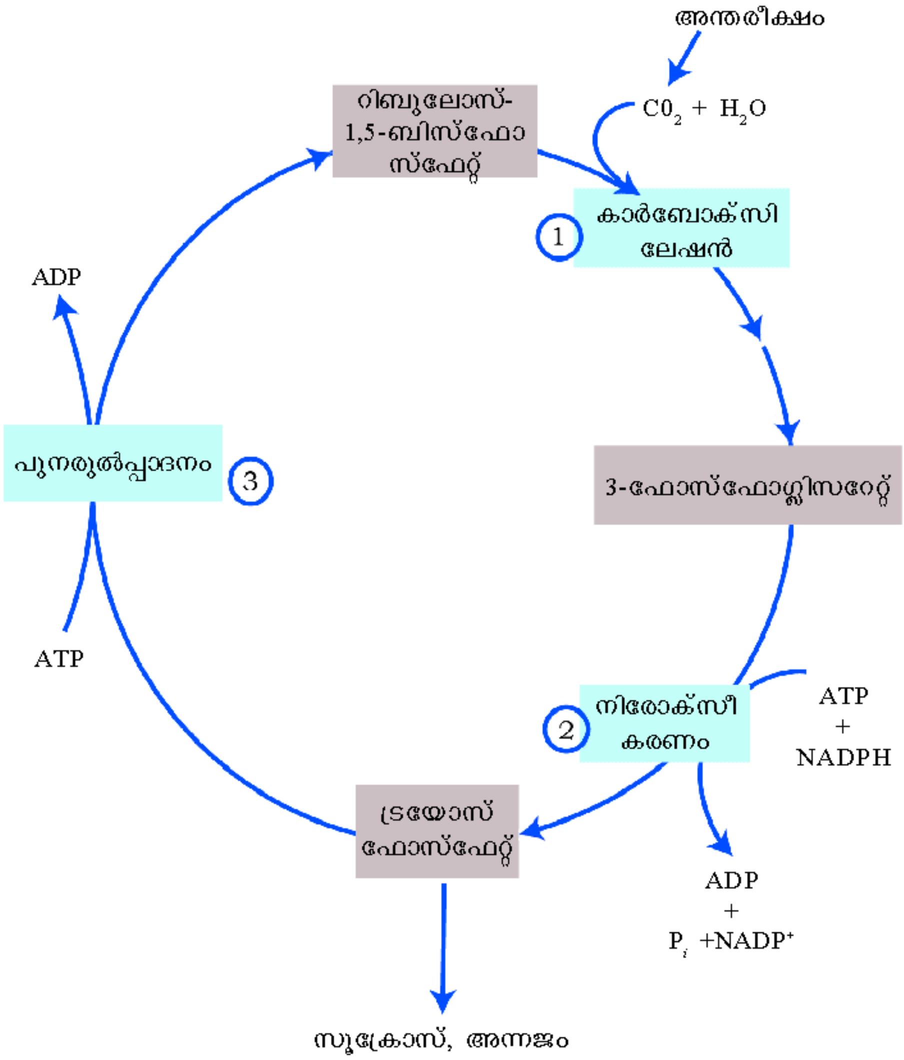
13.7.2 കാൽവിൻ ചക്രം (The Calvin Cycle)

കാൽവിനും അദ്ദേഹത്തിന്റെ സഹപ്രവർത്തകരും ഈ പാത പൂർണമായും പഠിച്ചതിൽ നിന്ന് ഇത് ചാക്രികമായാണ് നടക്കുന്നതെന്നും RuBP പുനരുൽപ്പാദിപ്പിക്കപ്പെടുന്നുവെന്നും കണ്ടെത്തി. കാൽവിൻ ചക്രം എങ്ങനെയാണ് നടക്കുന്നതെന്നും എവിടെയാണ് പഞ്ചസാര നിർമിക്കപ്പെടുന്നതെന്നും നോക്കാം. C_3 അല്ലെങ്കിൽ C_4 അല്ലെങ്കിൽ മറ്റേതെങ്കിലും പാത എന്ന ഭേദമില്ലാതെ, **പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്ന എല്ലാ സസ്യങ്ങളിലും** കാൽവിൻ ചക്രം നടക്കുന്നു (ചിത്രം 13.8) എന്ന് നമ്മൾ ആദ്യം തന്നെ വ്യക്തമായി മനസ്സിലാക്കേണ്ടതാണ്.

എളുപ്പത്തിൽ മനസ്സിലാക്കുന്നതിനായി കാൽവിൻ ചക്രത്തെ കാർബോക്സിലേഷൻ (Carboxylation), നിരോക്സീകരണം (Reduction), പുനരുൽപ്പാദനം (Regeneration) എന്നിങ്ങനെ മൂന്ന് ഘട്ടങ്ങളാക്കി വിശദീകരിച്ചിരിക്കുന്നു.

1. കാർബോക്സിലേഷൻ

CO_2 നെ സ്ഥിരീകരിച്ച് സ്ഥിരതയുള്ള മധ്യവർത്തിയായ കാർബണിക സംയുക്തമാക്കുന്നതാണ് കാർബോക്സിലേഷൻ. കാൽവിൻ ചക്രത്തിലെ സുപ്രധാനമായ ഈ പ്രക്രിയയിൽ RuBP യുടെ കാർബോക്സിലേഷന് വേണ്ടി CO_2 ഉപയോഗപ്പെടുത്തുന്നു. ഈ രാസപ്രവർത്തനത്തെ ത്വരിതപ്പെടുത്തുന്ന രാസാഗ്നിയാണ് RuBP കാർബോക്സിലേസ്. തൽഫലമായി 3-PGA യുടെ രണ്ട് തന്മാത്രകൾ ഉണ്ടാകുന്നു. ഈ രാസാഗ്നിക്ക് ഓക്സിജനേഷനുള്ള കഴിവും ഉള്ളതിനാൽ ഇതിനെ RuBP കാർബോക്സിലേസ് ഓക്സിജനേസ് അഥവാ **റുബിസ്കോ (RuBisCO)** എന്ന് വിളിക്കുന്നതാണ് കൂടുതൽ ശരി.



ചിത്രം 13.8 കാൽവിൻ ചക്രം മൂന്ന് ഘട്ടങ്ങളിലൂടെ നടക്കുന്നു: (1) കാർബോക്സിലേഷൻ, ഇവിടെ CO_2 റിബുലോസ്-1, 5 - ബിസ്ഫോസ്ഫേറ്റുമായി സംയോജിക്കുന്നു; (2) നിരോക്സീകരണം, ഈ ഘട്ടത്തിൽ പ്രകാശരാസീയ പ്രക്രിയകളിലൂടെ നിർമിച്ച ATP, NADPH എന്നിവ ഉപയോഗിച്ച് കാർബോഹൈഡ്രേറ്റ് നിർമി ക്കുന്നു. (3) പുനരുൽപ്പാദനം: ഈ ഘട്ടത്തിൽ CO_2 സ്വീകർത്താവായ റിബുലോസ്-1,5- ബിസ്ഫോസ്ഫേറ്റ് വീണ്ടും ഉൽപ്പാദിപ്പിക്കപ്പെടുകയും ചക്രം തുടരുകയും ചെയ്യുന്നു.

2. നിരോക്സീകരണം

ഗ്ലൂക്കോസിന്റെ നിർമാണത്തിലേക്ക് നയിക്കുന്ന രാസപ്രവർത്തനങ്ങളുടെ നിരയാണ് ഇവിടെ നടക്കുന്നത്. സ്ഥിരീകരിക്കപ്പെടുന്ന ഓരോ CO_2 തന്മാത്രയ്ക്കും രണ്ട് തന്മാത്ര ATP ഫോസ്ഫോറിലേഷനായും, രണ്ട് തന്മാത്ര NADPH നിരോക്സീകരണത്തിനായും ഉപയോഗിക്കുന്നു. ഈ പാതയിലൂടെ ഒരു ഗ്ലൂക്കോസ് തന്മാത്ര നിർമിക്കുന്നതിനായി ആറ് CO_2 തന്മാത്രകൾ സ്ഥിരീകരി ക്കുകയും 6 തവണ കാൽവിൻ ചക്രം നടക്കുകയും വേണം.

3. പുനരുൽപ്പാദനം

ഈ ചക്രം തടസ്സമില്ലാതെ തുടരുന്നതിനായി CO_2 സ്വീകർത്താവായ RuBP പുനരുൽപ്പാദിപ്പിക്കപ്പെടേണ്ടത് അത്യാവശ്യമാണ്. ഓരോ പുനരുൽപ്പാദനഘട്ടത്തിലും ഓരോ ATP വീതം ഫോസ്ഫോറിലേഷന് ഉപയോഗിച്ചാണ് RuBP നിർമിക്കുന്നത്.

അതിനാൽ കാൽവിൻ ചക്രത്തിൽ പ്രവേശിക്കുന്ന ഓരോ CO_2 തന്മാത്രയ്ക്കും 3 ATP തന്മാത്രകളും 2 NADPH തന്മാത്രകളും ആവശ്യമാണ്. ഇരുണ്ട ഘട്ടത്തിൽ ഉപയോഗിക്കുന്ന ATP യുടെയും NADPH ന്റെയും എണ്ണത്തിലെ ഈ വ്യത്യാസം പരിഹരിക്കുന്നതിനാവാം സൈക്ലിക് ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ നടക്കുന്നത്.

ഒരു ഗ്ലൂക്കോസ് തന്മാത്ര നിർമിക്കുന്നിതിനായി കാൽവിൻ ചക്രം ആറ് പ്രാവശ്യം നടക്കേണ്ടത് ആവശ്യമാണ്. *കാൽവിൻ പാതയിലൂടെ ഒരു ഗ്ലൂക്കോസ് തന്മാത്ര നിർമിക്കുന്നതിനായി എത്ര ATP, NADPH എന്നിവ ഉപയോഗിക്കണമെന്ന് കണക്ക് കൂട്ടി നോക്കൂ.* കാൽവിൻ ചക്രത്തിൽ ഉപയോഗിക്കുന്നതും ഉൽപ്പാദിപ്പിക്കുന്നതും എന്തെല്ലാമാണെന്ന് നോക്കാം.

ഉപയോഗിക്കുന്നത്	ഉൽപ്പാദിപ്പിക്കുന്നത്
$6CO_2$	ഒരു ഗ്ലൂക്കോസ് തന്മാത്ര
18 ATP	18 ADP
12 NADPH	12 NADP

13.8 C_4 പാത

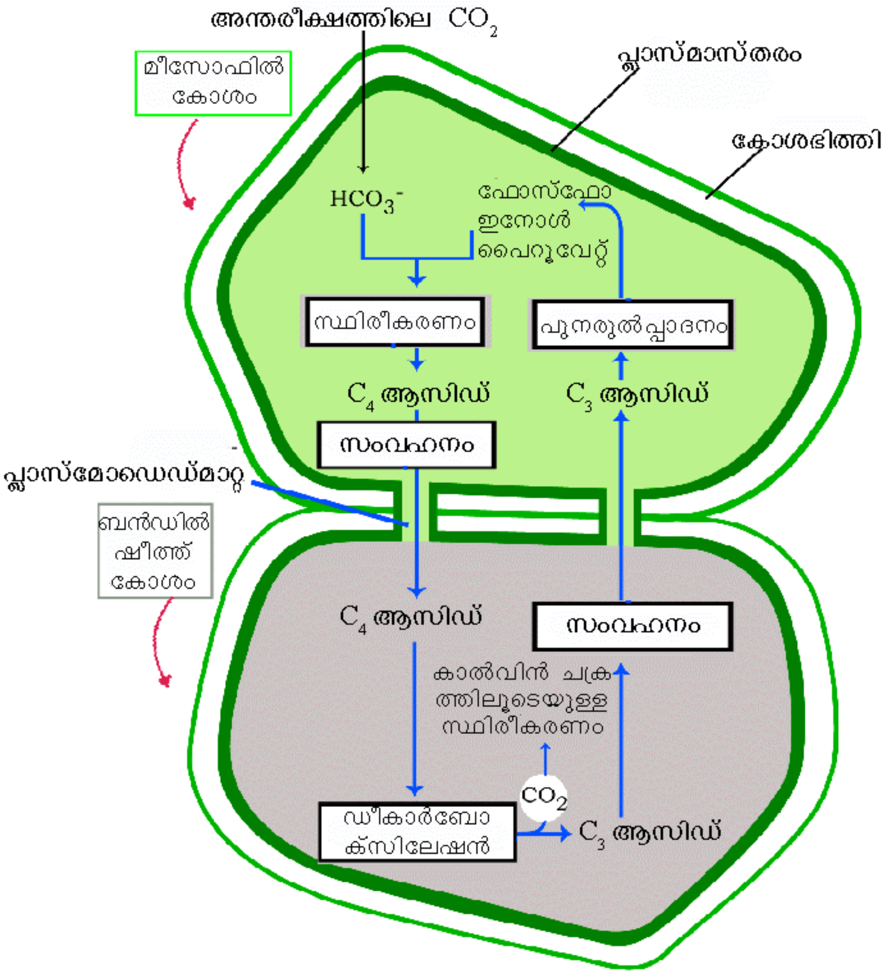
വരണ്ട ഉഷ്ണമേഖലാ പ്രദേശങ്ങളിൽ വളരുന്ന സസ്യങ്ങളിലാണ് C_4 പാത കാണപ്പെടുന്നത്. ഇത്തരം സസ്യങ്ങളിൽ CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ ഫലമായി ഉണ്ടാകുന്ന ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം C_4 ആസിഡ് ആയ ഓക്സാലോ അസറ്റിക് ആസിഡ് ആണെങ്കിലും പ്രധാനപ്പെട്ട ജൈവസംശ്ലേഷണ പാതയായി വർത്തിക്കുന്നത് C_3 പാത അഥവാ കാൽവിൻ ചക്രമാണ്. എങ്കിൽ ഇവ C_3 സസ്യങ്ങളിൽ നിന്നും ഏതെല്ലാം തരത്തിൽ വ്യത്യാസപ്പെട്ടിരിക്കുന്നു? സ്വാഭാവികമായും നിങ്ങൾ ഉന്നയിക്കാവുന്ന ന്യായമായ ഒരു ചോദ്യമാണിത്.

C_4 സസ്യങ്ങൾക്ക് ചില സവിശേഷതകളുണ്ട്. ഇലയുടെ സവിശേഷമായ ആന്തരഘടന, ഉയർന്ന താപനില അതിജീവിക്കാനുള്ള ശേഷി, ഉയർന്ന പ്രകാശ തീവ്രതയോടുള്ള പ്രതികരണം, പ്രകാശശ്വസനം (Photorespiration) എന്ന പ്രക്രിയയുടെ അഭാവം, കൂടിയ ജൈവപിണ്ഡ ഉൽപ്പാദനക്ഷമത ഇവയെല്ലാം C_4 സസ്യങ്ങളുടെ സവിഷേതകളാണ്. ഇനി നമുക്ക് ഇവ ഓരോന്നായി മനസിലാക്കാം.

ഒരു C_4 സസ്യത്തിന്റെയും C_3 സസ്യത്തിന്റെയും ഇലകളുടെ കുറുകെയുള്ള ഛേദം എടുത്ത് നിരീക്ഷിക്കൂ. എന്തെങ്കിലും വ്യത്യാസം കാണുന്നുണ്ടോ? രണ്ടിലും മീസോഫിൽ കോശങ്ങൾ ഒരു പോലെയാണോ? രണ്ടിലും വാസ്കുലർ ബൻഡിലിന്റെ ആവരണത്തിലുള്ള കോശങ്ങൾ ഒരു പോലെയാണോ?

C_4 സസ്യങ്ങളുടെ വാസ്കുലാർ ബൻഡിലിന് ചുറ്റുമുള്ള വലുപ്പം കൂടിയ കോശങ്ങളാണ് **ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശങ്ങൾ.** ഇത്തരം ഇലകളിൽ കാണുന്ന സവിശേഷ ആന്തരഘടന **ക്രാൻസ് അനാട്ടമി ('Kranz' anatomy)** എന്നറിയപ്പെടുന്നു. കോശങ്ങളുടെ ക്രമീകരണത്തെ സൂചിപ്പിക്കുന്ന 'ക്രാൻസ്' എന്ന പദത്തിനർഥം പുഷ്പചക്രം (Wreath) എന്നാണ്. ഇവിടെ ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശങ്ങൾ വാസ്കുലാർ ബൻഡിലിന് ചുറ്റും **പല നിരകളായി** കാണപ്പെടുന്നു. ധാരാളം ഹരിതകണങ്ങൾ, വാതക വിനിമയം സാധ്യമാക്കാത്ത കട്ടികൂടിയ ഭിത്തികൾ, കോശാന്തര സ്ഥലങ്ങളുടെ അഭാവം എന്നിവയെല്ലാം ഈ കോശങ്ങളുടെ സവിശേഷതകളാണ്. *C_4 സസ്യങ്ങളായ ചോളം (Maize), അരിചോളം (Sorghum) തുടങ്ങിയവയുടെ ഇലകളുടെ ഛേദം എടുത്ത് ക്രാൻസ് അനാട്ടമിയും മീസോഫിൽ കോശങ്ങളുടെ വിന്യാസവും നിരീക്ഷിക്കൂ.*

നിങ്ങളുടെ ചുറ്റുമുള്ള വ്യത്യസ്ത സ്പീഷീസിലുള്ള സസ്യങ്ങളുടെ ഇലകളുടെ കുറുകെയുള്ള ഛേദം എടുത്ത് മൈക്രോസ്കോപ്പിലൂടെ നിരീക്ഷിക്കൂ. വാസ്കുലാർ ബൻഡിലിന് ചുറ്റുമുള്ള ബൻഡിൽ ഷീത്ത് ശ്രദ്ധിക്കൂ. ബൻഡിൽ ഷീത്തിന്റെ സാന്നിധ്യം C_4 സസ്യങ്ങളെ തിരിച്ചറിയാൻ നിങ്ങൾക്ക് സഹായകമാകും.



ചിത്രം 13.9 ഹാച്ച് ആന്റ് സ്ലാക്ക് പാതയുടെ ചിത്രീകരണം

ചിത്രം 13.9 ൽ നൽകിയിരിക്കുന്ന പാത നിരീക്ഷിക്കൂ. ഈ പാത ഹാച്ച് ആന്റ് സ്ലാക്ക് പാത (Hatch and Slack pathway) എന്നറിയപ്പെടുന്നു. ഇതും ഒരു ചാക്രിക പ്രക്രിയയാണ്. ഈ പാത നിരീക്ഷിച്ച് ഘട്ടങ്ങൾ കണ്ടെത്തൂ.

ഇവിടെ പ്രാഥമിക CO_2 സ്വീകർത്താവ് ഒരു 3 കാർബൺ സംയുക്തമായ **ഫോസ്ഫോഇനോൾ പൈറൂവേറ്റ് (PEP)** ആണ്. ഇത് മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിലാണ് കാണപ്പെടുന്നത്. ഈ സ്ഥിരീകരണത്തിന് കാരണമായ രാസാഗ്നിയാണ് **PEP കാർബോക്സിലേസ് (PEP carboxylase or PEPcase)**. മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ റുബിസ്കോ എന്ന രാസാഗ്നി കാണപ്പെടുന്നില്ല എന്നത് ഇവിടെ പ്രത്യേകം ശ്രദ്ധിക്കേണ്ടതാണ്. മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ C_4 ആസിഡായ ഓക്സാലോ അസറ്റിക് ആസിഡ് (OAA) ഉണ്ടാകുന്നു.

OAA മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ വച്ച് മറ്റ് നാല് കാർബൺ സംയുക്തമായ മാലിക് ആസിഡ് (Malic acid) അല്ലെങ്കിൽ അസ്പാർട്ടിക് ആസിഡ് (Aspartic acid) ആയി മാറുന്നു. ഇത് ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശത്തിലേക്ക് സംവഹനം ചെയ്യപ്പെടുന്നു. അവിടെ വച്ച് C_4 ആസിഡിനെ വിഘടിപ്പിച്ച് കാർബൺ ഡൈഓക്സൈഡും ഒരു 3 കാർബൺ സംയുക്തവുമാക്കി മാറ്റുന്നു.

ഈ 3 കാർബൺ സംയുക്തത്തെ തിരികെ മീസോഫിൽ കോശത്തിലേക്ക് കൊണ്ടുപോകുകയും അവിടെ വച്ച് വീണ്ടും PEP ആക്കി മാറ്റുകയും ചെയ്യുന്നു. അങ്ങനെ ചക്രം പൂർത്തിയാകുന്നു.

ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശങ്ങളിൽ സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെട്ട CO_2, എല്ലാ സസ്യങ്ങളിലും പൊതുവായി കാണുന്ന കാൽവിൻ ചക്രത്തിലേക്ക് (C_3 പാത) പ്രവേശിക്കുന്നു. ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശങ്ങൾ **റുബിസ്കോ** എന്ന രാസാഗ്നിയാൽ സമ്പുഷ്ടമാണ്. എന്നാൽ ഇവിടെ PEP case കാണപ്പെടുന്നില്ല. അതിനാൽ C_4 സസ്യങ്ങളിലും C_3 സസ്യങ്ങളിലും പൊതുവായി, പഞ്ചസാര നിർമിക്കുന്നതിനായി നടക്കുന്ന അടിസ്ഥാന പാതയാണ് കാൽവിൻ ചക്രം.

C_3 സസ്യങ്ങളുടെ മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിലാണ് കാൽവിൻ ചക്രം നടക്കുന്നത് എന്ന് നമ്മൾ കണ്ടു. എന്നാൽ C_4 സസ്യങ്ങളുടെ മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ അല്ല കാൽവിൻ ചക്രം നടക്കുന്നത്. പകരം ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശങ്ങളിൽ മാത്രമാണ്.

13.9 പ്രകാശശ്വസനം (Photorespiration)

C_3 സസ്യങ്ങളെ C_4 സസ്യങ്ങളിൽ നിന്ന് വ്യത്യസ്തമാക്കുന്ന മറ്റൊരു പ്രക്രിയയാണ് **പ്രകാശശ്വസനം**. ഇത് മനസിലാക്കുന്നതിന് കാൽവിൻ ചക്രത്തിലെ ഒന്നാം ഘട്ടമായ CO_2 സ്ഥിരീകരണ പ്രക്രിയയെക്കുറിച്ച് കൂടുതൽ അറിയേണ്ടതുണ്ട്. RuBP യും CO_2 ഉം സംയോജിച്ച് 3 PGA യുടെ 2 തന്മാത്രകളുണ്ടാകുന്ന ഈ രാസപ്രവർത്തനത്തെ ത്വരിതപ്പെടുത്തുന്നത് റുബിസ്കോ (RuBisCO) ആണ്.

$$RuBP + CO_2 \xrightarrow{RuBisCo} 2 \times 3PGA$$

ലോകത്തിൽ ഏറ്റവും കൂടുതലായി കാണപ്പെടുന്ന രാസാഗ്നിയാണ് RuBisCO. (എന്താണിതിന് കാരണം?) ഈ രാസാഗ്നിയുടെ സക്രിയ സ്ഥാനത്തിന് (Active site) CO_2 ഉം O_2 നുമായി സംയോജിക്കാൻ കഴിവുള്ളതുകൊണ്ടാണ് ഈ പേര് വന്നത്. ഇത് എങ്ങനെയാണ് സാധ്യമാകുന്നതെന്ന് ചിന്തിച്ചിട്ടുണ്ടോ? CO_2, O_2 അനുപാതം ഏകദേശം തുല്യമായിവരുമ്പോൾ RuBisCO ക്ക് O_2 നേക്കാൾ കൂടുതൽ പ്രതിപത്തി CO_2 നോടാണ്. ഇങ്ങനെയല്ലായിരുന്നുവെങ്കിൽ എന്തു സംഭവിക്കുമായിരുന്നുവെന്ന് സങ്കല്പിച്ച് നോക്കൂ. ഈ ബന്ധനം മത്സരാധിഷ്ഠിതമാണ്.

CO_2 ന്റെയും O_2 ന്റെയും ആപേക്ഷിക ഗാഢതയാണ് റൂബിസ്കോ ആരുമായി പ്രവർത്തിക്കണമെന്ന് തീരുമാനിക്കുന്നത്.

C_3 സസ്യങ്ങളിൽ ഏതാനും O_2 റുബിസ്കോയുമായി ചേർന്ന് പ്രവർത്തിക്കുന്നതുമൂലം CO_2 സ്ഥിരീകരണം കുറയുന്നു. ഇവിടെ RuBP, PGA യുടെ രണ്ട് തന്മാത്രകളായി മാറ്റപ്പെടുന്നതിനു പകരം ഓക്സിജനുമായി ചേർന്ന് ഫോസ്ഫോഗ്ലിസറേറ്റിന്റെ (Phosphoglycerate) ഒരു തന്മാത്രയും ഫോസ്ഫോഗ്ലൈക്കൊലേറ്റിന്റെ (Phospho glycolate - 2 കാർബൺ) ഒരു തന്മാത്രയും ഉണ്ടാകുന്നു. ഈ പാതയെ പ്രകാശശ്വസനം എന്നു പറയുന്നു. പ്രകാശശ്വസനത്തിലൂടെ പഞ്ചസാരയോ ATP യോ നിർമിക്കപ്പെടുന്നില്ല. പകരം ATP ഉപയോഗിച്ച് CO_2 സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെടുന്നു. പ്രകാശശ്വസനം വഴി NADPH യോ ATP യോ ഉണ്ടാകുന്നില്ല. പ്രകാശശ്വസനത്തിന്റെ ജൈവപരമായ ധർമം ഇതുവരെയും തിരിച്ചറിഞ്ഞിട്ടില്ല.

C_4 സസ്യങ്ങളിൽ പ്രകാശശ്വസനം നടക്കുന്നില്ല. ഇത്തരം സസ്യങ്ങളിൽ രാസാഗ്നിയുടെ സക്രിയ സ്ഥാനത്ത് CO_2 ന്റെ ഗാഢത കൂട്ടുവാനുള്ള സംവിധാനമുള്ളതാണ് ഇതിന് കാരണം. മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ നിന്ന് വരുന്ന C_4 ആസിഡ് ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശങ്ങളിൽ വച്ച് വിഘടിച്ച് CO_2 ഉണ്ടാകുന്നതിനാൽ കോശത്തിനുള്ളിൽ CO_2 ന്റെ ഗാഢത കൂടുന്നു. ഇത് RuBisCO കാർബോക്സിലേസായി പ്രവർത്തിക്കുന്നത് ഉറപ്പാക്കുകയും ഓക്സിജനേസ് പ്രവർത്തനം കുറയ്ക്കുകയും ചെയ്യുന്നു.

C_4 സസ്യങ്ങളിൽ പ്രകാശശ്വസനം നടക്കുന്നില്ല എന്ന് ഇപ്പോൾ വ്യക്തമായി. എന്തുകൊണ്ടാണ് ഇത്തരം സസ്യങ്ങളിൽ ഉൽപ്പാദനക്ഷമതയും വിളവും കൂടുന്നത് എന്ന് ഇതിൽ നിന്നും മനസിലാക്കാവുന്നതാണ്. മാത്രവുമല്ല ഇത്തരം സസ്യങ്ങൾക്ക് ഉയർന്ന താപനില അതിജീവിക്കാനുള്ള ശേഷിയുമുണ്ട്.

ഇത്രയും മനസ്സിലാക്കിയതിൽ നിന്ന് C_3 പാതയും C_4 പാതയും കാണപ്പെടുന്ന സസ്യങ്ങളെ താരതമ്യം ചെയ്തു നോക്കൂ. തുടർന്ന് നൽകിയ പട്ടിക 13.1 നിരീക്ഷിച്ച് പൂർത്തീകരിക്കൂ.

പട്ടിക 13.1 C_3 സസ്യങ്ങളും C_4 സസ്യങ്ങളും തമ്മിലുള്ള വ്യത്യാസങ്ങൾ കണ്ടെത്തുന്നതിനായി പട്ടികയിലെ 2, 3 കോളങ്ങൾ പൂരിപ്പിക്കുക.

സവിശേഷതകൾ	C_3 സസ്യങ്ങൾ	C_4 സസ്യങ്ങൾ	തിരഞ്ഞെടുക്കാനുള്ളവ
കാൽവിൻ ചക്രം നടക്കുന്ന കോശം			മീസോഫിൽ/ബൻഡിൽ ഷീത്ത്/രണ്ടിലും
പ്രാഥമിക കാർബോക്സി-ലേഷൻ നടക്കുന്ന കോശം			മീസോഫിൽ/ബൻഡിൽ ഷീത്ത്/രണ്ടിലും
CO_2 സ്ഥിരീകരിക്കുന്ന എത്ര തരം കോശങ്ങൾ ഇലയിൽ കാണപ്പെടുന്നു?			രണ്ട്: ബൻഡിൽ ഷീത്തും മീസോഫില്ലും ഒന്ന്: മീസോഫിൽ മൂന്ന്: ബൻഡിൽഷീത്ത്, പാലിസേഡ്, സ്പോഞ്ചി മീസോഫിൽ
CO_2 ന്റെ പ്രാഥമിക സ്വീകർത്താവ് ഏതാണ്?			RUBP/PEP/PGA
പ്രാഥമിക CO_2 സ്വീകർത്താവിലെ കാർബണിന്റെ എണ്ണം			5 / 4 / 3
പ്രാഥമിക CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ ഉൽപ്പന്നം			PGA/OAA/RuBP/PEP
പ്രാഥമിക CO_2 സ്ഥിരീകരണ ഉൽപ്പന്നത്തിലെ കാർബണിന്റെ എണ്ണം			3 / 4 / 5
സസ്യത്തിൽ റുബിസ്കോ ഉണ്ടോ?			ഉണ്ട്/ഇല്ല/എല്ലായ്പ്പോഴും ഇല്ല
സസ്യത്തിൽ PEP case കാണപ്പെടുന്നുണ്ടോ?			ഉണ്ട്/ഇല്ല/എല്ലായ്പ്പോഴും ഇല്ല
സസ്യത്തിന്റെ ഏത് കോശങ്ങളിലാണ് റുബിസ്കോ കാണപ്പെടുന്നത്?			മീസോഫിൽ/ബൻഡിൽഷീത്ത്/ഒന്നിലുമല്ല
പ്രകാശതീവ്രത കൂടുതലുള്ള സാഹചര്യങ്ങളിൽ CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ നിരക്ക്			കുറവ്/കൂടുതൽ/സാധാരണ രീതിയിൽ
കുറഞ്ഞ പ്രകാശതീവ്രതയിൽ പ്രകാശശ്വസനം നടക്കുന്നുണ്ടോ?			കൂടുതൽ/കുറവ്/ചിലപ്പോൾ
കൂടിയ പ്രകാശതീവ്രതയിൽ പ്രകാശശ്വസനം നടക്കുന്നുണ്ടോ?			കൂടുതൽ/കുറവ്/ചിലപ്പോൾ
CO_2 ന്റെ ഗാഢത കുറവുള്ളപ്പോൾ പ്രകാശശ്വസനം നടക്കുന്നുണ്ടോ?			കൂടുതൽ/കുറവ്/ചിലപ്പോൾ
CO_2 ന്റെ ഗാഢത കൂടുതലുള്ളപ്പോൾ പ്രകാശശ്വസനം നടക്കുന്നുണ്ടോ?			കൂടുതൽ/കുറവ്/ചിലപ്പോൾ
പരമാവധി താപനില			30-40 C/20-25C/40 C ൽ കൂടുതൽ
ഉദാഹരണങ്ങൾ			വിവിധതരം സസ്യങ്ങളിലെ ഇലകളുടെ കുറുകെയുള്ള ഛേദം എടുത്ത് മൈക്രോസ്കോപ്പിലൂടെ ക്രാൻസ് അനാട്ടമി നിരീക്ഷിച്ച് അതാത് കോളങ്ങളിൽ എഴുതുക.

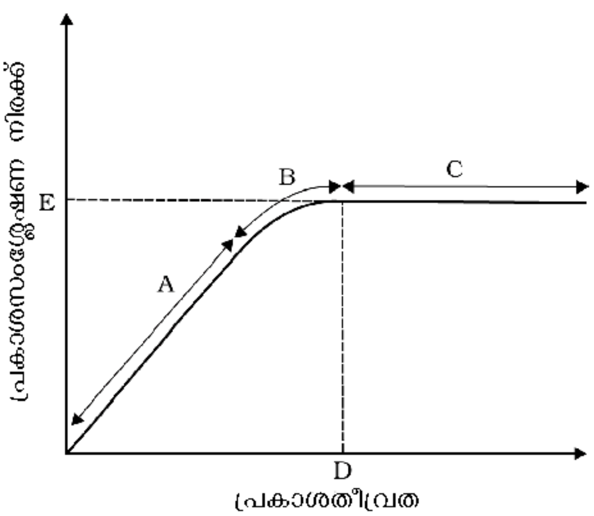
13.10 പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ സ്വാധീനിക്കുന്ന ഘടകങ്ങൾ

പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ സ്വാധീനിക്കുന്ന ഘടകങ്ങളെ കുറിച്ച് അറിഞ്ഞിരിക്കേണ്ടത് അത്യാവശ്യമാണ്. വിളകളുൾപ്പെടെയുള്ള സസ്യങ്ങളുടെ ഉൽപ്പാദനം നിർണയിക്കുന്നതിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണനിരക്കിന് വളരെയധികം പ്രാധാന്യമുണ്ട്. പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ ആന്തരികവും (സസ്യ ഘടകങ്ങൾ) ബാഹ്യവുമായ നിരവധി ഘടകങ്ങൾ സ്വാധീനിക്കുന്നു. ഇലകളുടെ എണ്ണം, വലുപ്പം, പ്രായം, ക്രമീകരണം, മീസോഫിൽ കോശങ്ങളും ഹരിതകണങ്ങളും, ആന്തരിക CO_2 ന്റെ ഗാഢത, ഹരിതകത്തിന്റെ അളവ് എന്നിവയാണ് ആന്തരിക ഘടകങ്ങൾ. ഇവ സസ്യത്തിന്റെ വളർച്ച, ജനിതക ഘടന എന്നിവയെ ആശ്രയിച്ചിരിക്കുന്നു.

സൂര്യപ്രകാശത്തിന്റെ ലഭ്യത, താപനില, CO_2 ന്റെ ഗാഢത, ജലം എന്നിവയാണ് ബാഹ്യ ഘടകങ്ങൾ. സസ്യങ്ങൾ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടത്തുമ്പോൾ ഈ ഘടകങ്ങളെല്ലാം ഒരേസമയം പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന്റെ നിരക്കിനെ സ്വാധീനിക്കും. പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ (CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തെ) നിരവധി ഘടകങ്ങൾ ഒരേ സമയം സ്വാധീനിക്കുമെങ്കിലും പ്രധാനമായും ഒരു ഘടകമായിരിക്കും നിരക്കിനെ ബാധിക്കുന്നത്. അതായത് സാധാരണയിലും കുറഞ്ഞ അളവിൽ ലഭ്യമാകുന്ന ഘടകമായിരിക്കും ഏതൊരു സമയത്തും നിരക്കിനെ ബാധിക്കുന്നത്.

ഏതൊരു ജൈവരാസ പ്രക്രിയയെയും നിരവധി ഘടകങ്ങൾ സ്വാധീനിക്കുമ്പോൾ പ്രാവർത്തികമാകുന്ന നിയമമാണ് ബ്ലാക്മാന്റെ (1905) **നിയന്ത്രണ ഘടകങ്ങളുടെ നിയമം** (Blackman's **Law of Limiting Factors**). ഇത് ചുവടെ നൽകിയിരിക്കുന്നു:

ഒരു രാസ പ്രക്രിയയെ ഒന്നിൽ കൂടുതൽ ഘടകങ്ങൾ സ്വാധീനിക്കുമ്പോൾ അതിന്റെ നിരക്കിനെ നിർണയിക്കുന്നത് വളരെ കുറഞ്ഞ അളവിലുള്ള ഘടകമായിരിക്കും. ഈ ഘടകത്തിന്റെ അളവിൽ മാറ്റം വരുമ്പോൾ അത് പ്രക്രിയയെ നേരിട്ട് ബാധിക്കുന്നു.



ചിത്രം 13.10 പ്രകാശസംശ്ലേഷണ നിരക്കിൽ പ്രകാശതീവ്രതയുടെ സ്വാധീനം വ്യക്തമാക്കുന്ന ഗ്രാഫ്

ഉദാഹരണമായി പച്ച ഇലയുടെ സാന്നിധ്യം, ആവശ്യത്തിന് പ്രകാശം, CO_2 എന്നിവ ലഭ്യമാണെങ്കിലും, താപനില കുറവായാൽ സസ്യം പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടത്തുകയില്ല. ഈ ഇലയ്ക്ക് സാധാരണ താപനില ലഭ്യമാക്കുകയാണെങ്കിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം ആരംഭിക്കും.

13.10.1 പ്രകാശം

പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ സ്വാധീനിക്കുന്ന ഒരു ഘടകം എന്ന നിലയ്ക്ക് പ്രകാശത്തെക്കുറിച്ച് ചർച്ച ചെയ്യുമ്പോൾ പ്രകാശനിലവാരം, പ്രകാശ തീവ്രത, പ്രകാശം ലഭിക്കുന്ന സമയ ദൈർഘ്യം എന്നിവ പരിഗണിക്കേണ്ടതുണ്ട്. കുറഞ്ഞ പ്രകാശ തീവ്രതയിലെ CO_2 സ്ഥിരീകരണവും പതന പ്രകാശവും തമ്മിൽ നേർരേഖയിലുള്ള (Linear relationship) ബന്ധമാണുള്ളത്. മറ്റുള്ള ഘടക

ങ്ങളുടെ ലഭ്യതയിൽ പരിമിതിയുണ്ടെങ്കിൽ കൂടിയ പ്രകാശ തീവ്രതയിൽ CO_2 സ്ഥിരീകരണ നിരക്കിൽ ക്രമാനുഗതമായ വർധനവ് കാണുന്നില്ല (ചിത്രം 13.10). ആകെ സൂര്യപ്രകാശത്തിന്റെ 10 ശതമാനത്തിൽ തന്നെ പ്രകാശപൂരിത അവസ്ഥ യിലേക്ക് എത്തിച്ചേരുന്നു എന്നത് രസാവഹമാണ്. അതിനാൽ തണലിൽ വളരുന്ന സസ്യങ്ങൾക്കും നിബിഡവനങ്ങൾക്കും ഒഴികെ പ്രകൃതിയിൽ പ്രകാശം ഒരു നിയന്ത്രണ ഘടകമായി മാറുന്നത് വിരളമാണ്. പതനപ്രകാശത്തിന്റെ വർധനവ് ഒരു പരിധിയിൽ കൂടുകയാണെങ്കിൽ ഹരിതകം വിഘടിക്കുകയും പ്രകാശസംശ്ലേ ഷണത്തിൽ കുറവുണ്ടാകുകയും ചെയ്യുന്നു.

13.10.2 കാർബൺ ഡൈഓക്സൈഡിന്റെ ഗാഢത

പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ നിയന്ത്രിക്കുന്ന ഒരു പ്രധാനഘടകമാണ് CO_2. അന്ത രീക്ഷത്തിൽ CO_2 ന്റെ അളവ് വളരെ കുറവാണ് (0.03 നും 0.04 ശതമാനത്തിനും ഇടയിൽ). 0.05 ശതമാനം വരെയുള്ള വർധനവ് CO_2 സ്ഥിരീകരണ നിരക്ക് വർധി പ്പിക്കുന്നു, എന്നാൽ ഇതിലും വലിയ വർധനവ് ദീർഘകാലയളവിൽ നഷ്ടങ്ങൾ സൃഷ്ടിക്കാം.

C_3 സസ്യങ്ങളും C_4 സസ്യങ്ങളും വ്യത്യസ്ത രീതിയിലാണ് CO_2 ഗാഢതയോട് പ്രതികരിക്കുന്നത്. പ്രകാശം കുറഞ്ഞ സാഹചര്യങ്ങളിൽ രണ്ട് വിഭാഗം സസ്യ ങ്ങളും ഉയർന്ന CO_2 ഗാഢതയോട് പ്രതികരിക്കുന്നില്ല. ഉയർന്ന പ്രകാശ തീവ്ര തയിൽ C_3 സസ്യങ്ങളിലും C_4 സസ്യങ്ങളിലും പ്രകാശസംശ്ലേഷണ നിരക്ക് വർധിക്കുന്നു. C_4 സസ്യങ്ങൾ ഏകദേശം $360\ \mu L^{-1}$ ൽ തന്നെ പൂരിതാവസ്ഥയി ലെത്തുന്നു. എന്നാൽ C_3 സസ്യങ്ങൾ CO_2 ന്റെ കൂടിയ ഗാഢതയോട് പ്രതികരി ക്കുകയും ഏകദേശം $450\ \mu L^{-1}$ കഴിയുമ്പോൾ മാത്രമേ പൂരിതാവസ്ഥയിലെ ത്തുകയുമുള്ളൂ. അതിനാൽ C_3 സസ്യങ്ങളിൽ നിലവിലുള്ള CO_2 ന്റെ ലഭ്യത ഒരു നിയന്ത്രണഘടകമാണ്.

C_3 സസ്യങ്ങൾ ഉയർന്ന തോതിലുള്ള CO_2 ഗാഢതയോട് പ്രതികരിച്ച് ഉയർന്ന നിരക്കിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടത്തുന്നത് കൂടിയ ഉൽപ്പാദനക്ഷമതയിലേക്ക് നയിക്കുന്നു. ഈ വസ്തുത ഹരിതഗൃഹവിളകളായ തക്കാളി, കാപ്സിക്കം (Bell pepper) എന്നിവയുടെ ഉൽപ്പാദനത്തിൽ ഉപയോഗപ്പെടുത്തുന്നു. ഇവയെ CO_2 സമ്പന്നമായ അന്തരീക്ഷത്തിൽ വളരാനനുവദിക്കുന്നതുവഴി ഉൽപ്പാദനക്ഷമത വർധിപ്പിക്കാം.

13.10.3 താപനില

ഇരുണ്ടഘട്ടം രാസാഗ്നികളുടെ സഹായത്താൽ നടക്കുന്നതിനാൽ താപനില ഒരു നിയന്ത്രണഘടകമാണ്. പ്രകാശഘട്ടവും താപനിലയെ അടിസ്ഥാനമാക്കിയാണ് നടക്കുന്നതെങ്കിലും കുറഞ്ഞ തോതിൽ മാത്രമേ ബാധിക്കുന്നുള്ളൂ. C_4 സസ്യ ങ്ങളിൽ ഉയർന്ന താപനിലയിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണ നിരക്ക് കൂടുതലാണ്. എന്നാൽ C_3 സസ്യങ്ങളിലെ ഏറ്റവും അനുകൂലതാപനില താഴ്ന്നതാണ്.

വ്യത്യസ്ത സസ്യങ്ങളിൽ പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്ന ഏറ്റവും അനുകൂല

താപനില അവയുടെ ആവാസം, അനുകൂലനങ്ങൾ എന്നിവയുമായി ബന്ധപ്പെട്ടിരിക്കുന്നു. മിതോഷ്ണമേഖലയിലെ സസ്യങ്ങളെക്കാൾ ഉയർന്ന പരമാവധി താപനിലയാണ് ഉഷ്ണമേഖലാ സസ്യങ്ങൾക്കുള്ളത്.

13.10.3 ജലം

പ്രകാശഘട്ടത്തിൽ പങ്കെടുക്കുന്ന ഒരു അഭികാരകമാണ് ജലമെങ്കിലും ഇത് ഒരു ഘടകമെന്ന നിലയിൽ നേരിട്ട് പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തെ സ്വാധീനിക്കാതെ സസ്യത്തെ വളരെയധികം സ്വാധീനിക്കുന്നു. ജല ദൗർലഭ്യം ആസ്യരന്ധ്രം അടയുന്നതിന് കാരണമാവുകയും തൽഫലമായി CO_2 ന്റെ ലഭ്യത കുറയ്ക്കുകയും ചെയ്യുന്നു. മാത്രവുമല്ല ജല ദൗർലഭ്യം മൂലം ഇലകൾ വാടുന്നത് ഇലയുടെ പ്രതല വിസ്തീർണം കുറയ്ക്കുകയും ഉപാപചയ പ്രവർത്തനങ്ങളെ ബാധിക്കുകയും ചെയ്യുന്നു.

സംഗ്രഹം

ഹരിതസസ്യങ്ങൾ പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിലൂടെ സ്വയം ആഹാരം നിർമിക്കുന്നു. ഈ പ്രക്രിയയിൽ അന്തരീക്ഷത്തിലെ കാർബൺ ഡൈഓക്സൈഡ് ഇലകളിലെ ആസ്യരന്ധ്രങ്ങളിലൂടെ സ്വീകരിച്ച് കാർബോഹൈഡ്രേറ്റുകൾ, പ്രധാനമായും ഗ്ലൂക്കോസും സ്റ്റാർച്ചും (അന്നജവും) നിർമ്മിക്കാൻ ഉപയോഗിക്കുന്നു. സസ്യങ്ങളുടെ പച്ചനിറത്തിലുള്ള ഭാഗങ്ങളിൽ (പ്രധാനമായും ഇലകളിലാണ്) മാത്രമാണ് പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടക്കുന്നത്. ഇലകളുടെ ഉള്ളിലെ മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ ധാരാളമായി കാണപ്പെടുന്ന ഹരിതകണങ്ങളാണ് CO_2 സ്ഥിരീകരണം നടത്തുന്നത്. ഹരിതകണത്തിനുള്ളിലെ സ്തരങ്ങളിലാണ് പ്രകാശഘട്ടം നടക്കുന്നത്. എന്നാൽ രാസസംശ്ലേഷണ പ്രക്രിയ നടക്കുന്നത് സ്ട്രോമയിലാണ്. പ്രകാശസംശ്ലേഷണത്തിന് പ്രകാശഘട്ടം, കാർബൺ സ്ഥിരീകരണ രാസപ്രവർത്തനങ്ങൾ എന്നിങ്ങനെ രണ്ട് ഘട്ടങ്ങളുണ്ട്. പ്രകാശഘട്ടത്തിൽ ആന്റിനയിലുള്ള വർണകങ്ങൾ പ്രകാശോർജം ആഗിരണം ചെയ്യുകയും ഇതിനെ പ്രവർത്തനകേന്ദ്രം (റിയാക്ഷൻ സെന്റർ) എന്നറിയപ്പെടുന്ന സവിശേഷ ക്ലോറോഫിൽ a തന്മാത്രകളിലേക്ക് കൈമാറ്റം നടത്തുകയും ചെയ്യുന്നു. PSI, PSII എന്നിങ്ങനെ രണ്ട് ഫോട്ടോസിസ്റ്റം കാണപ്പെടുന്നു. PSI ന് 700nm ആഗിരണം ചെയ്യാൻ കഴിവുള്ള ഹരിതകം a P700 തന്മാത്രയാണ് പ്രവർത്തനകേന്ദ്രമായിട്ടുള്ളത്. എന്നാൽ PSII ലെ പ്രവർത്തനകേന്ദ്രം 680nm ലെ ചുവന്ന പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്യാൻ കഴിവുള്ള P680 ആണ്. പ്രകാശം ആഗിരണം ചെയ്ത് കഴിയുമ്പോൾ ഇലക്ട്രോണുകൾ ഉത്തേജിക്കപ്പെടുകയും PSII ൽ നിന്നും PSI ലേക്കും തുടർന്ന് NADP ക്കും കൈമാറ്റം ചെയ്ത് NADPH ഉണ്ടാകുകയും ചെയ്യുന്നു. ഈ പ്രക്രിയ നടക്കുമ്പോൾ തൈലക്കോയ്ഡ് സ്തരത്തിന്റെ ഇരുവശത്തുമായി പ്രോട്ടോണുകളുടെ ഗാഢതാവ്യതിയാനം സംജാതമാകുന്നു. ATPase രാസാഗ്നിയുടെ Fo ഭാഗത്ത് കൂടി പ്രോട്ടോണുകൾ സഞ്ചരിക്കുമ്പോൾ ഈ ഗാഢതാവ്യതിയാനം ഇല്ലാതാകുകയും ATP നിർമാണത്തിനാവശ്യമായ ഊർജം സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെടുകയും ചെയ്യുന്നു. PSII മായി ബന്ധപ്പെട്ടാണ് ജലത്തിന്റെ വിഘടനം നടക്കുന്നത്. തൽഫലമായി ഓക്സിജൻ, പ്രോട്ടോണുകൾ എന്നിവ സ്വതന്ത്രമാക്കപ്പെടുന്നു. ഇലക്ട്രോണുകളെ PSII ന് കൈമാറുന്നു.

കാർബൺ സ്ഥിരീകരണ ചക്രത്തിൽ CO_2നെ റുബിസ്കോ എന്ന രാസാഗ്നി അഞ്ച് കാർബൺ സംയുക്തമായ RuBP യുമായി ചേർത്ത് 3 കാർബൺ സംയുക്തമായ PGA യുടെ രണ്ട് തന്മാത്രകളായി മാറ്റുന്നു. കാൽവിൻ ചക്രം തുടർന്ന് നടക്കുന്നതിന്റെ ഫലമായി PGA പഞ്ചസാരയായി

(sugar) മാറുന്നു. കൂടാതെ RuBP യും പുനരുൽപ്പാദിപ്പിക്കപ്പെടുന്നു. ഈ പ്രക്രിയയിൽ പ്രകാശഘട്ടത്തിൽ നിർമിച്ച ATP യും NADPH ഉം ഉപയോഗിക്കുന്നു. C_3 സസ്യങ്ങളിൽ ഉപയോഗമില്ലാത്ത ഒരു ഓക്സിജനേഷൻ പ്രക്രിയായ പ്രകാശശ്വസനവും റുബിസ്കോ ത്വരിതപ്പെടുത്തുന്നു.

ഉഷ്ണമേഖലാ പ്രദേശങ്ങളിലെ ചില സസ്യങ്ങളിൽ കാണപ്പെടുന്ന സവിശേഷതരത്തിലുള്ള പ്രകാശസംശ്ലേഷണമാണ് C_4 പാത. ഇത്തരം സസ്യങ്ങളിൽ മീസോഫിൽ കോശങ്ങളിൽ വച്ച് നടക്കുന്ന CO_2 സ്ഥിരീകരണത്തിന്റെ ആദ്യ ഉൽപ്പന്നം ഒരു 4 കാർബൺ സംയുക്തമാണ്. ഈ സസ്യങ്ങളിൽ കാർബോഹൈഡ്രേറ്റിന്റെ സംശ്ലേഷണത്തിനായുള്ള കാൽവിൻ പാത നടക്കുന്നത് ബൻഡിൽ ഷീത്ത് കോശങ്ങളിലാണ്.

പരിശീലന പ്രവർത്തനങ്ങൾ

1. ഒരു സസ്യത്തിന്റെ ബാഹ്യഭാഗങ്ങൾ നിരീക്ഷിച്ച് ആ സസ്യം C_3 ആണോ C_4 ആണോ എന്ന് പറയാൻ കഴിയുമോ? എന്തുകൊണ്ട്?
2. ഒരു സസ്യത്തിന്റെ ആന്തരികഘടന നിരീക്ഷിച്ച് ആ സസ്യം C_3 ആണോ C_4 ആണോ എന്ന് പറയാൻ കഴിയുമോ?വിശദമാക്കുക.
3. C_4 സസ്യങ്ങളുടെ വളരെക്കുറച്ച് കോശങ്ങളിൽ മാത്രമാണ് ജൈവസംശ്ലേഷണ പ്രക്രിയായ കാൽവിൻ പാത നടക്കുന്നത്. എങ്കിലും അവയിലെ ഉൽപ്പാദനക്ഷമത വളരെ കൂടുതലാണ്. എന്ത് കൊണ്ടാണെന്ന് പറയാമോ?
4. കാർബോക്സിലേസായും ഓക്സിജനേസായും പ്രവർത്തിക്കാൻ കഴിയുന്ന ഒരു രാസാഗ്നിയാണ് റുബിസ്കോ. എന്തുകൊണ്ടാണ് C_4സസ്യങ്ങളിൽ റുബിസ്കോ കൂടുതലായി കാർബോക്സിലേഷൻ നടത്തുന്നത്?
5. ഹരിതകം b വളരെ കൂടുതലായി കാണപ്പെടുന്നതും ഹരിതകം a ഇല്ലാത്തതുമായ ചില സസ്യങ്ങളുണ്ട് എന്ന് കരുതുക. ഇവയ്ക്ക് പ്രകാശസംശ്ലേഷണം നടത്താൻ കഴിയുമോ? എന്തിന് വേണ്ടിയാണ് സസ്യങ്ങളിൽ ഹരിതകം b യും മറ്റു സഹായകവർണകങ്ങളും കാണപ്പെടുന്നത്?
6. എന്തുകൊണ്ടാണ് ഇരുട്ടിൽ വച്ചിരുന്ന ഒരു ഇലയുടെ നിറം മഞ്ഞയോ ഇളം പച്ചയോ ആയി മാറുന്നത്? ഏത് വർണകത്തിനാണ് കൂടുതൽ സ്ഥിരത ഉള്ളത്?
7. ഒരു സസ്യത്തിൽ തണലിൽ നിൽക്കുന്ന ഇലകളും സൂര്യപ്രകാശത്തിൽ നിൽക്കുന്ന ഇലകളും നിരീക്ഷിക്കുക. അല്ലെങ്കിൽ വെയിലത്തും തണലത്തും വച്ചിരിക്കുന്ന ചെടിച്ചട്ടികളിൽ നിൽക്കുന്ന സസ്യങ്ങളുടെ ഇലകൾ താരതമ്യം ചെയ്യുക. ഏത് ഇലകളിലാണ് ഇരുണ്ട പച്ചനിറം ഉള്ളത്? എന്തുകൊണ്ട്?
8. പ്രകാശസംശ്ലേഷണ നിരക്കിനെ പ്രകാശം എങ്ങനെ ബാധിക്കുന്നുവെന്ന് ചിത്രം 13.10 സൂചിപ്പിക്കുന്നു. ഗ്രാഫിനെ അടിസ്ഥാനമാക്കി ചുവടെ നൽകിയിരിക്കുന്ന ചോദ്യങ്ങൾക്ക് ഉത്തരം എഴുതുക.
   a. ഗ്രാഫിന്റെ ഏത് പോയിന്റ്/പോയിന്റുകളിൽ (A,B അല്ലെങ്കിൽ C) ആണ് പ്രകാശം നിയന്ത്രണ ഘടകമാകുന്നത്?
   b. സ്ഥാനം A യിലെ നിയന്ത്രണഘടകം/ഘടകങ്ങൾ ഏത്?
   c. ഗ്രാഫിൽ C,D എന്നിവ എന്തിനെ സൂചിപ്പിക്കുന്നു?
9. ചുവടെ നൽകിയിരിക്കുന്നവ താരതമ്യം ചെയ്യുക.
   a. C_3 പാതയും C_4 പാതയും
   b. സൈക്ലിക്, നോൺ-സൈക്ലിക് ഫോട്ടോ ഫോസ്ഫോറിലേഷൻ
   c. C_3 സസ്യങ്ങളിലെയും C_4 സസ്യങ്ങളിലെയും ഇലയുടെ ആന്തരഘടന.