Fotosinteza u uvjetima umjetnog osvjetljenja

Jukić, Matea

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of biology / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za biologiju**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:181:286116

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

ODJEL ZA BIOLOGIJU
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Repository / Repozitorij:

Repository of Department of biology, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
ODJEL ZA BIOLOGIJU
Preddiplomski studij biologije

Matea Jukić

Fotosinteza u uvjetima umjetnog osvjetljenja

Završni rad

Mentor: izv. prof. dr. sc. Janja Horvatić

Neposredni voditelj: dr. sc. Martina Varga

Osijek, 2017.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Odjel za biologiju
Završni rad
Preddiplomski studij biologije

Znanstveno područje: Prirodne znanosti
Znanstveno polje: Biologija

Fotosinteza u uvjetima umjetnog osvjetljenja

Matea Jukić

Rad je izrađen: Zavod za biokemiju i ekofiziologiju biljaka, Odjel za biologiju, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Mentor: izv. prof. dr. sc. Janja Horvatić
Neposredni voditelj: dr. sc. Martina Varga

Sažetak: Biljkama je za normalan rast i razvoj, te proizvodnju organske tvari potrebna sunčeva energija. U sustavima za kontrolirani uzgoj biljaka prirodna svijetlost se nadopunjuje ili u potpunosti zamjenjuje umjetnim izvorima osvjetljenja. Tradicionalni izvori svijetlosti, poput HPS i MH, nisu dovoljno učinkoviti i generiraju puno operativne topline pa se javlja potreba za novim održivim i energetski učinkovitijim izvorom osvjetljenja. LED svjetla inovativni su izvor umjetnog osvjetljenja za biljke koji otvaraju mogućnost ciljanog manipuliranja metaboličkim reakcijama kako bi se optimizirao uzgoj i proizveli visokokvalitetni proizvodi. Potpuni fiziološki odgovor različitih biljnih vrsta na osvjetljenje LED svjetlima još uvijek nije u potpunosti poznat.

Broj stranica: 18
Broj slika: 5
Broj tablica: 1
Broj literaturnih navoda: 30
Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: fotosinteza, umjetno osvjetljenje, LED, održivi uzgoj

Rad je pohranjen u: knjižnici Odjela za biologiju Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i u Nacionalnoj sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu, u elektroničkom obliku, te je objavljen na web stranici Odjela za biologiju

BASIC DOCUMENTATION CARD
Josip Juraj Strossmayer University of Osijek Bachelor's thesis Department of Biology
Undergraduate studies in Biology

Scientific Area: Natural science
Scientific Field: Biology

Photosynthesis under artificial light

Matea Jukić

Thesis performed at Subdepartment of plant ecophysiology and biochemistry, Department of Biology, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Supervisor: Janja Horvatić, Associate Professor
Assistant in charge: PhD Martina Varga

Abstract: Sunlight is necessary for the production of organic matter and normal growth and development of plants. Natural light in systems for protected cultivation is supplemented or replaced with artificial sources of light. Traditional light sources, like HPS or MH, are not very efficient and usually generate high radiant heat. Therefore, the need for development of sustainable and energy efficient sources of artificial light is present. Light emitting diodes (LED) are innovative sources of artificial light that provide the possibility of manipulation of certain metabolic pathways in order to produce nutritive valuable food in higher quantities. Still, physiological responses of plants to LED light is not fully understood.

Number of pages: 18
Number of figures: 5
Number of tables: 1
Number of references: 30
Original in: Croatian

Keywords: photosynthesis, artificial lighting, LED, sustainability

Thesis deposited in: Library of Department of Biology, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek and in National university library in Zagreb in elektronic form. It is also available on the web site of Department of Biology, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek

SADRŽAJ

1 UVOD 1

2 OSNOVNI DIO 3

2.1 Utjecaj svijetla na biljke 3

2.2 Umjetni izvori svijetla i njihov način primjene 8

2.2.1 LED – struktura, prednosti i nedostaci 10

3 ZAKLJUČAK 15

4 LITERATURA 16

1 UVOD

Proizvodnja hrane oslanja se na proces fotosinteze u biljkama, stoga je veliki izazov osigurati adekvatnu kvantitetu i kvalitetu hrane za rastuću populaciju ljudi uz promjene klime i širenje područja s nepovoljnim uvjetima za rast biljaka. Rastuća populacija, klimatske promjene, zagađenost tla i vode, kao i povećani zahtjevi populacije za voćem, povrćem i cvijećem unutar i izvan njihove sezone, povećavaju potrebu za razvoj sustava za kontrolirani rast biljaka u kojima se koriste umjetni izvor svjetla. U te se sustave ubrajaju staklenici, komore za rast, postrojenja za vertikalni uzgoj te hidroponski uzgoj biljaka. Većina ovih načina uzgoja nisu održivi sami za sebe i imaju nekoliko limitirajućih faktora od kojih je najvažniji, dakako, adekvatno osvjetljenje (Darko i sur., 2014).

Umjetno osvjetljenje, baš kao i prirodno sunčevo zračenje, biljkama treba omogućiti energiju nužnu za razvoj. Kako bi se fotosinteza odvijala u uvjetima umjetnoga osvjetljenja važno je osigurati tri parametra svjetlosti: kvalitetu, količinu i trajanje (Nishio, 2000). Zamjensko i dopunsko svjetlo (na primjer fluorescentne, MH ili HPS svjetiljke) u uzgoj biljaka uvedene su sa svrhom zamjene i oponašanja vanjskih uvjeta. S obzirom da takvi izvori svijetlosti emitiraju toplinu u sustavima uzgoja mora se osigurati adekvatno hlađenje što utječe na cijenu takvog uzgoja biljaka (Ieperen i Trouwborst, 2008). Razvoj LED u posljednjih 20-ak godina i mnogobrojna istraživanja koja se obavljaju, lansiraju LED kao ekonomski najbolje i najodrživije rješenje. Uz svoje tehnološke značajke LED osvjetljenje kompatibilno je sa zahtjevima biljaka za provođenje normalnog procesa fotosinteze i adekvatno svjetlosno signaliziranje neophodno za rast i razvoj biljke. Promjenama u intenzitetu svjetla i valnoj duljini može se manipulirati metabolizmom biljke te se može postići proizvodnja kvalitetne hrane u poljoprivredi s kontroliranim uvjetima (Ouzounis i sur., 2015). Potencijal LED osvjetljenja za kontrolirani uzgoj biljaka istražuje i Američka svemirska agencija „NASA“ s posebnim naglaskom na upotrebu ove tehnologije na budućim svemirskim stanicama na Mjesecu i Marsu (Goins 1997). LED rasvjeta je vrlo obećavajuća alternativa u širokom rasponu hortikulture zbog svojih ogromnih prednosti, od promjenjivog spektra, malog zračenja topline, velikog intenziteta, mogućnosti postavljanja uz samu biljku do vrlo dugog životnog vijeka te znatno manjeg utroška

električne energije u odnosu na druge tradicionalne oblike rasvjete (D'Souza i sur., 2015).

Cilj ovog rada je objasniti utjecaj svjetlosnih spektara određenih valnih duljina na rast i razvoj biljaka, koji svojom kvalitetom, količinom i trajanjem mogu upotpuniti ili zamijeniti sunčevo zračenje u zaštićenim prostorima. Također je cilj usporediti upotrebu tradicionalnih izvora svijetlosti poput HPS i fluorescentnih žarulja s kvalitetnijim tehnologijama poput LED osvijetljena, koje predstavlja inovativni izvor umjetnog osvjetljenja za biljke.

2 OSNOVNI DIO

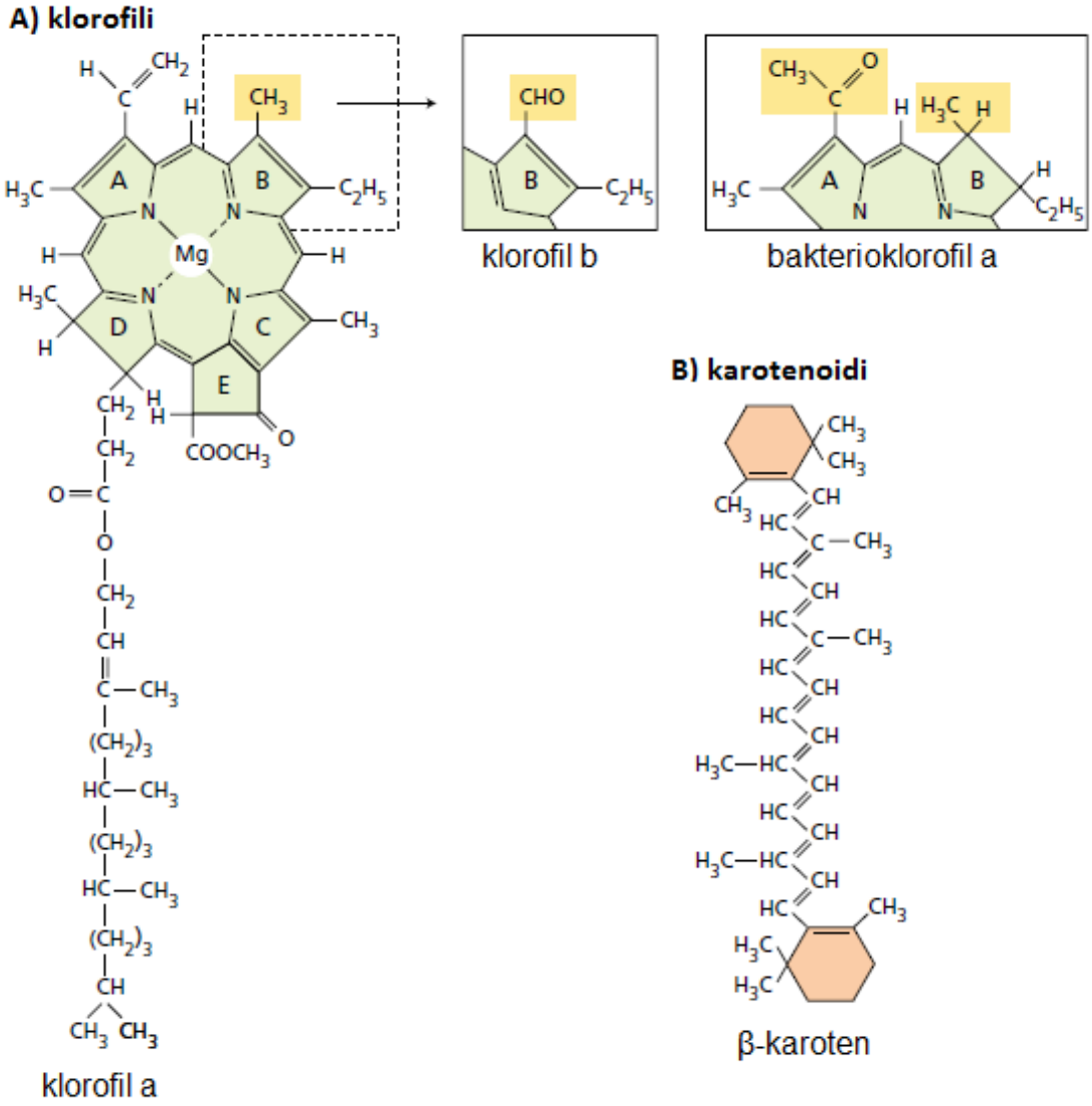
2.1 Utjecaj svijetla na biljke

Biljkama je svijetlo potrebno tijekom cijelog života. Koriste ga u mnogobrojnim procesima od klijanja, cvjetanja pa do proizvodnje sjemena. Gotovo sva slobodna energija koja se troši u biološkim sustavima potječe od sunčeve energije zarobljene u procesu fotosinteze. Zapravo, sunčevo zračenje se može smatrati glavnim oblikom energije potrebnim za održavanje svih oblika života zasnovanih na ugljikovim spojevima (Hopkins i Hüner, 2009). Fotosinteza omogućuje aerobni metabolizam kao gotovo jedini izvor ugljikovih spojeva i izvor cjelokupne količine kisika. Mehanizam fotosinteze je složen te kao takav zahtjeva uzajamno djelovanje mnogih proteina i malih molekula. Kod zelenih biljaka fotosinteza se odvija u kloroplastima. Klorofili, molekule pigmenta u kloroplastima, pojavljuju se u nekoliko oblika pa tako nalazimo klorofil a, b, c1, c2, c3, d i f te nekoliko vrsta bakterioklorofila (slika 1) u bakterija koje su sposobne obavljati fotosintezu (Croce i Amerongen, 2014). Upravo su klorofili ti koji zarobljuju svijetlost. Takva zarobljena svjetlost oblik je energije fotona koja pobuđuje elektrone na više energetske razine. Pobuđeni se elektroni rabe za proizvodnju NADPH i ATP. Pobuđeni elektroni prenose se u takozvane komplekse za zarobljavanje svjetla s jedne molekule klorofila na drugu sve dok taj podražaj ne dopre do klorofila s posebnim svojstvima (Berg i sur., 2013). Stoga je „zarobljavanje“ svjetlosne energije ključni događaj u fotosintezi.

Fotoreceptorske molekule su molekule koje mogu osjetiti ultraljubičasto-A, ultraljubičasto-B, plavo, crveno i tamno crveno svjetlo. Kroz te fotoreceptore biljke osjećaju intenzitet, kvalitetu, smjer i trajanje svjetla. Svi fotoreceptori sudjeluju u procesu koji se zove fotomorfogeneza, proces razvoja biljaka ovisan o svjetlu. Glavne obitelji fotoreceptora do sada identificirane su fitokromi, kriptokromi, fototropini i UVR8. Fitokromi upijaju uglavnom u crvenom te tamno crvenom području svjetlosnog spektra (Fankhauser i Chory, 1997). Kriptokromi i fototropini upijaju u plavom/ultraljubičastom-A području, te je također poznato da se ponašaju i kao fotoreceptori zelenog svjetla. Zeleno svjetlo, iako nije značajno za fotosintezu, utječe na reakcije biljke preko kriptokromski ovisnih i kriptokromski neovisnih načina. Naime, zeleno apsorpcijsko stanje kriptokroma zadržava reakcije inducirane plavim svjetlom (Folta i Maruhnich,

2007). Smatra se da je UVR8 odgovoran za osjet i upijanje ultraljubičastog svjetla čime inicira reakcije biljaka na stres (Christie i sur. 2012).

Od navedenih, klorofil a je glavni fotoreceptor u kloroplastima većine zelenih biljaka. Kemijska struktura molekule klorofila prikazana je na slici 1. Općenito su klorofili vrlo djelotvorni fotoreceptori. Oni su polieni, spojevi koji sadržavaju čitavu mrežu alternirajućih jednostrukih i dvostrukih veza. Također, imaju veoma jake apsorpcijske vrpce u vidljivome dijelu spektra, području gdje je sunčevo zračenje koje dopire na zemlju maksimalno (Berg i sur., 2013). Klorofil b i karotenoidi (slika 1) važni su za prikupljanje svijetla te slijevaju energiju u reakcijsko središte. Razlika između klorofila b u odnosu na klorofila a je što na pirolskom pristenu br. II ima aldehidnu skupini dok klorofil a na tom mjestu ima metilnu skupinu (na slici 1 žuto uokvireno). Iako je razlika u strukturama spojeva mala, ona pomiče apsorpcijski maksimum prema središtu vidljivog dijela spektra. Klorofil b izrazito učinkovito apsorbira svjetlost valnih duljina između 450 i 500 nm (Berg i sur., 2013). Klorofil a i b imaju značajnu ulogu u fotosintezi, ali nisu jedini kromofori. Značajnu ulogu u fotosintezi imaju i drugi fotosintetski pigmenti koji djeluju kao antena pigmenti (Hopkins i Hüner, 2009). Kompleks antena se, u većini slučajeva, nalazi u fotosintetskoj membrani, ali postoje i oni topivi u vodi. Kompleksi su izgrađeni od proteina i pigmenata s tim da su zastupljeniji proteini. Proteini u kompleksu organiziraju pigmente u pravilnim orijentacijama za obavljanje njihovih funkcija, koncentriraju apsorpciju valnih duljina pigmenata te utječu na širinu apsorpcijskih bendova (Croce i Amerongen, 2014). U nedostatku karotenoida, prekomjerno svjetlo će imati štetne učinke na proteine i membrane. Karoteni su pretežito narančasti ili crveno-narančasti pigmenti koji se u velikim količinama nalaze osim u korijenu mrkve, plodu rajčice i u listovima zelenih biljaka te su zaslužni za promjene boje koje se događaju u jesen. β -karoten (slika 1) je najčešći oblik karotena i nalazimo ga u algama i višim biljkama, a najjače upija plavu svijetlost. Ksantofili (zeaksantin, violaksantin, lutein i sl.) su žuti karotenoidi i zapravo su oksigenirani oblici karotena (Hopkins i Hüner, 2009). Područja apsorpcije klorfila i karotenoida prikazana su na slici 3.

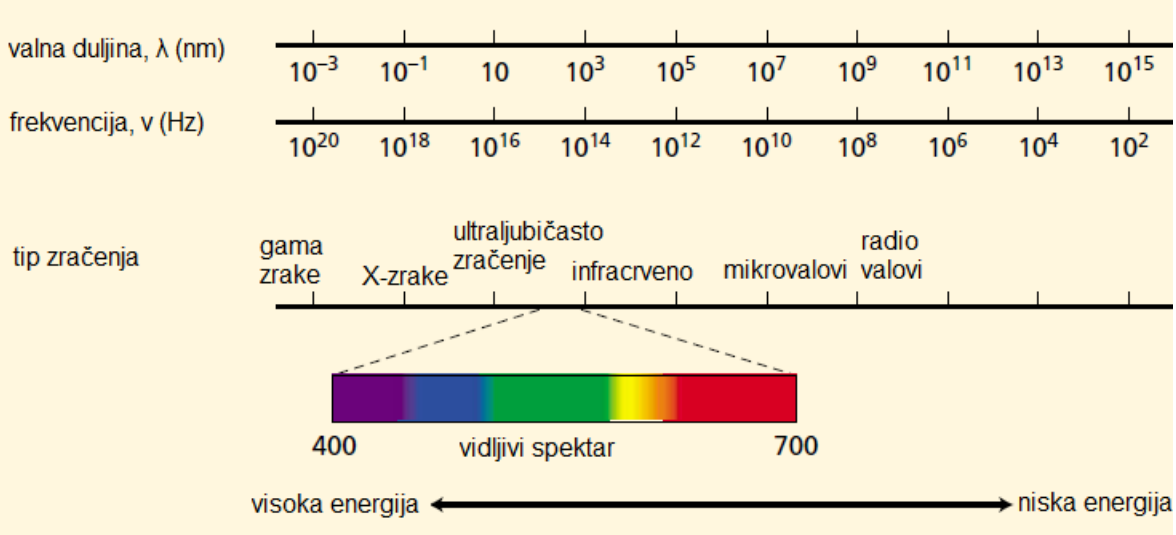


Slika 1. Kemijske strukture nekih fotoreceptorskih molekula A) molekule klorofila a, klorofila b i bakretioklorofila a te B) β-karoten iz skupine karotenoida. Na molekuli klorofila a prikazan je lipofilni fitolski rep (preuzeto i prilagođeno iz Zeiger i Teiz, 2002).

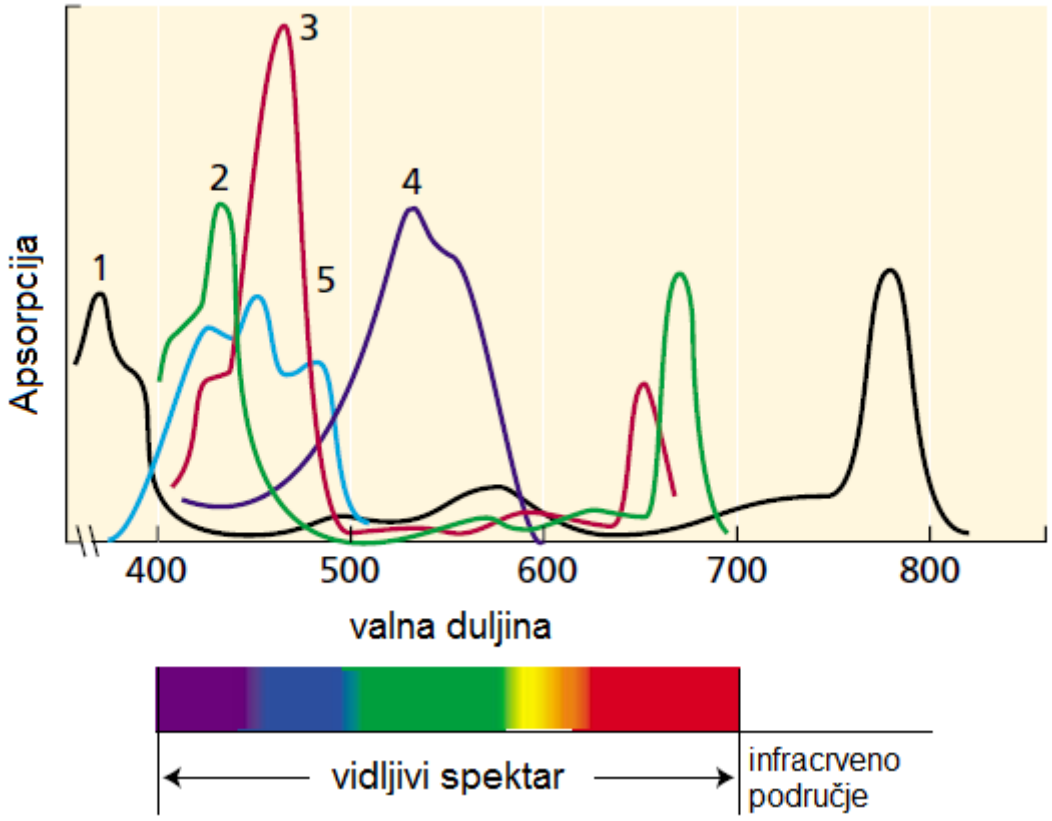
Spektar sunčevog zračenja uglavnom se sastoji od tri dijela: ultraljubičastog (*eng. ultraviolet*, UV), vidljivog svjetla (*eng. visible spectrum*, VIS,) i infracrvenog (eng. *infrared*, IR). Ultraljubičasta svijetlost dijeli se na 3 dijela spektra: ultraljubičasto C (200-280 nm), ultraljubičasto B (280-315 nm) i ultraljubičasto A (315-380 nm). Ultraljubičasto C zračenje dio je spektra koji je štetan za biljke, zbog svoje visoke toksičnosti. Blokiran je zemljinim ozonskim slojem, tako da ne dolazi do zemljine površine. Ultraljubičasto B zračenje dio je spektra koji nije jako štetan, ali uzrokuje blijeđenje biljne boje. Za ultraljubičasto A smatra se da nema ni pozitivan niti

negativan utjecaj na rast biljaka. Zračenje valne duljine od 380 do 400 nm područje je na prijelazu iz ultraljubičastog A zračenja u vidljivi dio spektra i specifično je po tome što u njemu pigmenti započinju apsorpciju. Vidljivu svijetlost dijelimo po bojama. Stoga dio spektra 400-520 nm sadrži ljubičaste, plave i zelene vrpce boja. Vrhunac apsorpcije klorofila događa se upravo u ovom rasponu i ima jak utjecaj na vegetativni rast i fotosintezu. Spektar 520-610 nm sadrži zelene, žute i narančaste vrpce, a pigmenti u njemu manje apsorbiraju te ima malen utjecaj na vegetativni rast i fotosintezu. Crvene vrpce nalazimo u području valnih duljina 610-720 nm i u ovom rasponu se odvija visok stupanj apsorpcije. Ovaj bend iznimno je bitan jer snažno utječe na vegetativni rast, fotosintezu, cvatnju i pupanje. Valne duljine 720-1000 nm označavaju prijelaz između crvenog i infracrvenog svjetla i obilježavaju se kao tamno crveno svjetlo, a zaslužno je za klijanje i cvjetanje, iako je apsorpcija ovih valnih duljina mala. Sva apsorpcija unutar infracrvenog područja (>1000 nm) pretvara se u toplinu (Lean, 1991., Zeiger i Teiz, 2002).

Biljke ne apsorbiraju sve valne duljine spektra svjetlosti. Zapravo, vrlo su selektivne te apsorbiraju zračenja odgovarajućih valnih duljina, onih koje su u skladu s njihovim zahtjevima razvoja. Najvažniji dio spektra svjetlosti za biljke su valne duljine između 400 i 700 nm. Ovaj dio spektra je poznat kao fotosintetsko aktivno zračenje (*eng.* photosynthetically active radiation, PAR) te odgovara više ili manje vidljivom spektru ljudskog oka (slika 2; Zeiger i Teiz, 2002).



Slika 2. Područje spektra PAR uglavnom odgovara području vidljivog spektra (preuzeto i prilagođeno iz Zeiger i Teiz, 2002.)



Slika 3. Apsorpcijski spektri fotosintetskih pigmenata: 1. bakteriofila a; 2. klorofila a; 3. klorofila b; 4. fikoeritrobilina; 5. β-karotena (preuzeto i prilagođeno prema Zeiger i Taiz, 2002).

2.2 Umjetni izvori svijetla i njihov način primjene

Umjetno osvjetljenje, baš kao i prirodno sunčevo zračenje, treba omogućiti biljkama energiju nužnu za razvoj. Kako bi se fotosinteza odvijala u uvjetima umjetnoga osvjetljenja važno je osigurati tri parametra svjetlosti: kvalitetu, količinu i trajanje. Sva ta tri parametra imaju različite učinke na razvoj biljke (Nishio, 2000). Količina svjetla (intenzitet) je glavni parametar koji utječe na fotosintezu odnosno fotokemijske reakcije unutar kloroplasta biljnih stanica. Kvaliteta svjetla odnosi se na spektralnu raspodjelu zračenja, valnu duljinu, odnosno boju emitiranog svjetla. Biljke reagiraju najjače na crvenu i plavu svjetlost u procesu fotosinteze. Oblik biljke, razvoj i cvatnja također su pod utjecajem kvalitete svjetla ali i trajanja svjetla pa se vrijeme cvjetanja biljke može kontrolirati reguliranjem fotoperioda (Nishio, 2000).

Umjetno svjetlo u uzgoju biljaka može se koristit na nekoliko načina: potpuna zamjena za sunčevo zračenje, dopunsko svjetlo koje će upotpunjavati periode s malo prirodne svjetlosti te kao svjetlo koje će regulirati fotoperiode kod bilja zaslužno za cvjetanje i vegetativni rast. Zamjenska svjetlost se smatra neisplativom jer u potpunosti zamjenjuje sunčevo zračenje, a pošto je sunčevo zračenje besplatno, trebalo bi se iskoristit u cjelokupnoj mogućnosti radi uštede energije ali i financijske dobiti. Također, sunčevo zračenje je daleko intenzivnije od bilo kojeg umjetnog izvora svjetlosti te ima širi i puniji spektar zračenja koji, kada se pokušava imitirati u uvjetima potpunog umjetnog osvjetljenja, treba zamijeniti s nekoliko različitih tipova lampi. Pri takvoj zamjeni, naravno, dolazi do nemogućnosti oponašanja ujednačene distribucije svjetlosti. Dopunska svjetlost najisplativiji je način uporabe umjetnog osvjetljenja. Ono se koristi u područjima koja imaju vrlo kratke periode dana s malim upadnim kutom što uzrokuje vrlo niski ukupni intenzitet svjetlosti (Parađiković i Kraljičak, 2008).

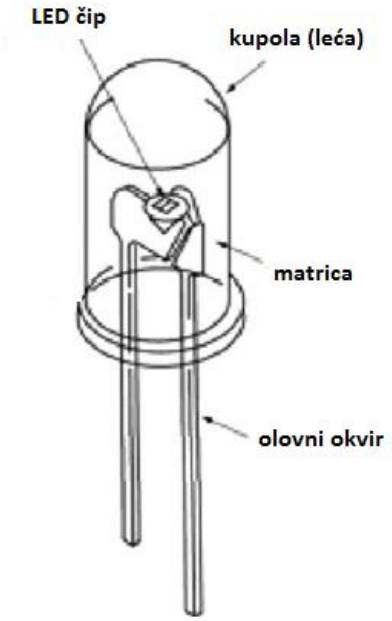
Tipovi lampa koje se tradicionalno koriste za umjetno osvjetljenje su HID (*eng. high intensity discharge*) od kojih su MH (*eng. metal halide*) te HPS (*eng. high pressure sodium*) i ksenonske žarulje najčešće, te u manjoj primjeni tu su i T5 ili fluorescentne žarulje. Sve ove vrste su lako dostupne za komercijalni uzgoj biljaka. Doduše, ovakve tipove rasvjete karakterizira distribucija svijetla širokog spektra uz nedostatnu kontrolu nad emisijom ultraljubičastog ili infracrvenog zračenja. Te karakteristike povlače za sobom nekoliko problema kao što su prekomjerno

zagrijavanje biljke zbog infracrvenog zračenja te njezin nestabilan rast i razvoj (Mitchell i sur., 2012). Najčešće korištene tradicionalne lampe su HID lampe. HID lampe imaju relativno visoko zračenje i visoku učinkovitost fotosintetskog aktivnog zračenja (maksimalno 40%) te se često koriste u staklenicima i komorama za uzgoj biljaka. Bez obzira na njihovu čestu uporabu, ovakvi izvori svijetlosti daleko su od savršenih. Ograničenja u njihovoj uporabi su brojna, a samo neka od njih su emisija visoke temperature tijekom rada i distribucija spektra s velikim udjelom zeleno-žutog dijela spektra, značajnom emisijom ultraljubičastog svijetla i tamno crvenog dijela spektra (Martineau i sur., 2012). HPS pretvaraju samo 30% unesene energije u iskoristivo svjetlo, a 30% se gubi kao toplina što su, uistinu, veliki gubitci. HPS lampe rade na iznimno visokoj temperaturi (≥200˚C). Takav rad rezultira zračenjem topline u neposrednoj blizini lampe. Zbog toga HPS lampe ne mogu biti postavljene u blizini biljaka te je potrebno osigurat adekvatan sustav ventilacije kako bi se smanjio negativan učinak na biljke (Ieperen i Trouwborst, 2008).

U novije vrijeme, razvija se nova tehnologija osvjetljenja, LED (*eng. light emitting diode*), koja sve češće postaje odabir uzgajivača. Važna karakteristika koja olakšava njihovu upotrebu, uz njihovu kompaktnu veličinu je i mogućnost optimiziranja svjetla za određene biljne potrebe sparivanjem svjetlosti različitih boja (Parađiković i Kraljičak, 2008). LED diode, u cijelom nizu umjetnog osvjetljenja, daju najveću učinkovitost fotosintetskog aktivnog zračenja (80-100%). Na tržištu su dostupne LED koje emitiraju sve dijelove vidljivog spektra. Tako imamo plave, zelene, žute, narančaste, crvene i tamno crvene LED. Ovakav uski spektar LED omogućava njihovo kombiniranje kako bi se biljci pružila odgovarajuća svjetlost. No, LED pružaju i više od samog uskog spektra zračenja. One imaju visoku efikasnost, nisku pogonsku temperaturu i male su veličinom. Zbog niske pogonske temperature mogu se smjestiti u blizini biljke bez da na nju negativno utječu. Također njihova dugotrajnost čini ih idealnim izborom u staklenicima tijekom cijele godine (Yeh i Chung, 2009). Upravo zbog svih navedenih karakteristika LED se sve više koriste kao izvor umjetnog osvjetljenja.

2.2.1 LED – struktura, prednosti i nedostaci

Struktura svjetleće diode (LED) sastoji se od čipa koji emitira svjetlo, zatim olovnog okvira u kojem se nalazi matrica i kupole koji štiti matricu (slika 4, Yeh i Chung, 2009). Danas se na tržištu nalazi veliki izbor LED lampi, ali sve rade na ovom principu. Za LED je specifično da se operativna toplina prenosi prema gore, nevezano za površinu koja emitira svjetlost. Toplina se odvodi kroz aktivne odvode topline, hladilo ili ventilator. Upravo mogućnost kontroliranja topline razlog je zbog kojeg se ovaj izvor svijetlosti može postaviti u blizini biljaka bez opasnosti od zagrijavanja (Bourget, 2008).



Slika 4. Struktura LED (preuzeto i prilagođeno iz Yeh i Chung, 2009).

Prednosti uporabe LED kao izvora umjetnog osvjetljenja su mnogobrojna. Ono najvažnije je smanjenje potrošnje energije i do 70% usporedno s HPS lampama, čime se pozitivno djeluje ne samo na ekonomsku efikasnost uzgoja nego i na očuvanje okoliša. Također, LED imaju znatno duži vijek trajanja, i do 50 000 sati u usporedbi s HID lampama, primjerice MH čiji je vijek trajanja 12 000 sati ili HPS koje traju oko 20 000 sati (Bourget, 2008).

LED pružaju i mogućnost zamračenja te visoku RQE vrijednost (*eng. relative quantum efficiency*). Visok RQE za uzgajivača znači da je ulazna energija u velikom postotku iskorištena za uzgoj. Kao što je ranije navedeno, niska operativna temperatura LED omogućava stabilnu temperaturu u komorama za rast i staklenicima. Time je posljedično i smanjen toplinski stres na biljke. Ekonomski gledano, smanjuje se potrošnja za ventilaciju i navodnjavanje. Najvažnija prednost LED je sposobnost kontrole spektralne kompozicije (Massa i sur., 2008., Mitchell i sur., 2012). Iako se pozitivne strane uporabe LED kao umjetnog izvora svijetla samo nastavljaju otkrivati za sad postoji samo jedna poznata negativna strana i to je veliki kapital. Iako, taj veliki kapital, može biti vraćen ukoliko se LED koristi dulji vremenski period.

Upotreba LED u uzgoju biljaka istražuje se već od početka 1990-ih. Sažetak nekih istraživanja utjecaja kombinacije LED svjetla različitih valnih duljina prikazan je u tablici 1. Neka od prvih istraživanja provedena su na salati, rajčici i špinatu (Bula i sur.,1991). Goins i sur. (1997) dokazali su da obična pšenica (*Triticum aestivum* L.) može izvršiti cijeli životni ciklus pod crvenim LED osvjetljenjem, dok je za veće biljke i one vrste koje proizvode više sjemena nužan dodatak plavog LED svijetla. Uzgojem vrste *Lactuca sativa* var. *capital* pod LED izvorom crvene svijetlosti valne duljine 650 nm dokazano je da biljka proizvede istu količinu suhe tvari kao i pri uzgoju s tradicionalnim osvjetljenjem (Martineau i sur., 2012). Korištenjem kombinacije crvenog svijetla i tamno crvenog svijetla utvrđeno je značajno povećanje ukupne biomase i elongacije lista crvenolisne salate uz smanjene koncentracije antocijanina i ukupne antioksidativne aktivnosti (Stutte i Edney, 2009). Suprotno tome, ako se koristilo samo crveno svijetlo valne duljine 640 nm uočeno je povećanje sadržaja antocijana u listu vrste *Brasica olearacea* var. *Capitata* L. (Mizuno i Amaki, 2011). Istraživani su i učinci plave LED svijetlosti (400-500 nm) u kombinaciji s crvenim svjetlom na rast i prehrambenu vrijednost zelenog povrća. Plave LED diode (440 i 476 nm) kada se koriste u kombinaciji s crvenim LED svjetlima dovode do povećanja omjera klorofila u kineskom kupusu te elongaciju peteljki (Mizuno i Amaki, 2011). Svjetlost valnih duljina od 505 nm značajno povećava površinu lista, svježu i suhu masu listova te koncentraciju klorofila kod sadnica krastavaca, rajčice i paprike (Samuolienė i sur. 2012). Pri istraživanju nutritivnih vrijednosti i antioksidativnog statusa otkriveno je povećanje količine vitamina C (Li i sur., 2012) i antocijanina (Stutte i Edney, 2009). Iz ovih istraživanja može se zaključiti da su crvene LED najkorisnije za otvaranje cvijeta,

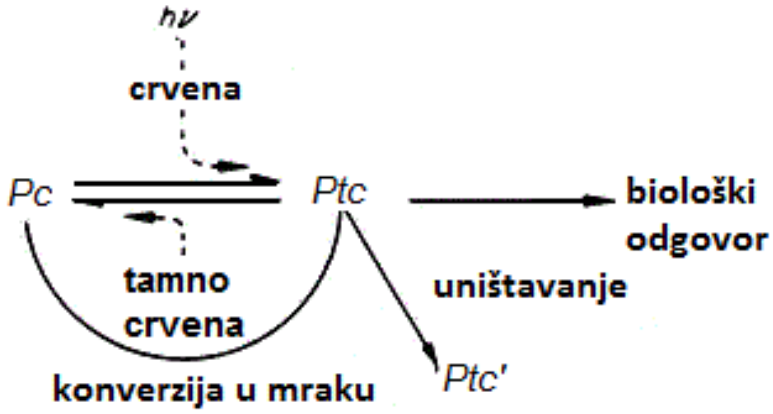
ali da se koncentracija pigmenta i nutritivno važnih tvari (vitamina C, topljivih šećera i proteina) povećava upravo pod plavim LED osvjetljenjem. Crvene LED treba koristiti kao preferirani izvor svjetla jer rezultiraju biljkama s većom biomasom i više cvjetova, a plave LED diode treba koristiti kao preferirani izvor svjetlosti za dobivanje biljaka veće prehrambene kvalitete (Li i sur., 2012).

Zeleno svjetlo također pridonosi rastu i razvoju biljaka što potvrđuju brojni eksperimenti. Naime, zelene LED diode s visokim protokom fotosintetski aktivnih fotona (*eng. photosynthetic photon flux*, PPF) su najučinkovitije za poboljšanje rasta salate (Johkan i sur., 2012). Istraživan je i utjecaj zelenog svijetla valne duljine 525 nm na klijavost sadnica *Arabidopsis*-a i rezultati su pokazali da su sadnice uzgojene u kombinaciji zelenog, crvenog i plavog LED svjetla dulje od onih uzgojenih u samo crvenom (630 nm) i plavom (470 nm) svjetlu (Folta, 2004). Iako zeleno svjetlo doprinosi rastu i razvoju biljaka, ono, ni u kojem slučaju, nije samo po sebi dovoljno za rast biljaka, jer ga biljke najmanje apsorbiraju, ali kada se koristi u kombinaciji s crvenim, plavim, i tamno crvenim, zasigurno će pokazati neke važne fiziološke učinke kao što je navedeno u tablici 1.

Iako je većina istraživanja obuhvatila niže biljke, postoje i istraživanja utjecaja LED osvjetljenja na rast i razvoj nekih vrsta drvenastih biljaka u usporedbi s fluorescentnom rasvjetom. Istraživanje rasta bukve (*Fagus sylvatica* L.), česmine (*Quercus ilex* L.) i trešnje (*Prunus avium* L.), pri čemu su korištene LED kao izvori crvene, plave i zelene svjetlosti, pokazalo je da su biljke normalno rasle. Najbolji odgovor imala je bukva, zatim trešnja dok česmina nešto manje, što se podudara s ranijim istraživanjima koja zaključuju da je odgovor biljke na isti tip svjetla ovisan o vrsti. Svjetleća dioda primjeren je alternativni način uzgoja kvalitetnog šumskog materijala (Astolfi i sur., 2012).

Rezano cvijeće i lišće imaju široko tržište diljem svijeta pa stoga i veliku ekonomsku važnost. Primjenom svjetla odgovarajućih valnih duljina i trajanja kontrolira se cirkadijani ritam biljke koji utječe na fotomorfogenezu (Zeiger i Teiz, 2002). Cvjetanje u biljkama, uglavnom je regulirano fitikromima, koje se javljaju u dva oblika: Pc i Ptc. Specifičnost ova dva pigmenta je njihova mogućnost da se pretvaraju jedan u drugi, procesom koji se naziva fototransformacija. Oblik Pc se pretvara u Ptc pod crvenim osvjetljenjem, dok Ptc prelazi u Pc oblik pri tamno crvenim osvjetljenjem

(slika 5). Biološki aktivni oblik, onaj koji pokreće biološke odgovore, je Ptc dok se biološki neaktivnim smatra Pc oblik. Omjer Pc/Pct je u ravnoteži kada biljka prima svjetlo (tijekom dana) jer je Pc pretvoren u Ptc crvenom svjetlošću, a Ptc je pretvoren natrag u Pc tamno crvenim svjetlom. Povratna reakcija Ptc je moguća i u tami, tako da je mrak razdoblje kojim se uglavnom utječe na omjer Pc/Ptc i kontrolira vrijeme cvatnje u biljkama. Konverzija tamno crvenim svijetlom, konverzija u mraku i ireverzibilno gubljenje fotoaktivnosti Pc-a osiguravaju alternativne putove za uklanjanje Ptc-a, a time i potencijal za promjenu smjera induciranih odgovora. Stoga je Pc reverzibilni biološki prekidač, s funkcijom nadgledanja prisutnosti, odsutnosti, intenziteta i spektralne kvalitete fotomorfološki aktivnog svjetla (Zeiger i Teiz, 2002., Smith, 1982., Smith, 1977).



Slika 5. Fototransformacija fitokroma Pc i Ptc (preuzeto i prilagođeno iz Smith, 1977.)

Na temelju duljine dana ili zahtjeva fotoperioda biljke dijelimo u dvije skupine: biljke kratkog dana (BKD) koje cvjetaju kada je duljina dana manja od njihove kritične duljine noći; i biljke dugog dana (BDD) koje cvjetaju kada je duljina dana veća od kritične duljine noći. Bljesak svjetla je kratko trajanje svjetla (općenito, jedan do dva sata) koje prekida fazu tame (Zeiger i Teiz, 2002). Općenito, kod svih biljaka, u koliko je svijetlost preslaba ili je nema dovoljno fotosinteza se ne može efektivno obavljati stoga nastupaju etiolacijski simptomi. Pošto se zahtjeva dug fotoperiod, zaključujemo da je LED rasvjeta energetski efikasnija opcija za regulaciju cvatnje ukrasnog bilja dugog dana, naspram tradicionalnih umjetnih izvora, jer LED diode troše manje energije i daju specifične boje (valne duljine) svjetlosti koje biljke zahtijevaju.

Tablica 1. Sažeti prikaz dijela znanstvenih istraživanja utjecaja LED osvjetljenja na fiziologiju bilja.

Promatrana vrsta	**Izvor svijetlosti**	**Utjecaj na biljnu fiziologiju**	**Izvor**
Lactuca sativa var. *capital*	LED 650 nm i HPS Na	Jednaka količina suhe tvari pod oba osvjetljenja, vlažne tvari ima manje pod LED.	Martineau i sur., 2012.
Lactuca sativa L.	LED crveno 640nm, 300 µmol/m^2 S^1 i tamno crveno 730nm, 20µmol/m^2 S^1	Povećanje ukupne mase i smanjenje ukupnog udjela antocijanina i antioksidansa.	Stutte i Edney, 2009.
Lactuca sativa L.	LED crvena (640 nm, 270 µmol/m^2 S^1) s plavom (440 nm, 30 µmol/m^2 S^1)	Sadržaj antocijanina i površina lista se povećavaju.	Stutte i Edney, 2009.
Brassica camprestis L.	LED plava 460 nm, 11% ukupnog osvijetljena s crvenom 660 nm LED, PPF 80 µmol/m^2 S^1	Povećanje koncentracije vitamina C i klorofila dodatkom plave LED svijetlosti.	Li i sur., 2012.
Brassica olearacea var. *capitata* L.	LED plavo 470 nm, 50 µmol/m^2 S^1	Veći udio klorofila.	Mizuno i Amaki, 2011.
Lactuca sativa L.	LED zeleno 510, 520 i 530 nm PPF 100, 200 i 300 µmol/m^2 S^1.	Zeleno LED svijetlo s najvećim PPF (300) najviše je poboljšalo rast.	Johkan i sur., 2012.

3 ZAKLJUČAK

Umjetno osvjetljenje (fluorescentne, MH ili HPS svjetiljke) zamjenjuje i/ili oponaša vanjske uvjete sunčevog svjetla punog spektra koje osigurava energiju za fotosintetske organizme, ali ujedno i povećava kapacitet proizvodnje.

Kako bi se smanjila potrošnja energije i optimizirao rast biljaka koriste se učinkovitije LED svjetiljke. Promjene u intenzitetu svjetla i valnoj duljini mogu manipulirati metabolizmom biljke. Da bi se iskoristio puni potencijal LED dioda kao izvora zračenja u stakleničkoj industriji, potrebno je dodatno istražiti još u potpunosti neshvaćene fiziološke procese biljka kao odgovor na LED svjetlo.

Većina istraživanja o utjecaju LED zračenja na fiziološke procese u biljkama uključuju samo crvene, tamno-crvene i plave spektre LED svjetla kao glavnog izvora svjetla. Zeleno svjetlo, koje se smatralo fotosintetski neučinkovitim može doprinijeti rastu i razvoju biljke u kombinaciji s crvenim i plavim svjetlom, što je potvrđeno novijim istraživanjima.

Zbog mogućnosti ciljanog manipuliranja metaboličkim reakcijama u svrhu optimalne produktivnosti i kvalitete biljaka, uštede energije, a time i očuvanja i zaštite Zemlje, LED diode predstavljaju inovativni izvor umjetnog osvjetljenja za biljke.

4 LITERATURA

Astolfi S, Marianello C, Grego S and Bellarosa R. 2012. Preliminary investigation of LED lighting as growth light for seedlings from different tree species in growth chambers. *Not Bot Horti Agrobo*. 40(2):31-38

Berg JM, Tymoczko JL, Stryer L. 2013*. Biokemija*, 6. izdanje (eng.); Školska Knjiga

Bourget CM. 2008. An introduction to light-emitting diodes. *Hort Science.* 43:1944-1946.

Bula RJ, Morrow RC, Tibbits TW, Barta RW, Ignatius RW & Martin TS. 1991. Light emitting diodes as a radiation source for plants. *Hort Science.* 26:203–205

Christie JM, Arvai AS, Baxter KJ, Heilmann M, Pratt AJ, O'Hara A, Kelly SM, Hothorn M, Smith BO, Hitomi K, Jenkins GI i Getzoff ED. 2012. Plant UVR8 Photoreceptor Senses UV-B by Tryptophan-Mediated Disruption of Cross-Dimer Salt Bridges. *Science.* 335(6075): 1492–1496

Croce R and Amerongen Hv. 2014. Natural strategies for photosynthetic light harvesting. *Nature.* 10.1038:1555

Darko E, Heydarizadeh P, Schoefs B, Sabzalian MR. 2014 Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. *Phil. Trans. R. Soc. B* 369: 20130243.

D'Souza C, Yuk H-G, Khoo GH and Zhou W. 2015. Application of Light-Emitting Diodes in Food Production, Postharvest Preservation, and Microbiological Food Safety. *Food Science and Food Safety.* 10.1111/1541-4337.12155

Fankhauser C, Chory J. 1997. Light control of plant development. Annu. Rev. *Cell Dev. Biol*. 13:203–229.

Folta KM. 2004. Green light stimulates early stem elongation,antagonizing light-mediated growth inhibition. *Plant Physiology*. 1407–1416

Folta KM, Maruhnich SM. 2007. Green light: A signal to slow down or stop. *J. Expt. Bot.* 58:3099–3111

Goins GD, Yorio NC, Sanwo MM & Brown CS. 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *J Exp Bot*. 48:1407–1413

Hopkins WG, Hüner NPA 2009. *Introduction to Plant Physiology*. The University of Western Ontario, John Wiley & Sons, Inc.

Ieperen VW and Trouwborst G. 2008. The Application of LEDs as Assimilation Light Source in Greenhouse Horticulture: a Simulation Study. *Acta Hort.* 33:1407-1414.

Johkan M, Shoji K, Goto F, Hahida S and Yoshihara T. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in Lactuca sativa. *Environmental and Experimental Botany.* 128– 133

Lean J. 1991. Variations in the Sun's radiative output. *American Geophysical Union.* 505-535

Li H, Tang C, Xu Z, Liu X and Han X. 2012. Effects of Different Light Sources on the Growth of Non-heading Chinese Cabbage. (*Brassica campestris* L.) *Journal of Agricultural Science* 10.5539: 1916-9752

Martineau V, Lefsrud M, Naznin MT. 2012 Comparison of light-emitting diode and highpressure sodium light treatments for hydroponics growth of Boston lettuce. *HortScience* 47(4):477–482

Massa GD, Kim HH, Wheeler RM and Mitchell CA. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *Hort Science*. 43:1951–1956

Mitchell CA, Both A-J, Bourget CM, Burr JF, Kubota C, Lopez RG, Morrow RC, Runkle ES. 2012. LEDs: The future of greenhouse lighting! *Chronica Hortic* 52:5–13

Mizuno T and Amaki W. 2011. Effects of Monochromatic Light Irradiation by LED on the Growth and Anthocyanin Contents in Leaves of Cabbage Seedling. *Acta horticulturae* 10.17660

Nishio JL. 2000. Why are higher plants green? Evolution of the higher plant photosynthetic pigment complement. *Plant Cell Environ.* 23, 539-548

Ouzounis T, Rosenqvist E, Ottosen C-O. 2015. Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *HortScience* 50(8):1128–1135

Parađiković N i Kraljičak Ž. 2008. Zaštićeni prostori - plastenici i staklenici. *Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku Poljoprivredni fakultet u Osijeku Osječko-baranjska županija*

Samuolienė G, Brazaitytė A, Duchovskis P, Viršilė A, Jankauskienė J, Sirtautas R, Novičkovas A, Sakalauskienė S and Sakalauskaitė J. 2012. Cultivation of vegetable transplants using solid-state lamps for the short-wavelenght supplementary lighting in greenhouses. *Acta Horticulturae* 952: 885-892.

Smith H. 1982. Light quality, photoperception, and plant strategy. Annu Rev *Plant Physiol.* 33:481–518.

Smith H. 1977. editor *The Molecular Biology of Plant Cells.* Berkeley: University of California Press.

Stutte GW and Edney S. 2009. Photoregulation of Bioprotectant Content of Red Leaf Lettuce with Light-emitting Diodes *HortScience* 44(1):79–82.

Yeh N, Chung JP. 2009 High-brightness LEDs – Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renew. Sustain. Energy Rev*. 13, 2175–2180.

Zeiger L. and Taiz E. 2002. *Plant physiology.* 3rd edn. Sinauer Associates