



**TURUN
YLIOPISTO**

Melatoniini kasvien biostimulanttina

ja sen sovellukset ruoantuotannossa & kasviensuojeluaineena

Luk-Tutkielma
Turun yliopisto
Bioteknologian laitos
Biokemia

Ruut Rokka

27.4.2026

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

Tutkinto-ohjelma, oppiaine: Biokemia

Tekijä: Ruut Rokka

Otsikko: Melatoniini kasvien biostimulanttina ja sen sovellukset ruoantuotannossa & luonnonsuojelussa

Ohjaaja: Iida-Maria Rantanen

Sivumäärä: 25 sivua

Päivämäärä: 27.04.2026

Melatoniini on kaikissa eliöryhmissä esiintyvä indoliamiini, joka tunnistettiin kasveissa vuonna 1995. Kasvimelatoniinilla on keskeinen rooli kasvin sisäisten prosessien, kuten kasvun, stressivasteiden ja fotosynteesitehokkuuden säätelyssä. Tutkimuksissa on havaittu ulkoisesti lisätyn, eksogeenisen melatoniinin tehostavan näitä vaikutuksia. Tämä tekee melatoniinista potentiaalisen biostimulantin. Biostimulantit ovat yhdisteitä, jotka edistävät kasvin omia prosesseja ilman ravinnelisäystä. Luonnollisille biostimulanteille on kasvava tarve kasvien kasvuolosuhteiden ja ihmisten ravintotottumusten muuttuessa.

Eksogeenisen melatoniinin ominaisuuksia on tutkittu esimerkiksi ruohovartisilla viljelyskasveilla, puilla sekä leikkokukilla. Sen on osoitettu parantavan kasvien kasvua ja kehitystä erityisesti stressiolosuhteissa. Lisäksi sen on osoitettu edistävän satoisuutta, sadon laatua ja hedelmien säilyvyyttä. Nämä ominaisuudet mahdollistavat melatoniinille merkittävän potentiaalin erityisesti ruoantuotannossa ja kasviensuojeluaineena.

Avainsanat: Biostimulantti, Eksogeeninen melatoniini, Endogeeninen melatoniini

Sisällysluettelo

1	Johdanto	4
2	Melatoniini	5
2.1	Kasvimelatoniinin synteesi ja sitoutuminen	6
2.2	Kasvimelatoniinin vaikutukset	8
3	Biostimulantit	10
3.1	Melatoniini biostimulanttina	10
3.1.1	Satoisuuden ja tuotteen laadun parantaminen	12
3.1.2	Markkinatilanne	12
4	Biostimulanttien valmistus ja kasvien käsittely	14
4.1	Melatoniinin vastuullinen valmistaminen ja endogeenisen melatoniinituotannon tehostaminen	14
4.2	Käsittelymenetelmät	15
5	Melatoniinin muut sovellukset	16
5.1	Melatoniini luonnollisena säilöntäaineena ja kestävyiden parantajana	16
5.2	Melatoniini kasvinsuojeluaineena	17
5.3	Mahdollisuudet metsänhoidossa	18
6	Yhteenvedo	19
	Lähteet	20

1 Johdanto

Ilmastonmuutos, kasvukauden vaihtelut, kasvava ihmismäärä ja muuttuvat ruokailutottumukset ja -trendit vaikuttavat merkittävästi maatalouteen ja luonnon hyvinvointiin (Wheeler ja von Braun 2013). Jotta luonnon monimuotoisuus ja ruokaturva voidaan taata tulevaisuudessa, tarvitaan uusia keinoja kasvien elinvoimaisuuden ylläpitämiseksi. Muuttuvien kasvuolosuhteiden aiheuttama stressi ilmenee kasveissa muun muassa satoisuuden vähentymisenä ja kasvaneena alttiutena kasvitaudeille (Azooz ja Ahmad 2016).

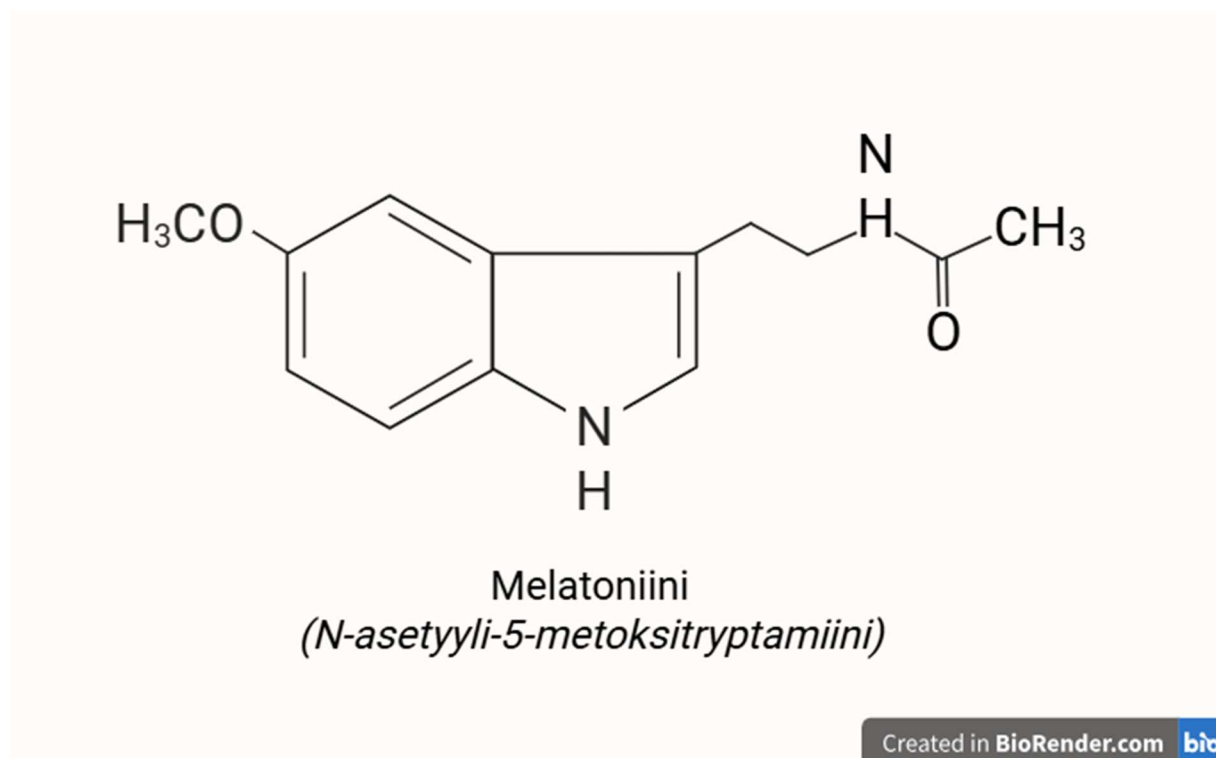
Kasvien kasvua tehostamaan käytetään yleisimmin lannoitteita (Savci 2012). Lannoitteet sisältävät kasvien tarvitsemia ravintoaineita ja oikein käytettynä lannoitteet tehostavat kasvien kasvua. Lannoitteiden haasteena on riittävän vasteen saanti kasvissa, joka johtaa lannoitteiden käyttöön ylimäärin. Runsas käyttö johtaa ravinteiden kertymiseen ja rikastumiseen maaperässä, joka aiheuttaa ongelmia, kuten mikrobikannan pienenemistä ja maaperän pH:n muutoksia (Chittora ja muut 2023; du Jardin 2015). Lannoitteiden sijaan voitaisiin käyttää biostimulantteja.

Biostimulantit ovat aineita tai mikro-organismeja, jotka tehostavat kasvin sisäisiä prosesseja riippumatta ravinteiden määrästä (du Jardin 2015). Biostimulantit vaikuttavat positiivisesti esimerkiksi kasvuun, puolustusvasteisiin ja stressinsietoon (Gao ja muut 2022; Karumannil ja muut 2023; Reiter ja muut 2015). Oikein käytettynä biostimulantit vähentävät lannoitteiden tarvetta ja vaikuttavat positiivisesti kasvien kasvukykyyn stressiolosuhteissa.

Melatoniini (*N-asetyyl-5-metoksitryptamiini*) on molekyyli, jota tavataan melkein kaikissa eliöryhmissä (Gao ja muut 2022). Kasveissa esiintyvällä kasvimelatoniinilla on todettu olevan useita merkittäviä vaikutuksia kasvin sisäisiin prosesseihin, kuten fotosynteesin säätelyyn ja patogeenivasteiden toimintaan (Chen ja muut 2019; Karumannil ja muut 2023). Ulkoisesti lisätyn, eli eksogeenisen melatoniinin on todettu tehostavan näitä vaikutuksia (Marino B. Arnao ja Hernández-Ruiz 2019; M. Khan ja muut 2024). Tämän tutkielman tavoitteena on tarkastella melatoniinin mahdollisuuksia biostimulanttina, erityisesti ruoantuotannon ja kasvinsuojelun näkökulmasta.

2 Melatoniini

Melatoniini (*N*-asetyyli-5-metoksitryptamiini) on amfiifiilinen, tryptofaanijohdannainen indoliamiini (kuva 1), jonka rakenne mahdollistaa sen kulkeutumisen erilaisten kudosten välillä (Ikram ja muut 2024).



Kuva 1. Melatoniinin (N-asetyyli-5-metoksitryptamiinin) kemiallinen rakenne. Kuva tehty BioRender.com.

Melatoniinin kemiallinen rakenne ja biosynteesireitti on lajien välillä hyvin samankaltainen, vaikka eroavaisuuksia on (Arendt 1998; Reiter ja muut 2015). Kasvit syntetisoivat melatoniinin lähtöainetta tryptofaania shikimaattireitin kautta, kun selkärankaisten eliöiden on saatava tryptofaani ravinnosta (Kumari ja muut 2023; (Arendt 1998).

Useilla selkärankaisilla, kuten nisäkkäillä, melatoniinia tuotetaan ja eritetään käpylisäkkeessä sekä ekstrapineaalisesti, eli käpylisäkkeen ulkopuolisissa kudoksissa (Arendt 1998; López-Patiño ja muut 2014; Martyniuk ja muut 2020). Käpylisäkkeestä erittyvän melatoniinin synteesi on vuorokausirytmien säätelyä ja hormoni erittyy verenkiertoon. Ekstrapineaalinen melatoniini syntetisoidaan mitokondrioissa ja sen eritystä sääteleviä tekijöitä ei tunneta.

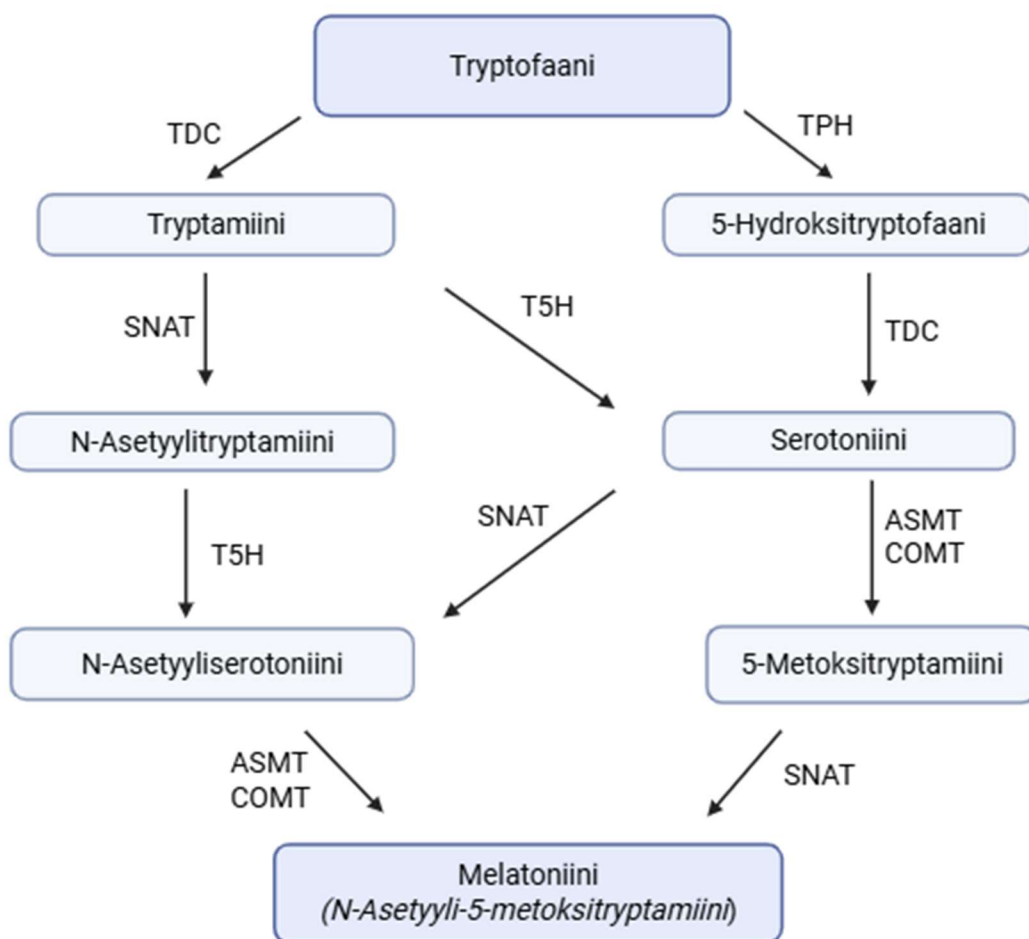
Tiedettävästi se ei erity verenkiertoon, vaan paikallisesti kudoksiin. Eläimistä esimerkiksi nisäkkäillä melatoniini vaikuttaa muun muassa vuorokausirytmien säätelyyn, lisääntymisfysiologiaan sekä immuunivasteeseen ja kaloilla esimerkiksi lämmönsäätelyyn, nahan väritykseen sekä lohikaloilla muuttoliikkeeseen (López-Patiño ja muut 2014; Martyniuk ja muut 2020; Zhang ja muut 2015).

Kasveissa esiintyvää melatoniinia kutsutaan kasvimelatoniiniksi tai fytomelatoniiniksi (phytomelatonin) ja sitä tuotetaan pääasiallisesti mitokondrioissa ja viherhiukkasissa (Tan ja muut 2013). Kasvisolujen melatoniinipitoisuudet ovat pääasiassa korkeampia kuin eläinsolujen. Vaikka kasvi- ja eläinsolujen melatoniini on synteestiltään ja kemialliselta rakenteeltaan samankaltainen, kasvisoluilla reaktioita syntetisoiva entsyymi N-asetyyli-tranferaasi (*SNAT*) on geneettisesti lähempänä syanobakteereja kuin eläinsoluja (Reiter ja muut 2015; Zheng ja muut 2017). Tämä on herättänyt ajatuksen mahdollisesta eroavasta geneettisestä alkuperästä.

2.1 Kasvimelatoniinin synteesi ja sitoutuminen

Kasvimelatoniinia syntetisoidaan kaikissa kasvin rakenteissa ja melatoniinin pitoisuus kudoksessa vaihtelee kasvilajin, kasvin rakenteiden sekä kasvuvaiheiden välillä (Ikram ja muut 2024). Eniten sitä esiintyy siemenissä ja muodostuu erityisesti stressin aikana (Feng ja muut 2022).

Kasvimelatoniinia syntetisoidaan kahta pääreittiä pitkin, N-asettyliserotoniini- sekä serotoniini/metoksitryptamiini-reittiä (kuva 2) (Back ja muut 2016; Hardeland 2016). N-asettyliserotoniini reitti aktivoituu pääasiallisesti normaaleissa kasvuolosuhteissa ja serotoniini/metoksitryptamiini reitti aktivoituu kasvin kudosten ikääntyessä sekä kasvin tuottaessa suuria määriä serotoniinia.



Created in BioRender.com 

Kuva 2. Kasvimelatoninin pääsynteesireitit ja synteeseihin vaikuttavat entsyymit. Kuva tehty BioRender.com mukaillen lähdeettä (M B Arnao ja Hernández-Ruiz 2018).

Melatoninin biosynteesiä säätelevät pääasiassa entsyymit tryptofaanidekarboksylaasi (*TDC*), tryptamiini-5-hydroksylaasi (*T5H*), serotoniini-N-asetyylitransferaasi (*SNAT*) ja asetyyyliserotoniini-O-metylaasi (*ASMT*). Näiden entsyymien tuottoa säätelevien geenien ilmentyminen tehostuu melatoninin ollessa läsnä, eli melatoniini säätelee positiivisesti omaa biosynteesiään (Back ja muut 2016; Hardeland 2016). Lisäksi serotoniini säätelee melatoninin biosynteesiä.

Melatoninin on tunnistettu sitoutuvan spesifiseen membraanireseptoriin CAND2/PMTR1 (Wei ja muut 2018). Reseptorin aktivoituminen käynnistää G-proteiinivälitteisiä

signalointireittejä, jotka saavat aikaan fysiologisia muutoksia kasvin toiminnassa. Nämä signalointireitit mahdollistavat esimerkiksi reaktiivisten happilajien tuotannon sekä ilmarakojen liikkeiden säätelyyn. Muita kasvimelatoniniin sitoutumispaikkoja ei ole vielä varmistettu, mutta on osoitettu, että melatoniini voi sitoutua myös PR-10-luokan proteiineihin (Sliwiak ja muut 2018). On esitetty, että kyseisillä proteiineilla olisi vaikutusta melatoniniin ja kasvihormonien välisissä reaktioissa.

2.2 Kasvimelatoniniin vaikutukset

Melatoniini vaikuttaa laajasti kasvin fysiologisiin prosesseihin, ja se toimii muun muassa antioksidanttina, geenien ilmentymisen säätelijänä ja signalointimolekyylinä (M. S. S. Khan ja muut 2023). Lisäksi se vaikuttaa kasvihormonien toimintaan (Ye ja muut 2020).

Kasvimelatoniniin keskeisimpiä vaikutuksia ovat sen antioksidanttiset vaikutukset (Eghlima ja muut 2025; Muhammad ja muut 2025a). Melatoniini voi toimia sekä suoraan antioksidanttina neutraloimalla stressissä syntyviä reaktiivisia happilajeja että lisäämällä muiden antioksidanttientsyymien aktiivisuutta.

Melatoniini vaikuttaa geenien ilmentymiseen säätelemällä sekä transkriptiotekijöiden aktiivisuutta että epigeneettisiä mekanismeja, kuten DNA-metylaatiota (Gao ja muut 2022; Weeda ja muut 2014; Zhang ja muut 2025). Melatoniini voi lisätä tai vähentää kohdegeenin ekspressiota. Melatoniniin välittämä geenien säätely on erityisen aktiivista abioottisessa stressissä, kohdistuen stressivastetta ja stressihormonien signalointireittejä sääteleviin geneihin. Lisäksi melatoniini vaikuttaa joidenkin sekundäärimetaboliittien, kuten flavonoidien, biosynteesiä sääteleviin geneihin. Melatoniniin roolia lituruohon (*Arabidopsis thaliana*) geenien ekspressioon käsittelevässä Weeda ja muiden (2014) tutkimuksessa melatoniinikäsittelyn havaittiin vaikuttavan 1308 geenin säätelyyn, ja sinimailasta käsittelevässä Zhang ja muiden (2025) tutkimuksessa melatoniinikäsittely vaikutti 1,991 geenin ekspressioon.

Geenien ilmentymisen lisäksi, melatoniini vaikuttaa kasvihormonien säätelyyn, metaboliaan ja hormonien väliseen signalointiin (*crosstalking*) (M B Arnao ja Hernández-Ruiz 2018; Ye ja muut 2020). Se on mukana esimerkiksi abskissihapon (*ABA*) biosynteesiin osallistuvien geenien ja auksiinin kantajaproteiinien säätelyssä sekä indoli-3-asetattaatti hapon (*IAA*),

sytokiniinien gibberelliinien ja etyleenin metaboliassa. Hormonien väliseen signalointiin melatoniini osallistuu aktivoimalla sytokiniinivälitteisiä signalointireittejä, joiden aktivoituminen on erityisen voimakasta abioottisessa stressissä.

Melatoniinin toimintaan ja sen vaikutuksiin liittyvät oleellisesti myös sekundäärimetaboliitit (Khaton ja muut 2026). Vaikutukset esimerkiksi abioottisen stressin sietoon perustuvat osin sekundäärimetaboliittien ominaisuuksiin. Melatoniini tehostaa mm. flavonoidien, polyamiinien ja antosyaanien biosynteesiä. Lisäksi melatoniini hajoaa muiksi metaboliiteiksi, joilla on melatoniinin kaltaisia vaikutuksia (Korkmaz ja muut 2023; Zeng ja muut 2022). Näitä metaboliitteja ovat esimerkiksi 2-hydroksimelatoniini (*2-hydroxymelatonin, 2-OHM*), syklinen-3-hydroksimelatoniini (*cyclic-3-hydroxymelatonin*) ja AMFK (*N¹-acetyl-N²-formyl-5-methoxyknuramine*) (Yu ja muut 2018). Esimerkiksi 2-OHM:in on todettu tehostavan kylmästressi vastetta chilikasvien siemenissä ja patogeenistressi vastetta lituruohossa (Korkmaz ja muut 2023; Yu ja muut 2018).

3 Biostimulantit

Biostimulantit ovat yhdisteitä tai mikro-organismeja, jotka tehostavat kasvin omia fysiologisia prosesseja (du Jardin 2015). Biostimulantit tunnistettiin tutkimuskirjallisuudessa lannoitteista erillisiksi aineiksi 1990-luvulla, maataloudessa niiden vaikutukset on tunnistettu jo aiemmin. Biostimulanttien kirjo on laaja, ja uusia tunnistetaan jatkuvasti lisä (du Jardin 2015; Geelen ja muut 2020). Biostimulantit eivät sisällä ravinteita ja niiden vaikutukset ovat moninaisia ja usein yhtäaikaisia. Biostimulantit vaikuttavat positiivisesti esimerkiksi ravinteiden hydyntmistehokkuuteen ja kuivuuden ja suolapitoisuuden kestävyyden stelyyn.

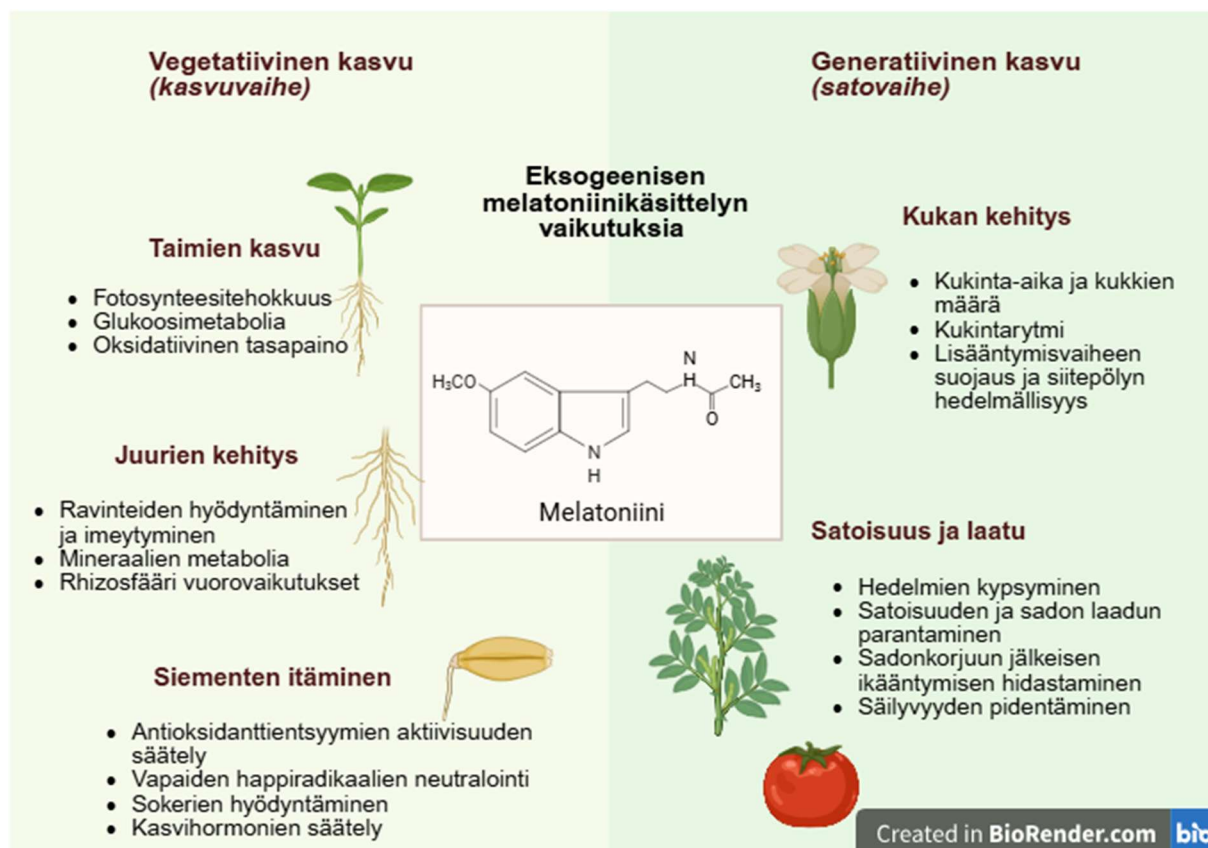
Tunnettuja ja yleisimpiä biostimulantteja ovat merilevvalmisteet, humus- ja fulvohapot (*humic acids, fulvic acids*) proteiinihydroksylaattit (*protein hydroxylates*), biopolymeerit, tyypeä sisältävät yhdisteet (*N-containing compounds*), sekä kasvua edistävät juuristobakteerit (*plant growth promoting rhizobacteria, PGPR*) (du Jardin 2015; Geelen ja muut 2020). Näistä erityisesti merilevn positiivinen vaikutus kasvua tehostavana aineena on tunnistettu maataloudessa pidempan.

3.1 Melatoniini biostimulanttina

Eksogeenisen, eli kasvin ulkopuolelta lisättävän melatoniin, on todettu vaikuttavan samalla tavalla kasviin kuin endogeenisen, eli sisäsyntyisen melatoniinin (Debnath ja muut 2018; Eghlima ja muut 2025; Feng ja muut 2022). Endogeenisen melatoniinin tuotanto vähentää stressin vaikutuksia, mutta ei aina riitä neutraloimaan niitä. (Reiter ja muut 2015; Wang ja muut 2022). Eksogeenisen melatoniinin lisäys tehostaa kasvin sisäisiä prosesseja ja toimii endogeenisen melatoniinin tukena. Lisäksi se edistää endogeenisen melatoniinin tuotantoa edistämällä melatoniinin synteesiä satelevien geenien ekspressiota. Eksogeenisen melatoniin vaikutukset ovat merkittäviä erityisesti kasvin abioottiseen stressinsietokykyyn, jonka takia melatoniinia voitaisiin hyödyntää biostimulanttina maataloudessa.

Melatoniinia voidaan lisätä kasviin eri tavoin: sitä voidaan suihkuttaa kasvin maanpalliseen osaan, lisätä kasvualustaan tai käsitellä siemenet ennen kylv (Wang ja muut 2022). Nämä eri menetelmät mahdollistavat melatoniinin vaikutukset eri kehitysvaiheissa. Vaikutukset voidaan jakaa kasvin kasvuvaiheen ja satovaiheen aikaisiin vaikutuksiin (kuva 3).

Kasvuvaiheessa vaikutukset keskittyvät siementen, juurien ja taimien kehitykseen, satovaiheessa melatoniini vaikuttaa kukan kehitykseen ja satoisuuteen sekä sadon laatuun.



Kuva 3. Eksogeenisen melatoniinikäsittelyn vaikutuksia kasviin kasvun eri vaiheissa. Kuva tehty BioRender.com mukailten lähettä (Wang ja muut 2022).

Melatoniinikäsittelyillä on saatu positiivisia vaikutuksia stressiympäristöissä (Eghlima ja muut 2025). Käsittelyjen on todettu tehostavan esimerkiksi antioksidanttiaktiivisuutta, vähentävän reaktiivisten happiradikaalien aktiivisuutta ja tehostavan patogeenipuolustusta (Eghlima ja muut 2025; Huang ja muut 2019; Muhammad ja muut 2025a).

Lisätty melatoniini pystyy suoraan neutraloimaan stressissä syntyviä reaktiivisia happilajeja, sekä lisäämään antioksidanttientsyymien, kuten katalaasin (*CAT*) ja superoksididismutataasin (*SOD*) aktiivisuutta (Muhammad ja muut 2025). Kuivuusstressille altistettaessa melatoniinikäsittelyn havaittiin saavan aikaan oksidatiivisten vaurioiden tehostuneen korjaamisen ja vedenpidätyskyvyn lisääntymisen. Nämä johtivat parempaan solukalvon stabiiliuteen ja solun eheyden ylläpitoon.

Melatoniinikäsittely tehostaa myös sekundäärimetaboliittien, kuten flavonoidien ja fenolihdisteiden muodostumista (Eghlima ja muut 2025). Nämä yhdisteet tehostavat kasvua

esimerkiksi kuivissa olosuhteissa lisäämällä vedenpidätyskykyä, estämällä klorofyllien hajoamista ja tehostamalla fotosysteemi II toimintaa (Muhammad ja muut 2025a; Zheng ja muut 2017). Lisäksi melatoniinikäsittely vaikuttaa ilmarakojen käyttäytymiseen, kaasujen vaihtoon ja hiilidioksidin sisäänottoon.

3.1.1 Satoisuuden ja tuotteen laadun parantaminen

Melatoniinikäsittelyn on todettu lisäävän kasvien ja hedelmien satoisuutta, kestävyyttä, kuluttajamieltyvyyttä sekä sadonkorjuun jälkeistä säilyvyyttä (Cortes-Montana ja muut 2024; Imran ja muut 2021). Vaikutuksia on tutkittu erityisesti stressiolosuhteissa.

Imran ja muiden (2021) soijapavun kasvua käsittelevässä tutkimuksessa soijapavut altistettiin kuivuustressille ja käsiteltiin melatoniinilla. Käsittelyn seurauksena kasvien stressivaste tehostui ja satoisuus parani. Melatoniinikäsittely suoritettiin erillisinä sekä siemeniin että juuriin ja havaittiin, että erityisesti juuret käsittelemällä melatoniini vaikutti positiivisesti stressivastetta käsitteleviin entsyymeihin, sääтели veden jakautumista kasvissa ja piti yllä korkeampaa klorofyllipitoisuutta.

Cortes-Montana ja muiden (2024) tutkimuksessa tutkittiin melatoniinikäsittelyn vaikutusta aikaisen sadon kirsikoihin (*Early sweet cherries*). Nämä lajikkeet eivät ole saavuttaneet yhtä suurta suosiota kuluttajien keskuudessa kuin myöhäisemmän sadon kirsikat ja lisäksi niiden säilymisaika on lyhyt. Tutkimuksessa tutkittiin vaikutuksia kahteen kaupalliseen lajikkeeseen, Sambo ja Sandon rose. Melatoniinikäsittelyn seurauksena molempien lajikkeiden ominaisuudet paranivat, Sambo-lajikkeella erityisesti kirsikoiden väri ja kuluttajamielipide nousivat ja Sandon rose-lajikkeella hedelmät kasvoivat suuremmiksi verrattuna kontrolleihin. Lisäksi molempien lajikkeiden aromaattisten happojen pitoisuudet nousivat. Tutkimus suoritettiin kahtena kautena ja menetelmänä oli melatoniinia sisältävän liuoksen suihkutussuoraan puihin.

3.1.2 Markkinatilanne

Melatoniinilla on merkittävästi potentiaalia markkinoilla ja sen mahdollisuuksia biostimulanttina tutkitaan jatkuvasti (Marino B. Arnao ja Hernández-Ruiz 2019).

Markkinoilla ei kuitenkaan pääsääntöisesti ole kuluttajille myynnissä biostimulantiksi tarkoitettua melatoniinia. Haasteena markkinoille tuomisessa on muun muassa standardisoitujen menetelmien puute. Tutkimustietoa ei ole riittävästi, jotta voitaisiin määrittää esimerkiksi annostelutapa ja annostusmäärä.

Espanjassa, Murcian yliopiston alaisena on professori M.B Arnaon perustama spin-off yritys, PBS-phytomelatonin, joka myy biostimulanttina melatoniinia kuluttajille paikallisesti (”PBS-Phytomel | phytomelatonin” haettu 9.4.2026).

4 Biostimulanttien valmistus ja kasvien käsittely

Biostimulanttien tuotantomenetelmät vaihtelevat merkittävästi riippuen valmistettavasta biostimulantista (Drobek ja muut 2019; Yakhin ja muut 2017). Biostimulantteja tuotetaan sekä suoraan orgaanisista lähteistä eristämällä, että kemiallisella synteesillä. Tuottotapoja ovat esimerkiksi biostimulanttien tuottaminen ja eristäminen mikro-organismeista, eristys suoraan kasvista sekä fermentointi ja hydrolysointi.

Biostimulantteja pidetään ympäristöystävällisinä vaihtoehtoina muille maanviljelyssä käytettäville aineille, kuten lisäravinteille ja hyönteis- tai rikkakasvintorjunta-aineille. Tuotanto tapahtuu pääasiassa orgaanisista, uusiutuvista raaka-aineista, mutta osa biostimulanteista, kuten humuspitoiset hapot, tuotetaan pääsääntöisesti uusiutumattomista raaka-aineista synteettisin menetelmin (Canellas ja muut 2025).

4.1 Melatoniinin vastuullinen valmistaminen ja endogeenisen melatoniinituotannon tehostaminen

Melatoniinia tuotetaan pääasiassa synteettisin menetelmin, joissa muodostuu ihmisille ja ympäristölle myrkyllisiä sivutuotteita (Feng ja muut 2022). Mahdollisuuksia tuottaa melatoniinia biologisin menetelmin mikrobien avulla tai kasveista eristämällä on tutkittu hyvin tuloksin. Biologisesti tuotetun melatoniinin tuotantokustannukset kuitenkin rajoittavat kehitystä. Kasviperäisen melatoniinin tuotanto vaatii runsaasti kasvimateriaalia raaka-aineeksi ja erinäisiä eristysmenetelmiä. Nämä menetelmät ovat kalliimpia kuin optimoidut, kustannustehokkaat synteettiset menetelmät.

Biostimulanttien tuotantoa viljelykasvien tuotannon sivuvirroista ja jätteistä on tutkittu (Canellas ja muut 2025). Ekologisemmalla biostimulanttien tuotannolla olisi potentiaalia vähentää synteettisen tuotannon aiheuttamia ympäristörasitteita. Myös kuljetuksesta aiheutuvia haittoja voitaisiin vähentää valmistamalla biostimulantteja samassa paikassa, jossa kasvit viljellään. Tätä on tutkittu esimerkiksi tuottamalla mikrobien avulla kompostijätteestä humushappoja, joiden avulla on onnistuneesti tehostettu passionhedelmäpuiden kasvua. Koska melatoniinia on onnistuneesti eristetty kasveista, vastaavanlainen tekniikka voisi olla potentiaalinen myös melatoniinin tuotossa, mutta asiasta ei ole vielä tutkimustietoa.

Mahdollisuuksia kasvin endogeenisen melatoniinituoton tehostamiseksi on myös tutkittu (Zheng ja muut 2017). Endogeenista melatoniinipitoisuutta voidaan nostaa vaikuttamalla kasvin luonnolliseen melatoniinin synteesiin esimerkiksi käsittelemällä kasvit eksogeenisellä melatoniinilla tai N-asetyyli-serotoniinilla (*melatoniinin synteesissä toimiva substraatti*).

4.2 Käsittelymenetelmät

Kasvien käsittelymenetelmät vaihtelevat biostimulantilla käsiteltävän kasvilajin mukaan (Drobek ja muut 2019). Yleisimmin biostimulantteja annostellaan joko suoraan kasvualustaan tai suihkuttamalla kasvien lehtiin. Kasvualustaan biostimulantit voidaan antaa veden mukana, jauheena tai rakeina. Biostimulantit voivat vaikuttaa paikallisesti, jolloin annostelupaikalla on merkitystä.

Melatoniinin biostimulanttisia ominaisuuksia tutkittaessa on saatu siementen käsittelyllä parempi vaste verrattuna muihin käsittelytekniikoihin (Ye ja muut 2020). Esimerkiksi Ye ja muiden tutkimuksessa siemenkäsittely nosti talvivehnan satoa jopa 34 prosenttiyksikköä. Muita käsittelymenetelmiä melatoniinin annostelulle ovat juurien käsittely, kasteluveden mukana annosteleminen ja suihkuttaminen suoraan kasvustoon, kuten taimiin, lehtiin tai hedelmiin. Myös melatoniinin annostelua nanopartikkelien välityksellä on tutkittu onnistuneesti (Mukherjee ja muut 2024).

5 Melatoniinin muut sovellukset

Melatoniinilla on huomattavasti mahdollisuuksia niin ruoantuotannossa, kasvinsuojeluaineena kuin luonnonsuojeluaineena (Cortes-Montana ja muut 2024; Wheeler ja von Braun 2013). Ruoantuotannossa merkittävä ominaisuus on melatoniinin toimiminen luonnollisena säilöntä- ja torjunta-aineena (Chen ja muut 2019; Feng ja muut 2022). Puita käsittelevissä tutkimuksissa melatoniinin on todettu vaikuttavan kasvuun, sekä kylmän ja kuivankestoon (Çelik ja muut 2023; Chen ja muut 2019; Ye ja muut 2020). Tämä tekee melatoniinista potentiaalisen myös metsänhoidon näkökulmasta.

5.1 Melatoniini luonnollisena säilöntäaineena ja kestävyiden parantajana

Ruoantuotanto kokee painetta ilmaston ja ravintosuositusten muuttuessa, sekä ihmismäärän kasvaessa (Cortes-Montana ja muut 2024; Wheeler ja von Braun 2013). Ruoantuotanto on globalisoitunut ja hedelmät ja vihannekset kulkevat pitkiä matkoja. Tämän seurauksena tuotteilla tulee olla pitkä säilyvyys, ilman että laatu tai ravintoarvot heikkenevät. Arvioiden mukaan jopa puolet vihanneksista heikkenee laadultaan sadonkorjuun ja kuluttajalle päätyminen välisessä vaiheessa (Feng ja muut 2022; Rezaei ja Liu 2017). Ongelmaa on pyritty vähentämään lisäämällä tuotteisiin säilöntäaineita. Osa keinotekoisista säilöntäaineista on todettu ihmisten terveydelle haitalliseksi, ja tarve luonnollisille, turvallisille säilöntäaineilla on kasvanut (Feng ja muut 2022; Samoylov ja muut 2021). Melatoniinin ominaisuudet tekevät siitä luonnollisen säilöntäaineen, jolla ei ole tutkitusti ihmisten terveydelle riskiä haittavaikutuksista.

Melatoniinia luonnollisena säilöntäaineena ja kestävyiden parantajana on tutkittu muun muassa mansikassa, salaattissa ja leikkokukissa (Belisle ja muut 2023; Esgandian ja muut 2025; Promyou ja muut 2023).

Promyou ja muut (2023) tutkivat melatoniinikäsittelyn vaikutuksia mansikan (*Fragaria x ananassa cv. Camino real*) kasvuun, sekä erityisesti miten melatoniini vaikuttaa mansikassa ilmenevään harmaahomeeseen, jota *Botrytis cinerea* sieni aiheuttaa. Harmaahome on ongelmana erityisesti mansikoiden säilytysvaiheessa. Tutkimuksessa mansikat käsiteltiin 100 µM pitoisuudella melatoniinia 15 minuutin ajan, tunnin kuluttua mansikoiden keräämisestä. Mansikat altistettiin homeelle antamalla infektion tapahtua luonnollisesti, sekä lisäämällä

patogeenejä käsittelyliuokseen. Mansikoiden ominaisuuksia, kuten ulkonäköä, hedelmän väriä ja kiinteyttä, painonmuutoksia sekä antioksidanttien pitoisuuksia, tarkasteltiin kahden päivän välein. Tuloksena käsitellyt mansikat olivat väriltään kirkkaampia, värinmuutos hidastui ja mansikoiden tuorepaino sekä kiinteys pysyivät kauemmin muuttumattomina verrattuna kontrolleihin. Lisäksi käsittely tehosti mansikan biokemiallisia ominaisuuksia lisäämällä DPPH:n (*2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl*, *antioksidanttiaktiivisuuteen vaikuttava molekyyli*) kertymistä ja antioksidanttien (*SOD, POD ja APX*) pitoisuuksia. Melatoniinin lisäys vähensi harmaahomeen ilmentymistä merkittävästi niin luonnollisesti infektoiduneessa kuin tarkoituksella infektoidussa mansikassa, ja tehosti mansikan säilyvyyttä ja kestävyyttä.

Belisle ja muut (2023) tutkivat salaatin säilyvyyttä. Tutkimuksessa arvioitiin eksogeenisten fytokeemikaalien vaikutusta salaatin lehtiruotien punertumisen muodostumiseen (*pink rib discoloration*). Punertuminen on seurausta salaatin vaurioitumisesta, ja se vaikuttaa salaatin säilyvyyteen ja kuluttajamiellyttävyyteen. Tutkimuksessa testattiin serotoniinin, naringiniinin, L-kysteiinin ja melatoniinin vaikutuksia. Tuloksena havaittiin, että melatoniinikäsitellyissä salaateissa punertuminen oli huomattavasti vähäisempää suhteessa kontrolliin. Lisäksi melatoniinikäsitely vähensi salaatin vaurioitumisesta syntyvien metaboliittien määrää.

Esgandian ja muiden (2025) tutkimuksessa melatoniinikäsitely kohdistettiin leikkokukkiin. Tutkimuksessa leikkokukat käsiteltiin melatoniiniliuosta suihkuttamalla. Käsitely pidensi leikkokukkien kestävyyttä noin 7 vuorokaudella.

5.2 Melatoniini kasvinsuojeluaineena

Muuttuva ilmasto on lisännyt kasveja vaurioittavien patogeenien määrää (Chen ja muut 2019; Feng ja muut 2022). Eksogeeninen melatoniini aktivoi kasvin puolustusmekanismeja säätelemällä erinäisiä sisäisiä mekanismeja, kuten pentoosifostaattitietä sekä hormonien synteisiä. Melatoniinin ominaisuudet tekevät siitä potentiaalisen kasvinsuojeluaineen, joka mahdollistaa sen toimisen vaihtoehtona perinteisille kasvinsuojeluaineille, kuten herbisideille (Feng ja muut 2022; Park ja muut 2013).

Chen ja muiden (2019) tutkimuksessa käsiteltiin melatoniinikäsitelyn vaikutusta omenassa ilmenevään apple stem grooving-virusta (*ASVG*) vastaan. Kyseinen virus vaikuttaa myös

muihin hedelmäpuihin, kuten sitrukseen, sekä koristekasveihin. Omenan versojen käsittely laski merkittävästi infektioriskiä. Altistaessa virukselle käsitellyistä versoista 95 % ei infektoitunut, kontrolliryhmän versoista kaikki infektoituivat. Lisäksi käsittely tehosti endogeenisen auksiinin, IAA (*indoli-3-asetiinihappo*) synteesiä.

Park ja muiden (2023) tutkimuksessa kehitettiin transgeenisiä, melatoniinirikkaita riisikasveja. Tutkimuksessa perehdyttiin tehostuneen melatoniinituotannon vaikutuksiin kasvin puolustusmekanismeissa. Tutkimus tuotti lupaavia tuloksia ja riisikasvien todettiin olevan resistenttejä yleisille herbisideille.

5.3 Mahdollisuudet metsänhoidossa

Metsien hyvinvointia uhkaavat ilmastonmuutos, metsähakkuut, maaperän suolaantuminen ja teollisuuden tuottamat ilmansaasteet (Darshan ja muut 2023).

Tutkimustietoa melatoniinin mahdollisuuksista metsänhoidosta on vielä suhteellisen vähän, mutta sitä pidetään tärkeänä tutkimuskohteena (Darshan ja muut 2023). Yksittäisiä puulajeja koskevissa tutkimuksissa on havaittu eksogeenisen melatoniinin lisäävän sietokykyä erilaisille taudeille, tuholaisille ja suolastressille. Mahdollisuudet metsänhoidossa keskittyvätkin tällä hetkellä erityisesti puiden puolustuksen vahvistamiseen. Melatoniinissa hyvänä ominaisuutena on se, että se voidaan annostella puille maaperään kasteluveden seassa tai suihkuttamalla.

Yang ja muiden tutkimuksessa (2020) melatoniin lisäys kumipuun siemeniin sai kasvaneessa puussa aikaan paremman vasteen suolastressiä vastaan. Tämä vaste tehosti kumipuiden kasvua istutuksen jälkeen suhteessa kontrolliin.

Aroalueiden puiden kestävyyttä käsittelevässä tutkimuksessa melatoniinin todettiin edesauttavan kylmien ja kuivien olosuhteiden aiheuttaman stressin sietoa (Çelik ja muut 2023). Tutkimuksessa melatoniinia suihkutettiin suoraan neulasiin sekä taimien juuret kastettiin melatoniinia sisältävään liuokseen. Tavoitteena oli erityisesti edistää metsitystä kuivilla, puolikuivilla sekä ihmisen muokkaamilla aroalueilla. Molempien käsittelyjen tuloksena melatoniini lisäsi taimien kasvua erityisesti matalilla pitoisuuksilla käsiteltynä.

6 Yhteenveto

Tutkimustieto melatoniinin hyödyntämisestä biostimulanttina lisääntyy jatkuvasti, ja yhdisteellä on merkittävää potentiaalia maataloudessa ja kasvinsuojelussa.

Melatoniini on kasveissa luonnostaan esiintyvä yhdiste, joka osallistuu muun muassa stressivasteiden säätelyyn, antioksidanttiseen puolustukseen sekä kasvin kasvuun- ja kehitykseen. Vaikutukset perustuvat esimerkiksi reaktiivisten happiradikaalien neutralointiin, sekundäärimetaboliittien biosynteesiin ja geenien ilmentymisen säätelyyn.

Melatoniinia voidaan hyödyntää tehostamaan kasvien selviytymistä, kasvua ja satoisuutta.

Käytännön näkökulmasta melatoniinia voitaisiin hyödyntää lannoitteiden korvaajana, kasvinsuojeluaineena sekä säilöntäaineena. Mikäli melatoniinintuotanto saataisiin käännettyä ympäristöystävällisemmäksi ja kustannustehokkaammaksi, sillä voisi olla merkittävä rooli ruoantuotannon kehittämisessä. Tämän saavuttamiseksi tarvitaan kuitenkin uusien tuotantomenetelmien kehittämistä, kuten mikrobipohjaisia ratkaisuja.

Vaikka tutkimustieto lisääntyy jatkuvasti, tietoa melatoniinin vaikutuksista ei ole tarpeeksi markkinoille saamiseksi.

Tarvitaan syvempää ymmärrystä vaikutusmekanismeista, annostelusta ja ympäristön pitkäaikaisvaikutuksista. On tärkeää selvittää esimerkiksi vaikutukset hedelmien ravintoarvoihin ja vaikutukset ympäröivään maaperään.

Melatoniinilla on mielenkiintoisia sovelluksia kasvinsuojelussa, jonka takia melatoniinia biostimulanttina voitaisiin laajentaa ruoantuotantoa pidemmälle. Erityisen kiinnostavaa on sen mahdollisuudet luonnonsuojelussa ja metsänhoidossa. Melatoniinin stressivastetta vähentävät ja kasvitautien vaikutuksia heikentävät ominaisuudet ovat sellaisia, joita voisi hyödyntää luontokadon hidastamisessa.

Kaikkiaan melatoniinilla on merkittävää potentiaalia biostimulanttina, etenkin tutkimustiedon lisääntyessä.

Lähteet

- Arendt, J. (1998) Melatonin and the pineal gland: Influence on mammalian seasonal and circadian physiology. *Rev Reprod* **3**:13–22.
- Arnao, M B & Hernández-Ruiz, J. (2018) Melatonin and its relationship to plant hormones. *Ann Bot* **121**:195–207.
- Arnao, Marino B. & Hernández-Ruiz, J. (2019) Melatonin as a Chemical Substance or as Phytomelatonin Rich-Extracts for Use as Plant Protector and/or Biostimulant in Accordance with EC Legislation. *Agronomy* **9**:570.
- Azooz, M. M. & Ahmad, P. (2016) *Plant-Environment Interaction: Responses and Approaches to Mitigate Stress*. Newark, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated. Noudettu osoitteesta <http://ebookcentral.proquest.com/lib/kutu/detail.action?docID=4338285>
- Back, K., Tan, D.-X. & Reiter, R. J. (2016) Melatonin biosynthesis in plants: Multiple pathways catalyze tryptophan to melatonin in the cytoplasm or chloroplasts. *J Pineal Res* **61**:426–437.
- Belisle, C. E., Sargent, S. A., Sandoya, G. V., Brecht, J. K., Dai, R., Askey, B., ... Kim, J. (2023) Melatonin reduces pink rib discoloration in wounded lettuce midribs. *Postharvest Biol Technol* **199**:112307.
- Canellas, L. P., Canellas, N. A., Martinez-Balmori, D., Silva, R. M., Rosa, R. C. C. & Olivares, F. L. (2025) Farm-Produced Plant Biostimulant: Case Study with Passion Fruit. *Agronomy* **15**.
- Çelik, E. N. Y., Ayan, S., Özel, H. B., Turfan, N., Yer, B. M. & Abdaloğlu, G. (2023) Effects of Melatonin Applications on Anatolian Black Pine (*Pinus nigra* J. F. Arnold. Subsp. *Pallasiana* (Lamb.) Holmboe) Afforestation Performance in Semi-Arid Areas. *BioResources* **18**:2551–2573.
- Chen, L., Wang, M.-R., Li, J.-W., Feng, C.-H., Cui, Z.-H., Zhao, L. & Wang, Q.-C. (2019) Exogenous application of melatonin improves eradication of apple stem grooving virus from the infected in vitro shoots by shoot tip culture. *Plant Pathol* **68**:997–1006.

- Chittora, D., Parveen, T., Yadav, J., Meena, B. R., Jain, T. & Sharma, K. (2023) Harmful Impact of Synthetic Fertilizers on Growing Agriculture and Environment. *Glob J Pharm Pharm Sci* **11**:1–10.
- Cortes-Montana, D., Bernalte-Garcia, M. J., Palomino-Vasco, M., Serradilla, M. J. & Velardo-Micharet, B. (2024) Effect of preharvest melatonin applications at dusk on quality and bioactive compounds content of early sweet cherries. *J Sci Food Agric* **104**:1583–1590.
- Darshan, K., Harshitha, K. N., Shreedevasena, S., Tailor, A., Bhoi, T. K., Nigam, S. & Kulkarni, N. (2023) Role of Melatonin in Management of Stress Tolerance of Forest Tree Species. Teoksessa R. Kumar, M. A. Altaf, M. K. Lal, & R. K. Tiwari (Toim.), *Melatonin in Plants: A Pleiotropic Molecule for Abiotic Stresses and Pathogen Infection* (s. 177–194). Singapore: Springer Nature.
- Debnath, B., Hussain, M., Irshad, M., Mitra, S., Li, M., Liu, S. & Qiu, D. (2018) Exogenous Melatonin Mitigates Acid Rain Stress to Tomato Plants through Modulation of Leaf Ultrastructure, Photosynthesis and Antioxidant Potential. *Molecules* **23**:388.
- Drobek, M., Fraç, M. & Cybulska, J. (2019) Plant Biostimulants: Importance of the Quality and Yield of Horticultural Crops and the Improvement of Plant Tolerance to Abiotic Stress—A Review. *Agronomy* **9**.
- du Jardin, P. (2015) Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Sci Hortic* **196**:3–14.
- Eghlima, G., Aghamir, F., Hajizadeh, H. S. & Zarbakhsh, S. (2025) Role of melatonin in promoting growth attributes, thymol, rosmarinic acid and biochemical properties in *Thymus vulgaris* L. under water deficiency. *Bmc Plant Biol* **25**:603.
- Esgandian, N. M., Jabbarzadeh, Z. & Darvishzadeh, R. (2025) Integrative effects of melatonin and putrescine on vase life and physiological traits in cut alstroemeria ‘Amatista’. *BMC Plant Biol* **25**:1495.
- Feng, B.-S., Kang, D.-C., Sun, J., Leng, P., Liu, L.-X., Wang, L., ... Liu, Y.-G. (2022) Research on melatonin in fruits and vegetables and the mechanism of exogenous melatonin on postharvest preservation. *Food Biosci* **50**:102196.

- Gao, T., Liu, X., Tan, K., Zhang, D., Zhu, B., Ma, F. & Li, C. (2022) Introducing melatonin to the horticultural industry: Physiological roles, potential applications, and challenges. *Hortic Res* **9**:uhac094.
- Geelen, D., Xu, L. & Stevens, C. V. (2020) *The Chemical Biology of Plant Biostimulants*. Newark, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated. Noudettu osoitteesta <http://ebookcentral.proquest.com/lib/kutu/detail.action?docID=6037683>
- Hardeland, R. (2016) Melatonin in Plants – Diversity of Levels and Multiplicity of Functions. *Front Plant Sci* **7**.
- Huang, B., Chen, Y.-E., Zhao, Y.-Q., Ding, C.-B., Liao, J.-Q., Hu, C., ... Yuan, M. (2019) Exogenous Melatonin Alleviates Oxidative Damages and Protects Photosystem II in Maize Seedlings Under Drought Stress. *Front Plant Sci* **10**.
- Ikram, M., Mehran, M., Rehman, H. ur, Ullah, S., Bakhsh, M. Z. M., Tahira, M., ... Sabagh, A. E. (2024) Mechanistic review of melatonin metabolism and signaling pathways in plants: Biosynthesis, regulation, and roles under abiotic stress. *Plant Stress* **14**:100685.
- Imran, M., Latif Khan, A., Shahzad, R., Aaqil Khan, M., Bilal, S., Khan, A., ... Lee, I.-J. (2021) Exogenous melatonin induces drought stress tolerance by promoting plant growth and antioxidant defence system of soybean plants. *AOB PLANTS* **13**:plab026.
- Karumannil, S., Khan, T. A., Kappachery, S. & Gururani, M. A. (2023) Impact of Exogenous Melatonin Application on Photosynthetic Machinery under Abiotic Stress Conditions. *Plants-Basel* **12**:2948.
- Khan, M., Hussain, A., Yun, B.-W. & Mun, B.-G. (2024) Melatonin: The Multifaceted Molecule in Plant Growth and Defense. *Int J Mol Sci* **25**:6799.
- Khan, M. S. S., Ahmed, S., Ikram, A. ul, Hannan, F., Yasin, M. U., Wang, J., ... Chen, J. (2023) Phyto-melatonin: A key regulator of redox and phytohormones signaling against biotic/abiotic stresses. *Redox Biol* **64**:102805.
- Khatoon, S., Maheshwari, C., Kumari, S., Mahajan, M., Kaur, H., Chaudhary, A. A., ... Khan, M. I. R. (2026) Phyto-melatonin and secondary metabolites: Operative strategies to induce plant abiotic stress tolerance. *Plant Stress* **19**:101178.

- Korkmaz, A., Sözeri, E., Ardiç, Ş. K. & Havan, A. (2023) 2-hydroxymelatonin (2-OHM), a major melatonin metabolite, confers multiple stress tolerance in pepper at seed germination stage. *South Afr J Bot* **162**:830–837.
- López-Patiño, M. A., Gesto, M., Conde-Sieira, M., Soengas, J. L. & Míguez, J. M. (2014) Stress inhibition of melatonin synthesis in the pineal organ of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) is mediated by cortisol. *J Exp Biol* **217**:1407–1416.
- Martyniuk, K., Hanuszewska, M. & Lewczuk, B. (2020) Metabolism of Melatonin Synthesis-Related Indoles in the Turkey Pineal Organ and Its Modification by Monochromatic Light. *Int J Mol Sci* **21**:9750.
- Muhammad, I., Fahad, S., Khalofah, A., Zheng, B. & Shen, W. (2025a) Melatonin Enhances Antioxidant Defense Systems and Stress Tolerance in Plants under Variable Environmental Conditions. *Rice* **18**:70.
- Muhammad, I., Fahad, S., Khalofah, A., Zheng, B. & Shen, W. (2025b) Melatonin Enhances Antioxidant Defense Systems and Stress Tolerance in Plants under Variable Environmental Conditions. *Rice* **18**:70.
- Park, S., Lee, D.-E., Jang, H., Byeon, Y., Kim, Y.-S. & Back, K. (2013) Melatonin-rich transgenic rice plants exhibit resistance to herbicide-induced oxidative stress. *J Pineal Res* **54**:258–263.
- PBS-Phytomel | phytomelatonin. <https://www.pbs-phytomel.com/> (Luettu 27.1.2026)
- Promyou, S., Raruang, Y. & Chen, Z.-Y. (2023) Melatonin Treatment of Strawberry Fruit during Storage Extends Its Post-Harvest Quality and Reduces Infection Caused by *Botrytis cinerea*. *Foods* **12**.
- Reiter, R. J., Tan, D.-X., Zhou, Z., Cruz, M. H. C., Fuentes-Broto, L. & Galano, A. (2015) Phytomelatonin: Assisting Plants to Survive and Thrive. *Molecules* **20**:7396–7437.
- Rezaei, M. & Liu, B. (2017) Food loss and waste in the food supply chain.
- Samoylov, A. V., Suraeva, N. M., Zaytseva, M. V. & Petrov, A. N. (2021) Bioassay-Based Assessment of Food Preservatives' Toxic Effects. *Russ Agric Sci* **47**:536–540.
- Savci, S. (2012) Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. *APCBEE Procedia* **1**:287–292.

- Sliwiak, J., Sikorski, M. & Jaskolski, M. (2018) PR-10 proteins as potential mediators of melatonin-cytokinin cross-talk in plants: Crystallographic studies of LIPR-10.2B isoform from yellow lupine. *FEBS J* **285**:1907–1922.
- Wang, K., Xing, Q., Ahammed, G. J. & Zhou, J. (2022) Functions and prospects of melatonin in plant growth, yield, and quality. *J Exp Bot* **73**:5928–5946.
- Weeda, S., Zhang, N., Zhao, X., Ndip, G., Guo, Y., Buck, G. A., ... Ren, S. (2014) Arabidopsis transcriptome analysis reveals key roles of melatonin in plant defense systems. *PloS One* **9**:e93462.
- Wei, J., Li, D.-X., Zhang, J.-R., Shan, C., Rengel, Z., Song, Z.-B. & Chen, Q. (2018) Phytomelatonin receptor PMTR1-mediated signaling regulates stomatal closure in *Arabidopsis thaliana*. *J Pineal Res* **65**:e12500.
- Wheeler, T. & von Braun, J. (2013) Climate change impacts on global food security. *Science* **341**:508–513.
- Yakhin, O. I., Lubyantsev, A. A., Yakhin, I. A. & Brown, P. H. (2017) Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective. *Front Plant Sci* **7**:2049.
- Ye, J., Yang, W., Li, Y., Wang, S., Yin, L. & Deng, X. (2020) Seed Pre-Soaking with Melatonin Improves Wheat Yield by Delaying Leaf Senescence and Promoting Root Development. *Agronomy* **10**:84.
- Yu, Y., Lv, Y., Shi, Y., Li, T., Chen, Y., Zhao, D. & Zhao, Z. (2018) The Role of Phyto-Melatonin and Related Metabolites in Response to Stress. *Molecules* **23**.
- Zeng, W., Mostafa, S., Lu, Z. & Jin, B. (2022) Melatonin-Mediated Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Front Plant Sci* **13**.
- Zhang, X., Zhu, W., Liu, Z., Ren, X., Li, Y., Li, G., ... Sun, H. (2025) Transcriptomic analysis of melatonin-mediated drought stress response genes in alfalfa during germination period. *BMC Plant Biol* **25**:637.

Zheng, X., Tan, D. X., Allan, A. C., Zuo, B., Zhao, Y., Reiter, R. J., ... Kong, J. (2017) Chloroplastic biosynthesis of melatonin and its involvement in protection of plants from salt stress. *Sci Rep* 7:41236.