

POLYTIOFEENIPOHJAISET ORGAANISET AURINKOKENNOT

LuK-tutkielma

Materiaaliekemian

Laatija:

Petter Civill

Ohjaaja(t):

dosentti, kestävän kehityksen materiaalien kemia Mikko Salomäki

5.10.2025

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidatututkielma / Pro gradu -tutkielma / Lisensiaatintutkielma

Oppiaine: Kemia

Tekijä(t): Petter Civill

Otsikko: POLYTIOFEENIPOHJAISET ORGAANISET AURINKOKENNOT

Ohjaaja(t): titteli Mikko Salomäki

Sivumäärä: 14 sivua

Päivämäärä: 5.10.2025

Abstrakti: Polytiofeenipohjaiset orgaaniset aurinkokennot (PTSC) ovat tällä hetkellä yksi lupaavimmista vaihtoehdoista piipohjaisille aurinkokennoille. PTSC materiaalit ovat halpoja ja on mahdollista valmistaa isoja kennoja helposti ja kiinnittää niitä jopa taipuisalle substraatille. Polytiofeenipohjaiset orgaaniset aurinkokennot ovat kehittyneet paljon, mutta kaupallisten sovellusten kehittämiseksi, on tutkittava ja parannettava PTSC:iden ominaisuuksia. Polytiofeeni toimii näissä kennoissa donorina ja absorboi auringon valoa. Polytiofeeniin kiinnitettävien lisäryhmien avulla voidaan parantaa polymeerin auringonvalon absorptiokykyä. Absorption seurauksena virittynyt elektroni siirtyy akseptorille, joka kuljettaa varauksen katodille. Akseptorina toimii jokin elektronirikas rakenne, kuten esimerkiksi fullereenijohdannainen. Varauksen kuljetuksessa on tärkeää aktiivisen kerroksen morfologia.

Morfologiaan vaikuttaa polytiofeeniin kiinnittyneet ryhmät ja akseptorin ominaisuudet. Akseptori ja donori eivät saa sekoittua liian hyvin keskenään, jotta muodostuu donori- ja akseptoripesäkkeitä. Esimerkiksi poly (3-heksyyli tiofeenin) (P3HT) liiallinen sekoittuminen donoriin haittaa varauksenkuljetusta.

Tutkielmassa keskitytään tarkemmin aurinkokennojen toimintaperiaatteeseen ja erilaisten polytiofeenijohdannaisten kehitykseen orgaanisia aurinkokennoja varten.

Avainsanat: polytiofeeni, orgaaninen aurinkokenno

Sisällysluettelo

1. Johdanto	04
2. Aurinkokennon toimintaperiaate	04
2.1 Kennojen kerrokset ja materiaalit.....	05
3. Vyövälit, HOMO, LUMO ja näiden tärkeys aurinkokennon toiminnassa.....	08
4. Polytiofeenipohjaisten aurinkokennojen morfologia.....	08
4.1 Liuottimen vaikutus morfologiaan.....	08
4.2 Jälkikäsittely ja lisäaineet.....	09
5. Polytiofeenin ja donorin fluoraus.....	09
6. Huomioon otettavia asioita ja ongelmia polytiofeenikennojen kehityksessä ja valmistuksessa	11
7. Johtopäätökset ja yhteenveto	12
9. Viiteluettelo	13

Käytetyt lyhenteet selityksineen

PCE – Power conversion efficiency

OSC – Organic solar cell

PT – polytiofeeni

P3HT – poly 3-heksyylitiofeeni

PEDOT – poly (3,4-etylenidioksitiofeeni)

BHJ – Bulk heterojunction

HOMO – Highest occupied molecular orbital

LUMO – Lowest unoccupied molecular orbital

ETL – Elektronikuljetuskerros

ETH – Elektroniaukonkuljetuskerros

1. Johdanto

Aurinkoenergia ovat tärkeä uusiutuvan energian muoto ja aurinkoenergiaan liittyviin ongelmiin etsitään ratkaisuja paraikaa kovaa tahtia. Akkuteknologian kehittyessä aurinkoenergian talteenotto tehostuu, joten on tärkeä kehittää halpoja ja tehokkaita aurinkokennomateriaaleja. Tällä hetkellä yleisimmät aurinkokennot ovat epäorgaaniset piipohjaiset aurinkokennot. Piipohjaisilla aurinkokennoilla on kuitenkin omat haasteensa.

Orgaanisia materiaaleja aurinkokennoihin on tutkittu jo pitkään. Yksi lupaavimmista vaihtoehtoisista materiaaleista piipohjaisten aurinkokennojen tilalle on polytiofeeni ja sen johdannaiset. Orgaanisten tiofeenipohjaisten aurinkokennojen etuina on halpa hinta, valmistusprosessit, joiden avulla voidaan valmistaa suuriakin aurinkokennoja nopeasti. Aktiivinen tiofeenikerros voidaan helposti kiinnittää myös taipuisan substraatin päälle ja siihen voidaan sekoittaa väriaineita, jotka lisäävät niiden mahdollisia käyttökohteita.¹ Toisaalta tiofeenipohjaisilla aurinkokennoilla ovat omat haasteensa, kuten alhaisempi elinikä ja tehokkuus piipohjaisiin aurinkokennoihin verrattuna. Tässä kirjoitelmassa kerron yleisesti aurinkokennojen toimintaperiaatteesta, polytiofeenipohjaisten orgaanisten aurinkokennojen materiaaleista, valmistuksesta ja asioita, joita täytyy ottaa huomioon näitä kehitettäessä.

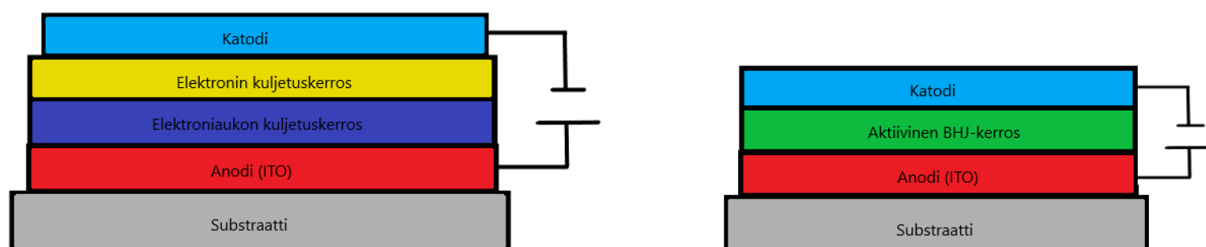
2. Aurinkokennon toimintaperiaate

Aurinkokennon absorboidessa auringonvaloa, kennon aktiivisessa kerroksessa virittyy elektroni. Virittynyt elektroni palaisi normaalisti takaisin alkuperäiseen tilaansa, mutta aurinkokennon ominaisuuksien ansiosta elektroni kulkee anodille. Virittyneen elektronin alkuperäiseen paikkaan jää elektroniaukko ja tämä kulkee anodille. Katodille kulkenut elektroni kulkee ulkoista johdinta pitkin anodille, jolloin elektroni on kulkenut virtapiiriin läpi. Aurinkokennon kaksi tärkeää ominaisuutta ovat siis auringonvalon absorptio ja virittyneen elektronin kuljetus.²

Aurinkokennorakenteita on kolmea erilaista. Yksikerroksisia, kaksikerroksisia ja BHJ aurinkokennoja. Yksikerroksisissa aurinkokennoissa virittyminen ja elektronin kuljetus tapahtuu yhdessä kerroksessa, joka muodostuu yhdestä materiaalista. Kaksikerroksisessa aurinkokennossa, anodin puoleinen kerros eli elektroniaukon kuljetuskerros absorboi auringon valoa. Katodin puoleinen kerros vastaanottaa elektronin ja kuljettaa varauksen katodille. Aktiivinen virittyminen tapahtuu siis näiden kahden kerroksen rajapinnassa.²

Tässä tutkielmassa kuitenkin keskityn kuitenkin BHJ (bulk heterojunction) kennoihin. BHJ kennoissa elektronin virittyminen, luovutus ja kuljetus tapahtuu yhdessä ja samassa kerroksessa. Kennoihin voidaan kuitenkin lisätä elektroninkuljetuskerros (ETL) ja elektroniaukonkuljetuskerros (ETH), joka tehostaa kennon ominaisuuksia^{2,3}. BHJ kennoissa akseptori ja donori ovat seostettuna keskenään, jolloin aktiivinen pinta-ala kasvaa kaksikerroksiseen kennoon verrattuna.²

Orgaanisissa polytiofeenipohjaisissa aurinkokennoissa polytiofeenipolymeerin johdannainen toimii donorina.

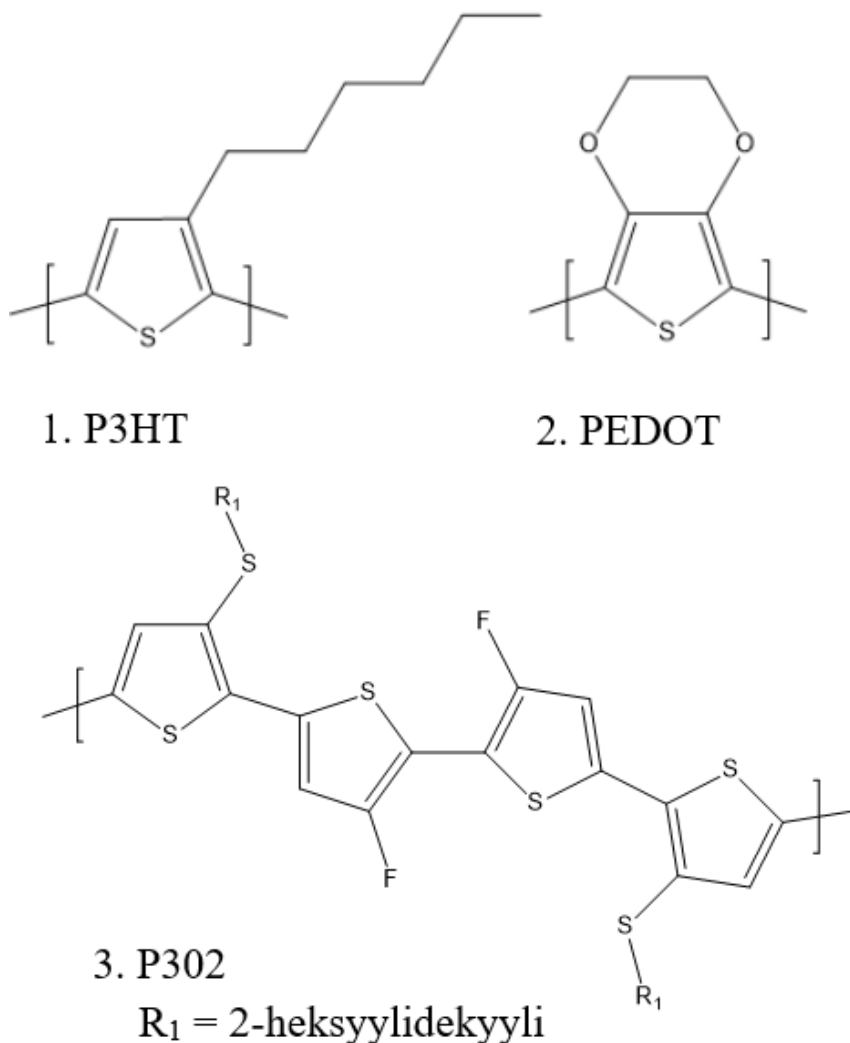


Kuva 1: Vasemmalla puolella on kaksikerroksisen kennon malli. Elektroniaukon kuljetuskerros toimii donorina ja elektronin kuljetuskerros akseptorina. Kaksikerroksisessa kennossa elektronin virittyminen tapahtuu kahden kerroksen rajapinnassa. Oikealla on BHJ kennon malli. BHJ kennossa akseptori ja donori ovat samassa kerroksessa seostettuna, jolloin aktiivinen pinta-ala kasvaa.²

2.1 Kennojen kerrokset ja materiaalit

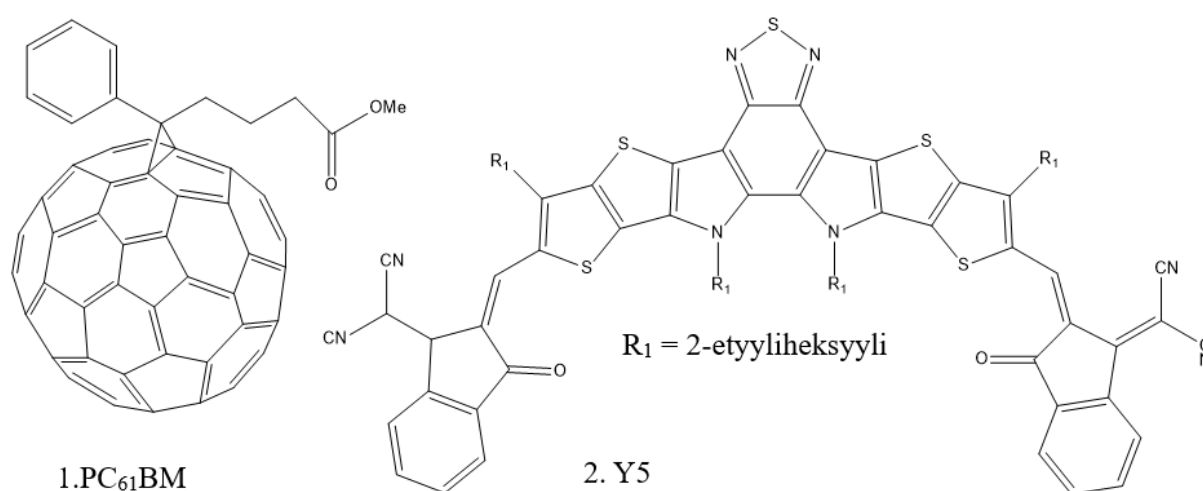
Aurinkokennon substraattina voi toimia lasi tai jokin taipuisa polymeeri. Substraatin pinnassa on johtava ITO-kerros (indiumtinaoksidi), joka toimii anodina^{1,2}. Orgaanisissa polytiofeenipohjaisissa aurinkokennoissa donorina toimii jonkinlainen polytiofeeni. Pelkkä polytiofeeni on kuitenkin

ominaisuuksiltaan huono aurinkokennon donoriksi, koska itsenäään se ei absorboi auringon valoa tehokkaasti (auringonvalon fotonivuon piikki on n. 700 nm, kun taas P3HT absorptiopiikki on n. 650 nm) ja sen valenssivyön ja johtavuusvyön väli (vyöväli) on korkea. Muokkaamalla tiofeenimonomeerin sivuketjuja, saadaan aikaan donori, jonka elektronit virittyvät tehokkaammin auringon valon seurauksena. Liitetyt sivuketjut kuitenkin luovat steerisen esteen, joka vaikuttaa aktiivisen kerroksen morfologiaan.¹



Kuva 2: Kuvassa 3 erilaista tiofeenipohjaista donoripolymeeriä. Numero 1 on P3HT, eli poly (3-heksyyli tiofeeni). Numero 2 on PEDOT, eli poly(3,4-etyleenidioksiteiofeeni). Numero 3 on nimeltään P302⁴. P302 hyödyntää fluoria, joka stabilisoi polytiofeenin rakennetta ja luo vakaamman planaarisin konformaation⁴.

Virittyvän donorin lisäksi BHJ kenno vaatii varauksen vastaanottajan eli akseptorin. Akseptori vastaanottaa virittyneen varauksen ja kuljettaa varauksen katodille. Hyvä akseptori johtaa hyvin sähköä ja muodostaa donorin kanssa rakenteen eli morfologian, joka mahdollistaa varauksen kuljetuksen katodille. Akseptoreina polytiofeenipohjaisissa aurinkokennoissa on tutkittu useita erilaisia fullereenijohdannaisia. Fullereeniakseptorit kuitenkin liukenevat huonosti yleisiin liuottimiin, absorboivat huonosti näkyvää valoa ja tehokas morfologia vaativat jälkikäsitelyä⁵⁶. Fullereenittomat akseptorit (NFA, nonfullerene acceptor) ovat nousseet tutkimuksen kohteiksi. NFA:iden avulla on saavutettu fullereenipohjaisiin akseptoreihin verrattuna erittäin korkeita tehosuhteita⁴. Akseptori voi myös täydentää donorin absorptioaluetta⁴.



Kuva 3: Numerolla 1 on merkitty PC₆₁BM akseptori, joka on fullereenipohjainen akseptori². Numerolla 2 merkitty akseptori on nimeltään Y5⁴. Tämä on NFA eli fullereeniton akseptori⁴.

Kennoihin voidaan lisätä myös elektronikuljetuskerros eli ETL, joka tehostaa elektronien kuljetusta katodille. ETL materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi ZnO ja LiF kerroksia.^{2,3} ZnO-kerroksen pinta saattaa kuitenkin sisältää elektroniansoja³. Lisäämällä grafeenipohjainen C₆₀-SAM-kerros elektronien kulku ETL:n läpi paranee ja täten koko kennon teho paranee³.

Katodina voidaan käyttää jonkinlaista negatiivista elektroodia, kuten alumiini-, magnesium- tai kalsiumelektroodia.²

3. Vyöväli, HOMO, LUMO ja näiden tärkeys aurinkokennon toiminnassa

Valenssivyöhön ja johtavuusvyöhön kuuluu useita eri energiatasoja, mutta ne on helpompi jakaa HOMO:on (highest occupied molecular orbital) ja LUMO:on (lowest unoccupied molecular orbital). Näiden kahden orbitaalin energiatasoa kutsutaan vyöväliksi.

Kuten jo aiemmin mainitsin, auringonvalon fotonivuon piikki on 700 nm, joka vastaa noin 1,77 eV. Tämä sama 1,77 eV vyöväli on optimaalinen johdepolymeerin virittymiseen. Itse polytiofeenin vyöväli on ~ 2 eV, joten sitä täytyy muokata pienemmäksi aurinkokennon tehokasta toimintaa varten. Vyöväliä voidaan muokata nostamalla donorin HOMO:a tai laskemalla sen LUMO:a. Donorin ja akseptorin LUMO:n energiatasojen eron (Δ_{LUMO}) tulisi olla kuitenkin noin 0,3 ja 0,5 eV:n välillä.²

Tämänhetkisten tutkimusten mukaan yksi tehokas tapa muokata vyöväliä on kehittää donori-akseptori kopolymeeri, jossa varauksenkuljetus tapahtuu molekyylin sisäisesti.² On kuitenkin onnistuttu valmistamaan orgaanisiin aurinkokennoihin (OSC) verrattuna tehokkaita aurinkokennoja ilman kopolymeeri arkkitehtuuria. Eräs tällainen polytiofeenijohdannainen on päässyt jopa yli 12 % energianmuutos tehoon (power conversion efficiency, PCE)³.

4. Polytiofeenipohjaisten aurinkokennojen morfologia

Polytiofeenipohjaisten aurinkokennojen morfologia eli rakenne, jonka polytiofeenidonori ja akseptori muodostavat keskenään. Optimaalinen morfologia lisää akseptorin ja donorin välistä aktiivista pintaa ja parantaa varauksenkuljetusta donorin ja anodin välillä sekä akseptorin ja katodin välillä.

Chan et al tukivat donorin ja akseptorien määrien suhteiden vaikutusta kennon tehoon ja morfologiaan. He valmistivat P3HT:C₆₀ kennoja eri donori-akseptori suhteilla. Kenno, jossa oli 20 % C₆₀ akseptoria seassa massan mukaan mitattuna, pääsi 2,54 % tehosuhteeseen. Tämä oli kokeen korkein.

Atomivoimamikroskoopilla tarkastellussa rakenteessa näkyi selviä polymeerikuituja akseptorikohtien välissä. Muilla suhteilla akseptorit ja donorit muodostivat keskenään liian paljon tai liian vähän sekoittuneita pesäkkeitä.⁵ Tästä voi päätellä, että donorin ja akseptorin liiallinen tai liian vähäinen keskenäinen sekoittuminen vähentää donorin ja akseptorin välistä rajapintaa ja täten vähentää aurinkokennon tehokkuutta^{2,3}.

4.1 Liuottimen vaikutus morfologiaan

Oikean liuottimen valinta on erittäin tärkeää polytiofeenikennoa valmistettaessa. Yksi tapa valmistaa polytiofeenikennoja on liuottaa polytiofeenidonori ja akseptori keskenään johonkin liuottimeen ja

pinnoittaa substraatti liuksella¹. Liuottimen haihtuessa pois, akseptori ja donori järjestäytyvät jonkinlaiseen morfologiaan².

Liuottimen valinnalla on merkitys kennon morfologiaan ja täten tehosuhteeseen. Klooribentseeni, diklooribentseeni, kloroformi ja ksyleeni ovat yleisiä käytettyjä liuottimia polytiofeenikenttien valmistuksessa. Liuottimia voidaan myös sekoittaa keskenään. Oikean liuottimen valinta on tärkeää, koska tehosuhte saattaa olla jopa 3 kertaa suurempi hyvää liuotinta käytettäessä.² Donoria ja akseptoria kehitettäessä on hyvä ottaa huomioon, että onko se luontoystävällinen ja sopii valmistuksessa käytettävä liuotin suuren mittakaavan valmistukseen. Esimerkiksi kloroformi ei ole suotuisa liuotin massatuotantoon³. Olisi myös hyvä välttää halogenoituja liuottimia, jotta terveysvaikutukset ja jätehuollon kustannukset olisivat mahdollisimman alhaisia.

4.2 Jälkikäsitteily ja lisäaineet

Polytiofeenikenttien jälkikäsitteily eli hehkutuksella voi olla iso vaikutus aurinkokennon toimintaan. Hehkutustapoja on 2 erilaista: lämpö- ja liuotinhöyryhehkutus. Liuotinhöyryhehkutuksessa valmistettu kennokalvo laitetaan suljettuun astiaan, jossa se on kosketuksessa valitun liuottimen höyryjen kanssa tietyn ajan.² Lämpökäsittelyssä kennokalvoa lämmitetään esim. 55-80°C lämpötilassa². Varsinkin amorfisten johdepolymeerien sähkönjohtavuuskyky paranee lämpökäsittelyn jälkeen¹. Hehkutusaika voi vaihdella sekunneista useisiin kymmeneen minuutteihin^{2,7}. Liiallinen ja liian vähäinen hehkutusaika johtavat alhaisempiin tehosuhteisiin^{2,7}.

Kennoja valmistettaessa, liuottimen sekaan voidaan myös lisätä lisäaineita, jotta kennon ominaisuudet paranisivat. 1,8-Oktaanidioli ja 1,8-diiido-oktaani tehostivat kennon toimintaa tietyissä kennoissa. Alkaaniditiolien on todettu liuottavan fullereenia ja se pysyy kennossa pidempään klooribentseeniin verrattuna korkeamman kiehumislämpötilansa takia, joten se vaikuttaa kennon morfologian muodostumiseen.

Hyvänä esimerkkinä lisäaineiden vaikutuksesta on P4T2F-HD:Y6-BO-kennoja difenyylietteri. Xiao et al. lisäsivät kennon valmistuksessa käytetyn o-ksyleenin sekaan pienen määrän difenyylietteriä, jolloin tehosuhte kohosi 11,62 %:sta jopa 12,18%:n.³

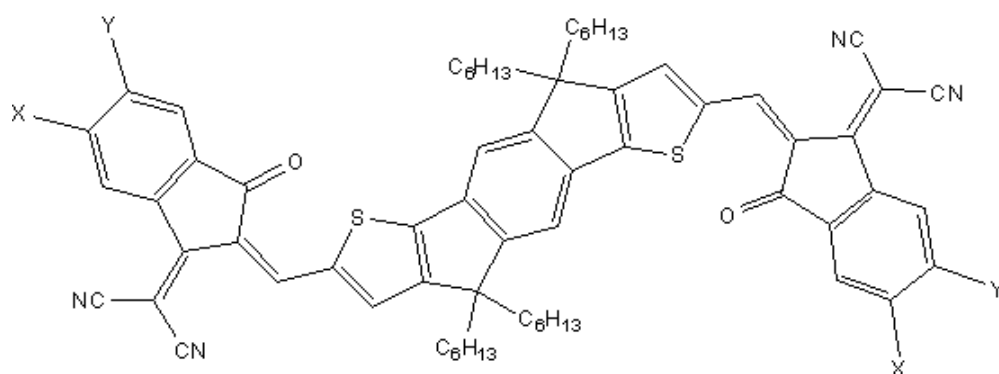
5. Polytiofeenin ja donorin fluoraus

Polytiofeenirangan fluoraus on osoittautunut tehokkaaksi strategiaksi parantamaan polytiofeenaurinkokennojen ominaisuuksia. Polytiofeenijohdannaisen fluoraaminen alentaa donorin HOMO:a^{3,4,8}. Lisäksi, fluorin molekyylien sisäisen elektroneja vetävä vuorovaikutus ja fluorin molekyylien väliset vuorovaikutukset parantavat polymeerin planaarisuutta^{4,9}. Fluorin aiheuttama

steerinen este on myös mitätön, joten se ei haittaa ja fluoraaminen saattaa jopa aiheuttaa molekyylien pakkaantumista^{4,7}. Polytiofeenin fluoraaminen myös vähensi tämän sekoittumista akseptorien kanssa, jolloin muodostui parempi morfologia, joka paransi kennon varauksenkuljetusominaisuuksia^{3,4}.

Eräs esimerkki fluorin vaikutuksesta on Yang et al. tutkimat P301 ja P302 (kuva 2) donorit yhdessä Y5 akseptorin (kuva 3) kanssa. P301 on fluoraamaton ja P302 on fluorattu versio samasta molekyylistä. P302 oli parempi kuljettamaan elektroneja ja elektroniaukkoja. Lisäksi P302 kennossa tapahtui vähemmän elektronien rekombinaatiota. Fluori vähensi donorin ja akseptorin väliseen sekoittumista ja muodosti suotuisamman morfologian. Tehosuhte P301 kennolla oli 2,33 % ja P302 kennolla 9,65 %. Donorin fluoraamisella oli siis merkittävä vaikutus kennon tehokkuuteen⁴.

Myös akseptorin fluoraus voi parantaa polytiofeenikennon ominaisuuksia. Liang et al. tutkimuksen mukaan donorina toimiva polytiofeenijohdannainen PDCBT-Cl ja fullereeniton akseptori IDIC muodostivat paremman aurinkokennoparin, kun IDIC:n kiinnitettiin 2 tai 4 fluoria kuvan 4 mukaisesti. PDCBT:Cl:n ja IDIC:n välinen sekoittumiskyky on alhainen. Akseptorin fluoraamisen ja lämpökäsittelyn jälkeen donorin ja akseptorin sekoittuminen kasvoi, jolloin halutut ominaisuudet kuten valon absorptio, varauksenkuljetus paranivat ja kenno kesti paremmin säilytystä.⁷

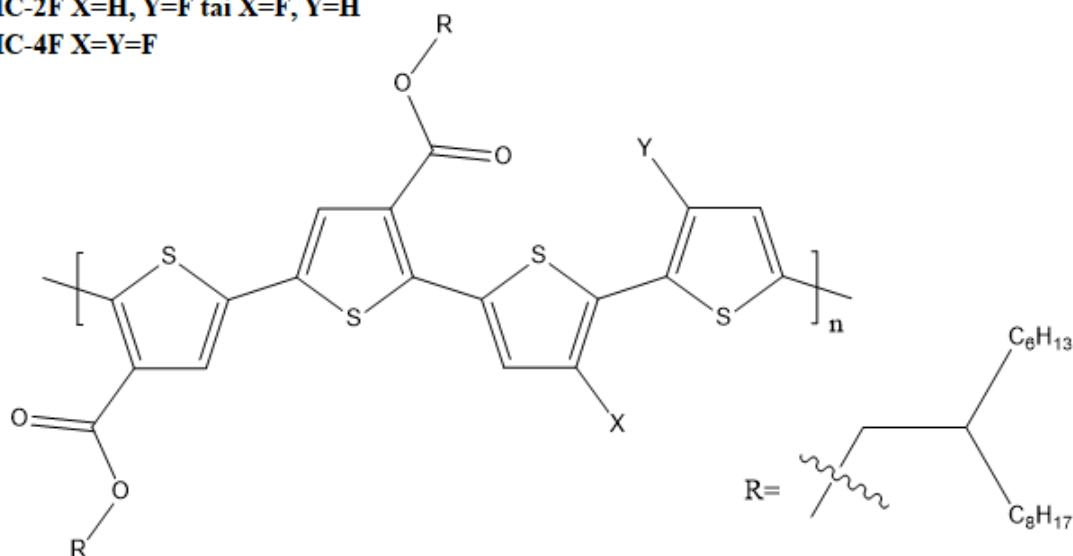


Akseptori IDIC ja sen fluoratut muunnokset

IDIC X ja Y=H

IDIC-2F X=H, Y=F tai X=F, Y=H

IDIC-4F X=Y=F



Donori PDCBT-Cl

X=Cl, Y=H tai X=H, Y=Cl

Kuva 4: Akseptori IDIC ja sen 2F ja 4F muunnokset. IDIC ja PDCBT-Cl eivät sekoitu keskenään tarpeeksi hyvin, jotta varauksenkuljetus tapahtuisi tehokkaasti, joten fluoraaminen ja tämän jälkeinen lämpökäsittely parantaa kennon tehokkuutta.⁷

6. Huomioon otettavia asioita ja ongelmia polytiofeenikenttien kehityksessä ja valmistuksessa

Jotta polytiofeenipohjaiset aurinkokennot olisivat kilpailukykyisiä nykyisin käytettyjen aurinkokennojen kanssa, useita polytiofeenipohjaisten aurinkokennojen ominaisuuksia täytyy vielä parantaa^{1,3}. Tällä hetkellä on saavutettu jo yli 13 % tehosuhteita ja tämä lupaa hyvää käytännön sovelluksille³. Tämä on kuitenkin alhainen verrattuna kilpaileviin piipohjaisiin kennomalleihin, jotka ovat saavuttaneet jopa 24 % tehosuhteen^{1,3}.

Toinen tärkeä kehityksen kohde on kennojen elinikä. Tällä hetkellä kennojen arvioitu elinikä on noin 1000 tuntia¹. Jotta polytiofeenipohjaiset kennot voitaisiin ottaa käyttöön käytännön sovelluksissa, täytyisi niiden eliniän olla yli viisi vuotta¹. Valo, happi ja kosteus ovat kolme asiaa, jotka tutkitusti aiheuttavat pysyviä vaurioita P3HT kennoissa varsinkin lämpimissä olosuhteissa¹. Jo aikaisemmin mainittu Xiao et al. tutkimaan P4T2F-HD:Y6-BO kennoa voitiin säilyttää hapettomassa ja valottomassa olosuhteissa 3000 tuntia säilyttäen 98 % alkuperäisestä tehosuhteestaan³. Kyseisen kenno säilytti myös yli 85 % alkuperäisestä tehosuhteestaan 300 tunnin jälkeen 85 °C lämpötilassa³.

Valmistukseen liittyviä asioitakin on useita. Käytetyin valmistustapa kennoille on pyörimispinnoitus (spin coating)¹. Tämä valmistustapa ei kuitenkaan sovellu isoille aurinkokennoille¹. Lisäksi liuottimen tulisi olla luontoystävällinen, kuten esimerkiksi jokin halogeeniton liuotin³. Liuottimen tulisi sopia myös teollisen mittakaavan tuotantoon, kuten esimerkiksi o-ksyleeni³.

Polytiofeenikennon donorin ja akseptorin synteessin monimutkaisuus on tärkeä pitää mielessä, jotta tuotantokustannukset pysyvät alhaisina. P3HT:n kennojen valmistus on erittäin yksinkertaista, mutta tällä hetkellä niiden alhainen tehosuhte sulkee ne pois käytännön sovelluksista.³

7. Johtopäätökset ja yhteenveto

Polytiofeenijohdannaisten aurinkokennojen BHJ-kerros sisältää johdepolymeerin, joka on jonkin sortin polytiofeeni. Tämä polytiofeeni absorboi valoa, jonka seurauksena virittyy elektroni. Virittynyt elektroni siirtyy akseptorille, samalla jättäen paikalleen elektroniaukon. Virittynyt elektroni kulkee siten akseptorin kautta katodille ja johdinta pitkin anodille, jonka jälkeen elektroni täyttää anodille kulkeneen elektroniaukon.² On siis tärkeää, että polytiofeenidonorin elektronit virittyvät auringon valon seurauksena ja että virittynyt elektroni ei purkaudu, vaan se siirtyy akseptorille.

Elektronin tehokasta kulkua voidaan donorilta katodille voidaan parantaa monin erilaisin keinoin. Donorin ja akseptorin Δ_{LUMO} :n täytyy olla alhainen, jotta energiaa ei mene hukkaan². Lisäksi donorin ja akseptorin täytyy muodostaa pesäkkeitä, joissa näiden kahden välinen rajapinta on suuri². Samalla, akseptorin täytyy muodostaa varausta tehokkaasti kuljettava rakenne². Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä yhteensopivaa donoria ja akseptoria². Donorin polytiofeenirankaan voidaan liittää lisäryhmiä, jotka parantavat sen ominaisuuksia^{3,10}. Donorin fluoraaminen on yksi tärkeä tapa vähentää donorin ja akseptorin sekoittumista, jolloin kennon morfologia paranee ja varauksenkuljetus tehostuu^{7,9}.

Morfologiaa voidaan myös muokata jälkikäsitellyllä ja lisäaineilla. Lämpökäsittely parantaa amorfisten johdepolymeerien morfologiaa. Liuotinhöyrykäsittelyssä kennokalvon annetaan olla suljetussa astiassa liuotinhöyryn kanssa, jolloin kennomateriaali järjestäytyy halutunlaiseen morfologiaan. Kennokalvon valmistuksessa voidaan käyttää lisäaineita, jotka myös parantavat morfologiaa.²

Mielestäni on erittäin tärkeää kehittää orgaanisten aurinkokennojen materiaaleja siihen pisteeseen, että on mahdollista hyödyntää näitä ympäri maailman. Sähkön tuotannon luonnon kuormitusta voitaisiin vähentää huomattavasti, jos fossiilisille sähköntuotannon tavoille olisi halpa vaihtoehto. Tämä olisi myös alhaisen kynnyksen vaihtoehto vähentämään saastuttavia energiantuotantotapoja paikoissa, joissa esimerkiksi ydinenergia ei poliittisista tai muista syistä ole kelpo vaihtoehto kivihiiivoimaloille.

Suurimmat haasteet orgaanisissa polytiofeenipohjaisissa aurinkokennoissa vaikuttaa olevan alhaiset tehosuhteet ja kennojen lyhyt elinikä. Näitä vikoja voidaan joissain määrin oikaista fluoraamalla polytiofeenirankaa ja kehittämällä uusia akseptoreja. Olisi mahtavaa löytää jokin luontoystävällisempi vaihtoehto fluoraamiselle ja yksinkertaisesti syntetisoitava ja tehokas akseptori ja donori. Näissä ominaisuuksissa on orgaanisten aurinkokennojen kehityksessä vielä pitkä matka.

Viiteluettelo

1. Mehmood U, Al-Ahmed A, Hussein IA. Review on recent advances in polythiophene based photovoltaic devices. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;57:550-561.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.177>
2. R. Murad A, Iraqi A, Aziz SB, N. Abdullah S, Brza MA. Conducting Polymers for Optoelectronic Devices and Organic Solar Cells: A Review. *Polymers (Basel)*. 2020;12(11).
doi:10.3390/polym12112627
3. Xiao J, Jia X, Duan C, Huang F, Yip H-L, Cao Y. Surpassing 13% Efficiency for

- Polythiophene Organic Solar Cells Processed from Nonhalogenated Solvent. *Adv Mater.* 2021;33(25). doi:10.1002/adma.202008158
4. Yang C, Zhang S, Ren J, Bi P, Yuan X, Hou J. Fluorination strategy enables greatly improved performance for organic solar cells based on polythiophene derivatives. *Chinese Chem Lett = 中国化学快报(英文版)*. 2021;32(7):2274-2278. doi:10.1016/j.ccllet.2021.03.006
 5. Chan S-H, Lai C-S, Chen H-L, Ting C, Chen C-P. Highly Efficient P3HT: C60 Solar Cell Free of Annealing Process. *Macromolecules*. 2011;44(22):8886-8891. doi:10.1021/ma201425d
 6. Yang C, Zhang S, Hou J. Low-cost and efficient organic solar cells based on polythiophene- and poly(thiophene vinylene)-related donors. *Aggregate*. Published online September 4, 2021. doi:10.1002/AGT2.111
 7. Liang Z, Gao M, Zhang B, et al. Fluorination Enables Tunable Molecular Interaction and Photovoltaic Performance in Non-Fullerene Solar Cells Based on Ester-Substituted Polythiophene. *Front Chem*. 2021;9.
 8. Sun C, Pan F, Chen S, et al. Achieving Fast Charge Separation and Low Nonradiative Recombination Loss by Rational Fluorination for High-Efficiency Polymer Solar Cells. *Adv Mater*. 2019;31(52). doi:10.1002/adma.201905480
 9. Jiao N, He D, Qian L, Lei Z, Ding L. Lock-up function of fluorine enhances photovoltaic performance of polythiophene. *Sci China*. 2017;60(2):251-256.
 10. Hou J, Inganäs O, Friend RH, Gao F. Organic solar cells based on non-fullerene acceptors. *Nat Mater*. 2018;17(2):119-128. doi:10.1038/nmat5063