TARTU ÜLIKOOL

Loodus ja tehnoloogiateaduskond

Eksperimentaalfüüsika ja tehnoloogia instituut

Priit Priimägi

**Polüetüleen/polüetüleenoksiid kopolümeeri (PE/PEO) ja LiPF6 elektrolüüdi MD simuleerimine**

Bakalaureusetöö

Juhendajad: PhD Heiki Kasemägi

PhD Alvo Aabloo

Tartu 2009

### SISUKORD

[SISUKORD 2](#_Toc229233512)

[1. SISSEJUHATUS 3](#_Toc229233513)

[1.1 Arvutil simuleerimine 3](#_Toc229233514)

[1.2 Tahked polümeersed elektrolüüdid 5](#_Toc229233515)

[1.3 Polüetüleenoksiid (PEO) 6](#_Toc229233516)

[2. ÜLEVAADE PROBLEEMIST 8](#_Toc229233517)

[3. METOODIKA 10](#_Toc229233518)

[3.1 Uuritava süsteemi kirjeldus 10](#_Toc229233519)

[3.2 Simulatsioonide parameetrid 12](#_Toc229233520)

[3.2.1 Programmid ja simulatsiooni tingimused 12](#_Toc229233521)

[3.2.2 Aatomite sidemed ja nurgad 14](#_Toc229233522)

[3.2.3 Dihedraalnurgad 15](#_Toc229233523)

[3.2.4 Van der Waalsi jõud 16](#_Toc229233524)

[4. TULEMUSTE ANALÜÜS 18](#_Toc229233525)

[4.1 Süsteemi tihedus 18](#_Toc229233526)

[4.2 Koordinatsioon 19](#_Toc229233527)

[4.3 Li+ koordinatsioonide statistika 21](#_Toc229233528)

[4.4 MSD 24](#_Toc229233529)

[6. KOKKUVÕTE 26](#_Toc229233530)

[8. SUMMARY 30](#_Toc229233531)

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1 Arvutil simuleerimine

Loodusteadus on olulisel kohal füüsikaliste ning keemiliste protsesside, nähtuste ja materjalide uurimisel, samuti uute materjalide loomisel paljudes valdkondades alates ravimitööstusest lõpetades autotööstuseni. Materjalide väljatöötamine, edasiarendamine puhtalt eksperimentaalselt, tähendaks suuri ajalisi ja rahalisi kulutusi, seega sellises töös arvuti simulatsioonid on suureks abiks ja nende roll on aina kasvav. Tänu tormakale arvutusressursside juurdekasvule ja uute efektiivsete tarkvaraprogrammide paralleelsel kombineerimisel edasiarenenud materjalide teadaolevate omadustega, on meil avatud uus võimalus, tundma õppida uuritavate materjalide struktuure, samuti füüsikalis- keemilisi protsesse, seest poolt ja isegi aatomi tasandil [[1](#G)], [[2](#O)]. Arvuti simulatsioonide abil saame numbriliselt kontrollida, kas katseandmetel tuginev ülesehitatud simuleerimissüsteem on piisavalt täpne, selgitada materjalide katses ilmnenud omadusi ja näha ette uusi võimalikke efekte, mida saaks tulevastes katsetes reaalselt kontrollida.

Materjalide uurimiseks kasutatakse peamiselt molekulaar- dünaamilisi simulatsioone , mis on üheks võimsaimaks tööriistaks, lubades uurida mikroskoopilis-dünaamilisi käitumisi ja mehhanisme mitmesugustes keerulistes süsteemides [[3](#L)]. Molekulaar-dünaamika (MD), mis kirjeldab osakeste liikumist molekulaarsüsteemis ning mis võimaldab uurida struktuuri või selle ajalist muutust, kasutab klassikalisi liikumisvõrrandeid (Newtoni seadusi) ja töötab nii suuremõõtmelistes simulatsioonirakkudes kui ka pikkades aja-skaalades ,. (MD) kasulikuks küljeks ongi, suutlikkus simuleerida kergesti mahukaid süsteeme, mis sisaldavad rohkem kui 103 aatomit, mõnel juhtumil isegi 106 aatomit, vastavalt ajaskaalale sada kuni paar nanosekundit [[4](#N)].

Arvuti simulatsioonide jaoks mudeli ülesehitamisel on tihtipeale vaja lihtsustada uuritavaid keerulisi süsteem, mistõttu simulatsioonide tulemuste täpsus sõltubki algandmete ja koostatud mudeli täpsusest. Tuleb silmas pidada ka mudeli lisamõjurite tähtsust, väline elektri- ja magnetväli, temperatuur, rõhk, millest sõltub suuresti süsteemi käitumine simulatsioonis. Simulatsioonide läbiviimine tähendab pidevat väljund andmete kontrolli, et uuritavas süsteemis ei jääks märkamata molekulide suured struktuurilised muutused, sidemete kiired pöörded. Kasuks tuleb ka piiratud parameetritega mitmekordselt jooksutada süsteemi algstaadiumit, veendumaks, et algandmed oleksid õiged ning simulatsiooni kulg loogiline.

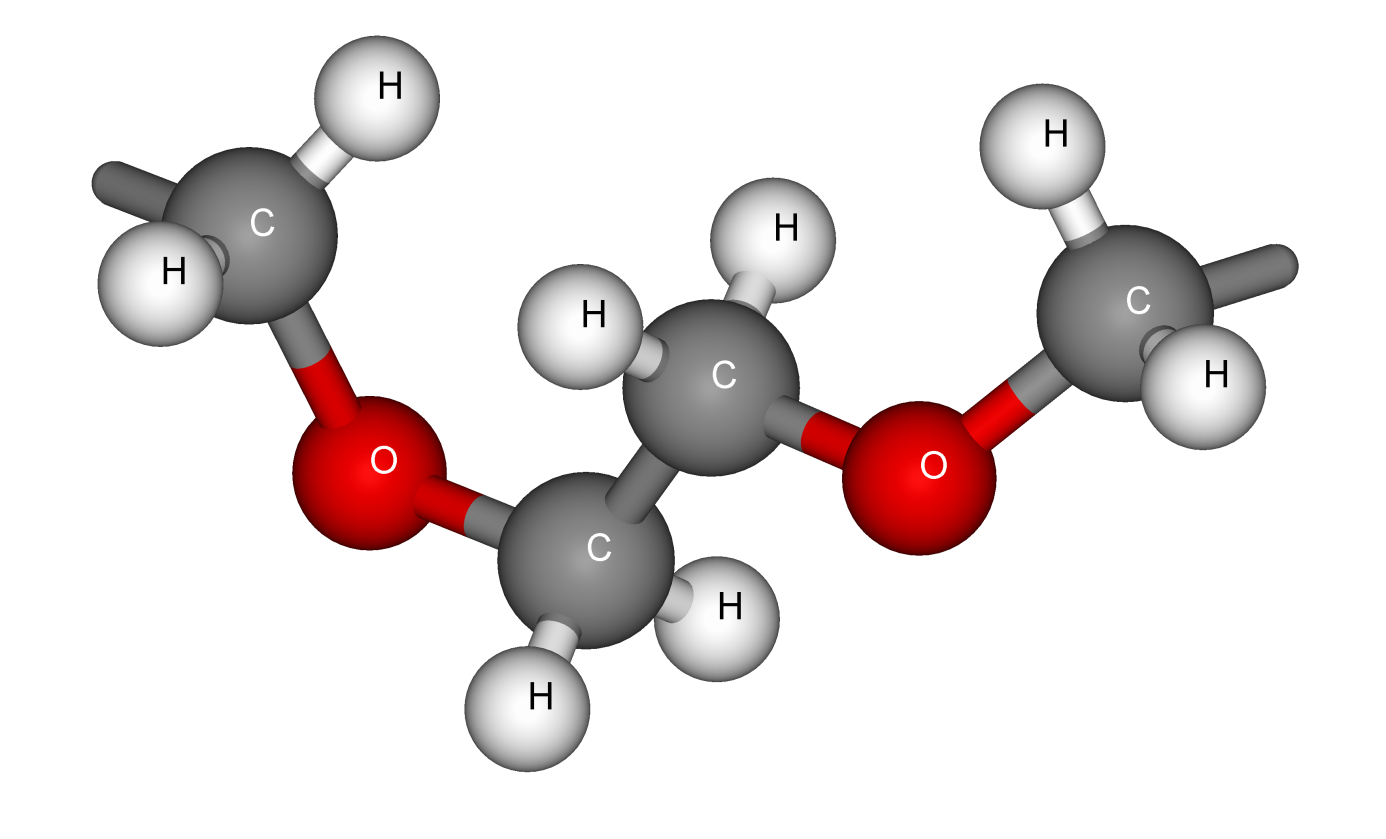
Kuna materjalide kasutajad ja tootjad huvituvad enamasti makroskoopilisest omadustest tuleb, väga täpne mikroskoopiline simuleerimine teha suuremas ruumiosas. Selleks kasutatakse korduv tsüklilist kuubikujulist rakku, mille külje pikkus ulatub mitmekümne ongströmini ja piisavat ajaskaalat, mille järgi võiks otsustada makroskoopilisi nähtusis. Seega andmed on mahukad ning selle simuleerimiseks vajatakse palju ressurssi. Tänapäevaste arvutusvõimsuste juures, kus piisavaks protsessorite arvuks, paralleelse töö juures võib lugeda 32, võtaks mitme tuhande aatomilise simulatsiooniraku saja nanosekundi simuleerimine, ligikaudu 10 päeva reaalset arvutusaega. Keskeltläbi paaripäevaliste arvutuste tulemusena saame edukaid tulemusandmeid, mille maht võib küündida gigabaidini, juhul kui oleme suutnud terve protsessi juures vältida näpuvigu.

## 1.2 Tahked polümeersed elektrolüüdid

Üheks energia valdkonna probleemseks kohaks on selle salvestamine. Järjest rohkem energiat soovitakse mahutada järjest väiksemasse ruumalasse, seetõttu peale ruumala suurendamise, ei paista vedelik elektrolüütidel põhinevatel akudel, enam erilist arenguruumi. Suurteks puudusteks eelnimetatud energia allikatel võib lugeda ka piiratud töötemperatuuri vahemikku, elektroodide korrosiooni ja madalat vettpidavat hermeetilisust [[5](#A)]. Et elimineerida või vähendada antud probleeme, on võimalus asendada sellised elektrolüüdid, mõnede sobivate tahkete ioon-juhtivate materjalidega. Enamik uurimuslikke jõupingutusi on hetkel tehtud just selliste materjalide väljatöötamiseks, mida oleks võimalik kasutada taaslaetavates akudes. 1990 - te lõpust saadik on toodetud suurosa liitium akusid, millede elektrolüüdid koosnevad mitmesugustest polümeeridest ja Li+ - sooladest [[5](#A)]. Ainult vähesed poolkristalsed polümeerid, milles esineb ahel difusioon nii kristallilises kui ka amorfses piirkonnas, on näiteks polüetüleen, polüetüleenoksiid jne[[6](#S)]. Idee kasutada liikuvate osakestena liitiumi sooli, tuli sellest, et antud metall on võrreldes teistega, kõige kergem ning kui kasutada vastavat anoodi, mis on kontaktis sellise elektrolüüdiga, võime saavutada väga kõrge energiatihedusega allika. Selliseid liitiumi lahendusel põhinevaid polümeerseid elektrolüüte võibki nimetada tahketeks elektrolüütideks, mida iseloomustab arvestatav kiire ioonjuhtivus σ ≥ 10-4 S cm-1 toa temperatuuril, mis on ligilähedale vedelik elektrolüütide ioon juhtivusele [[7](#B)]. Sellised uut tüüpi elektrolüüdid on kõrgema keemilise stabiilsusega ning laiema töötemperatuuri piirkonnaga. Eelisteks võib välja tuua ka kõrge mehaanilise tugevuse, mistõttu suuremõõtmeliste polümeersete elektrolüütide tootmine võiks olla reaalne. Tänapäeval püütaksegi välja töötada paremate eelnimetatud omadustega õhukesi elektrolüüt kilesid, mida oleks võimalik painutada, rullida või voltida, et tõsta kokkupuutepindala elektroodidega. Just sellistel tehnoloogiatel põhinevaid taaslaetavaid akusid toodetakse suures mahus, mida kasutatakse laias valikus mobiiltelefonides ja sülearvutites ning uurimuse all olevad elektrolüüdid võiksid ka olla tulevikus kasutusel elektriliste sõidukite energiaallikates.

## 1.3 Polüetüleenoksiid (PEO)

Paljudes ettekannetes, polümeer-elektrolüütide kohta, kirjanduses, on kõige enam uuritud neid, mis sisaldavad polüetüleenoksiidi, lihtsate anorgaaniliste sooladega, nagu näiteks leelismetalli halogeeniidid , . Põhjenduseks võib välja tuua PEO omased olulised kriteeriumid, polaarne polümeer hea liitiumi liikuvuse jaoks ning suur molekulaarne raskus tagamaks mehaanilist stabiilsust . Suureks ja raskeks polümeeriks teevad polüetüleenoksiidi, (CH2–O–CH2) korduvad ahelad (joonis1), millest on tingitud ka tema iseloomulikud omadused.



Joonis1: Polüetüleenoksiidi kaks järjestikust korduvat ahelat (EO)2

Polüetüleenoksiidi polümeer algab ja lõppeb vastava korduva ahelaga, kus otsmisele süsinikule on lisatud üks hapniku aatom. Korduvaid ühikuid on kasutatud vastavalt struktuursetele vajadusele kümnest kuni sajani, mille juures tuleb silmas pidada ka soola ja polüetüleenihapniku (OPEO) aatomite kindlat vahekorda. Suhteliselt kontsentreerituks vahekorraks võib pidada P(EO)8 ning lahjaks vahekorraks P(EO)31 ühele anioonile näiteks PF6 .

PEO kasutati ka esimestes tahkete elektrolüütide katsetes, mis näitasid toatemperatuuril aga madalat ioonjuhtivust, suurusjärgus σ ≈ 10-8 S×cm-1 . Toatemperatuuriga võrreldes on PEO elektrolüüdi kristalliseerumis temperatuur madalam, ning sulamis temperatuur kõrgem. Mitmed laborid on põhjalikult uurinud PEO-l põhinevaid tahkeid elektrolüüte, just tema madala kristalliseerumis temperatuuri ( Tk ≈ -60 oC ) pärast ning tema võimest dissotsieerida metalli sooli , . Täpsemalt võib öelda, et PEO on heterogeenne tavatemperatuuril, koosnedes, kristallilistest PEO-soola piirkondadest ning amorfsetest piirkondadest, mis sisaldavad mõningaid lahustatud soolasid. Seetõttu on täheldatud mitmeid PEO- soola süsteeme , millede ioone juhtivus ilmneb peamiselt amorfsetes piirkondades. Kuumutades polümeeri 100 oC lähedale, hakkab oluliselt suurenema ioonide juhtivus ( σ ≈ 10-4 S×cm-1), mis on tingitud kristallilise piirkonna sulamisest [C]12. Arvatakse, et selline sooli lahustav ja liitium katioone kordineeriv omadus amorfsel PEO-l tuleb tema kindla järjestusega struktuurist, hapniku aatomite mahtuvusest ja polaarsetest gruppidest: -O-, -H-, -C-H-, polümeeri ahelas , . Liikuvad PEO ahelad keerduvad ümber Li+-iooni, hoides eraldi neid anioonidest, samas lubades elektriväljal Li+-ioone edasi kanda. Selline käitume tuleb Li+-ioonidest, mis moodustavad sidemeid ahela hapniku aatomitega, mida täheldati juba esimestel arvutustel .

# 2. ÜLEVAADE PROBLEEMIST

Tahkete elektrolüütidega taaslaetavad akud, nimelt Liitium ioon akud on palju tõotavad jõuallikad, mida kasutatakse laias valikus elektroonikas [[12](#D)]. Vaatamata tahkete elektrolüütide headele külgedele, kõrge elektrokeemiline stabiilsus, madal tuleohtlikkus, nõrgale toksilisusele, heale kokkusobivusele elektroodidega, on tõendeid nende madalast juhtivusest toa temperatuuril ning madalast liitiumi liikuvusest [[13](#J)]. Seetõttu materjalide edasiarendamiseks, täiustamiseks tehtud väga paljud uurimustööd, on üldjuhul keskendunud kahele põhilisele punktile 1) ioon juhtivuse parandamine polümeer- Li soola kompleksis, toatemperatuuril 2) uudse või modifitseeritud elektroodi välja töötamine, mis annaks parema kokkusobivuse tahke polümeerse elektrolüüdiga [[12](#D)]. Paremate nimetatud omaduste saamiseks vajame fundamentaalseid teadmisi ioon juhtivate, kristalliliste struktuuridega, tahkiste kohta, erinevatel temperatuuridel ja rõhkudel. Polümeeride kristallstruktuuri ja tema omaduste vaheliste seoste kätte saamisel võime väga edukalt täiendada eksisteerivaid polümeerseid materjale ja välja töötada uusi [[3](#L)]. Eelnimetatud kergmetalli ja polümeeri aatomite interaktsioonide kohta võime saada teavet, kui võrdleme omavahel olemasolevaid ning uusi väljatöötatud erinevate struktuuridega polümeeri ja metalli soolade komplekside ioonijuhtivusi. On tehtud mitmeid jõupingutusi, et tõstes kristallilise faasi osakaalu toa temperatuuril elektrolüüdis, suureneks samas ka tema iooniline juhtivus. Sellisteks meetmeteks on kasutada elektrolüütides kopolümeere või lisanditena plastifikaatoreid ja nanoosakesi [[11](#C)]. Seega on välja töötatud väga palju erinevaid polümeeri-soolade komplekse, kus antud süsteemid võib suuremalt jaolt jagada kolme klassi 1) kuivad polümeersed elektrolüüdid 2) geelpolümeer elektrolüüdid 3) komposiit elektrolüüdid , kus kõigil esinevad oma tugevad ja nõrgad küljed.

1. Tavalised polümeer soola kompleksid või kuivad tahked polümeersed elektrolüüdid. Antud klassi tuntuimad esindajad on raske molekulaarse kaaluga polüetüleenoksiid (PEO) ja polüpropüleenoksiid (PPO) kompleksitud erinevate Li+ iooni sooladega. [[5](#A)]. Uurimustöödes on enamasti käsitletud soola anioonidena ClO4, BF4 ning PF6, mida ka antud töö juures kasutatakse. Praktiseeritav elektrolüüdi ioonjuhtivuse väärtus σ ≥ 10-4 S cm-1 , polümeer-soola kompleksides: PEO : LiX puhul on kerge saavutatav temperatuurivahemikus 70 -90 oC. Kõrgel temperatuuril on ka paremat ioonjuhtivust saavutatud just kasutades madalamat soolade sisaldust, kuna liitiumi soola kontsentratsiooni tõstes on täheldatud, et nende liikuvus väheneb [[5](#A)]. Toatemperatuuril aga antud teemas käsitletavate elektrolüütide ioonjuhtivus norme ei rahulda, ning jätkub uute polümeeride struktuuride edasiarendamine, kus üks võimalike suundi oleks kopolümeerid.
2. Geelpolümeer-elektrolüüdid või plastiliseeritud polümeer-elektrolüüdid, mis oma olekult on vedeliku ja tahkise vahepealsed, omades seega mõlemaid nii tahkistele kui vedelikele iseloomulikke omadusi [[7](#B)]. Selline duaalne karakteristik muudab geelelektrolüüdid unikaalseks ning nende märkimisväärne ioonjuhtivuse kasv temperatuuri tõustes, võiks viidata antud juhul amorfse faasi osakaalu tõusule [[14](#M)].

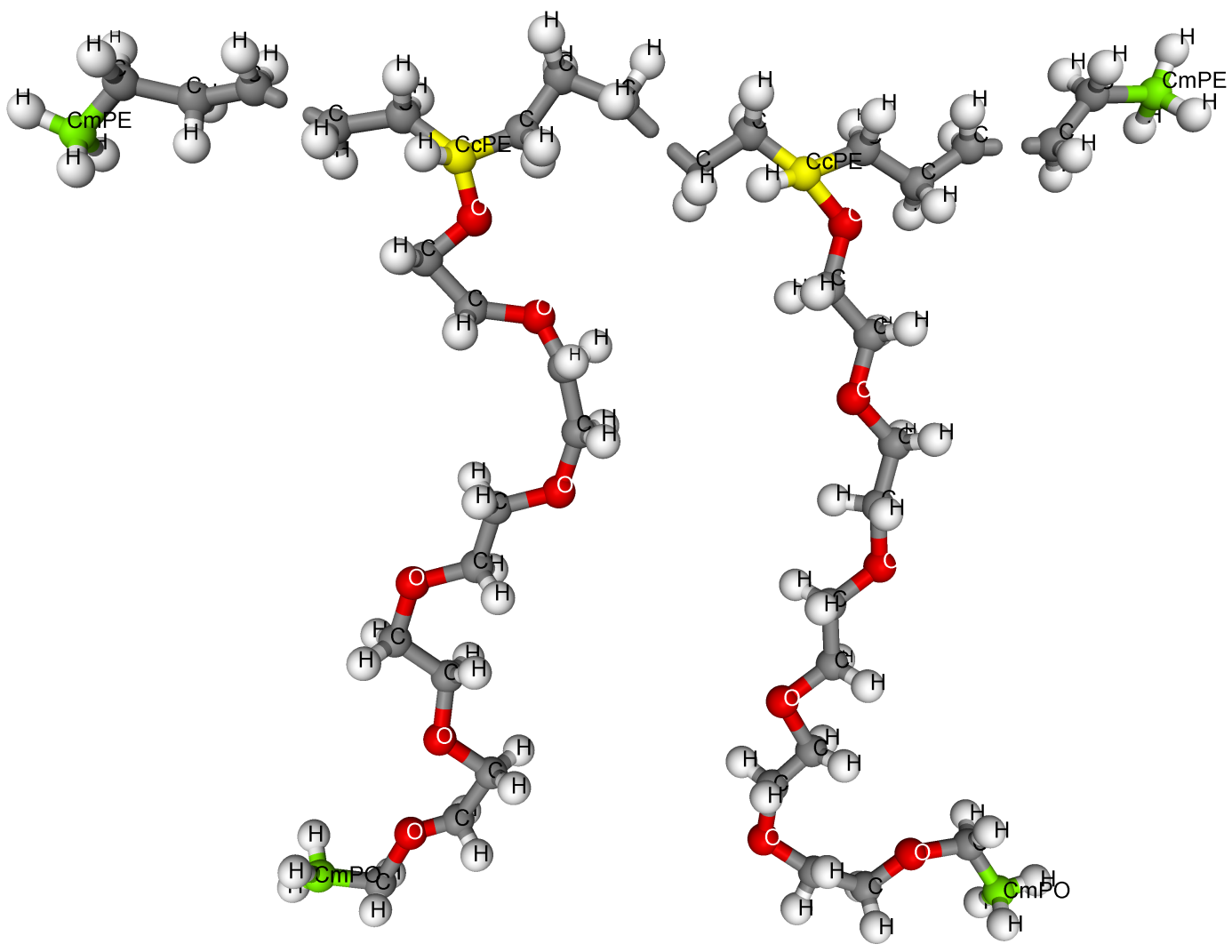
Polüetüleenoksiidil põhinevatel geelelektrolüütidel on juba toatemperatuuridel iseloomulik väga kõrge ioonjuhtivus σ~10-3 S cm-1, mis küündib lähedale vedelik elektrolüütide ioonjuhtivusele. Siiski miinuseks on antud tüüpi polümeeride madalam mehaaniline tugevus, mis takistab suuremõõtmeliste elektrolüütide tootmist. Probleemi ära hoidmiseks või vähendamiseks, oleks võimalus lisada komponente, mis võiksid polümeeride vahel moodustada ristsidemeid. Kuna geelelektrolüüdid muudavad ka liitium elektroodide pinnad ebapüsivaks on nende kasutamine taaslaetavates akudes piiratud [[5](#A)].

1. Komposiit polümeer elektrolüüdid. Tegemist on tahkete polümeersete elektrolüütidega milles on hajutatult nano/mikro täiendavad osakesed SiO2, Al2O3, TiO2, enamasti inertsest keraamilisest materjalist [[11](#C)]. Näiteks SiO2 osakesed võivad olla nii kristallilises kui amorfses faasis, siiski vähem tähelepanu on pööratud amorfsele olekule ning teadmine struktuurist ja omadustest on piiratud [[15](#I)]. Katselised uurimused SiO2 interaktsioonide kohta polümeeri ja liitiumiga aatomi tasandil on raskendatud ning sellistel puhkudel on suureks abiks molekulaardünaamilised simulatsioonid. Tulemused on näidanud, et komposiit osakestega polümeeri süsteemides, nanoosakesed tõstavad liitiumi liikuvust aga liitiumi soolad kaovad lihtsamalt polümeeride sõrestikku, ning seetõttu ka elektrolüüdi juhtivus väheneb. Põhjenduseks võib tuua anorgaanilistele osakestele omase madala ioonilise juhtivuse, kuna mõned neist on isegi isolaatorid, ning juhtivus nanokomposiit elektrolüütidel jääb alla vajaliku, et võtta viimaseid kommertsiaalseks kasutuseks [[16](#H)].

# 3. METOODIKA

## 3.1 Uuritava süsteemi kirjeldus

Kopolümeerid koosnevad enamast, kui ühest monomeerist (ABABAB), mis on omavahel ühendatud kovalentse sidemega. [[17](#F)]. Antud töös kasutasime kopolümeeri, kus polüetüleenoksiid on kõrvalahelateks ning peaahela moodustab polüetüleen (PE), mille monomeeriks on (-CH2CH2-) ja mis lõppeb kolme vesinikuga ühendatud süsinikuga. PE sobib peaahelaks kuna ta on üks lihtsaima ehitusega poolkristalle, mida polümeeri struktuurides laialt kasutatakse [[6](#S)]. Polüetüleeni külge on kõrvalahelad kinnitatud kindlate vahemaade tagant, asendades peaahela süsiniku küljes oleva ühe vesiniku, kõrvalahela hapnikuga (Joonis2).



Joonis 2: Uuritava kopolümeeri peaahela otsad ning kaks kõrvalahelaga korduvat ühikut.

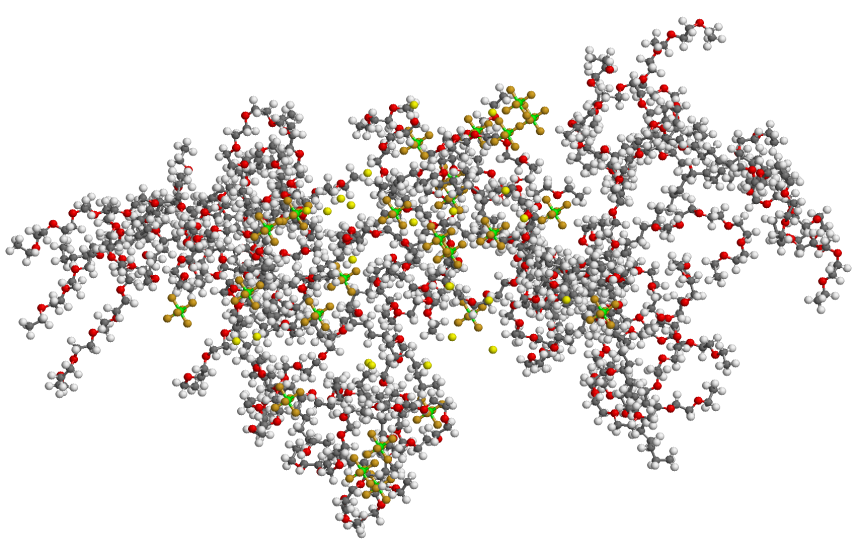
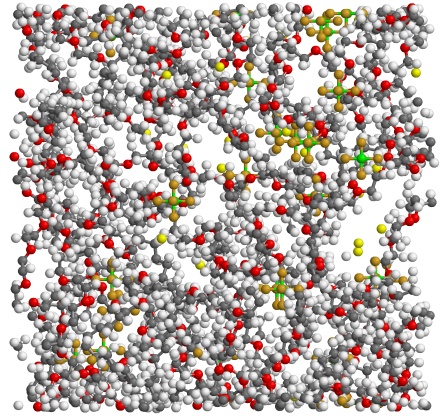
Kõrvalahela pikkuseks on 6 polüetüleenoksiidi monomeeri ning kõrvalahelad on seotud iga kuuenda peaahela polüetüleeni süsiniku külge. Sellisel viisil saame etteantud termodünaamilises olekus, kindla morfoloogia, mida on võimalik muuta erinevate polümeeride ruumilise osakaaluga [[17](#F)]. Kopolümeeri täpsemaks ülesehitamiseks ning kõrvalahelate kineetika jälgimiseks, tähistasime kopolümeeri süsinikud eraldi, kõrvalahelal CPEO, mille otsas on CmPEO, peaahela süsinikud CPE, mille otstes on CmPE ja peaahelat ja kõrvalahelaid ühendavad süsinikud CcPE. Vesinikud nimetati peaahelal ja kõrvalahelatel vastavalt HPE ja HPEO ning polüetüleenoksiidi hapnik OPEO.

Uurimaks sellise struktuurilise ülesehitusega kopolümeeride mõju liitiumi liikuvusele, kasutasime simuleerimiseks kolme erineva pikkusega kopolümeere kahel temperatuuril 293 K ja 353 K. Pika peaahelaga kopolümeeri süsteemis on molekulaar-dünaamilises simulatsioonirakus, küljepikkusega 40 Å, 30 liitiumi katiooni, 30 PF6 aniooni ning üks kopolümeer, millel on 60 kõrvalahelat. Keskmise pikkusega peaahela süsteemis on sama suures simulatsioonirakus 2 kopolümeeri, mõlemal 30 kõrvalahelat, koos 30 liitiumi katiooni ning 30 PF6 aniooniga. Lühikeste kopolümeeridega süsteem koosneb viiest 10 kõrvalahelaga kopolümeerist, 25 liitiumi katioonist ning 25 PF6 anioonist. Seega tuleb kõigis kolmes uuritavas süsteemis, kahe kõrvalahela kohta üks liitiumi katioon ning üks PF6 anioon, ehk hapniku aatomite ja soola anioonide suhteks 12. Pika ahelaga kopolümeeri molekulaarmassiks tuleb 21008 amü, kesmise pikkusega kopolümeeril 10554 amü ja lühikesel 3585 amü.

## 3.2 Simulatsioonide parameetrid

### 3.2.1 Programmid ja simulatsiooni tingimused

Molekulaar-dünaamiliseks simulatsiooniks kasutati programmi *DL\_POLY 2*, mis on arendatud välja W. Smith´i, M. Leslie´i and T. R. Forester´i poolt, Daresbury laboratooriumis [[18](#V)]. *DL\_POLY 2* arvutab kolme mõõtmelises perioodilises simulatsioonirakus polümeeri aatomite uued kordinaadid, liikumiskiirused ja aatomitele mõjuvad jõud. Alustuseks vajatakse ühe kindla ajahetkega algmudelit, mis ei muutuks koguenergialt ja nurkadelt oluliselt simulatsiooni algstaadiumis. Selliste algmudelite madalama energiaga ahelate konfiguratsiooni genereerimiseks kasutati GNU üldise avaliku litsentsi alla kuuluvat *mcgen* programmi, mille autoriteks on Heiki Kasemägi, Endel Soolo, Alvo Aabloo, ja Josh Thomas [[19](#AA)].

Joonised 3,4: Viis lühikeste peaahelatega kopolümeeri ja 25 Li+ja PF6- genereeritud ning simulatsiooniboksi paigutatud kujul.

Simulatsiooniboksi paigutatud algmudelit, kõigis kolmes süsteemis, simuleeriti alustuseks 2 ns (NVT) ansambliga, kus osakeste arv N, ruumala V ja temperatuur T hoitakse konstantse-na. 2 ns on piisav aeg, et toimuksid vajalikud struktuuri energiate fluktuatsioonid, kus muutumatu ruumala võiks ära hoida kollapseerumise. Peale (NVT) järgnes 20 ns simulatsiooni ansambliga (NPT) temperatuuriga 293 K , kus võrreldes eelnevaga lasti ruumala vabaks ning rõhku hoiti barostaadiga, mille ajategur on 0.3 ps, 1 bar juures. Seejärel järgnes veel 20 ns (NPT) temperatuuriga 353 K, mida kontrollis kõigil juhtudel termostaat ajateguriga 0.1 ps. Simuleerimise sammuks on fs, mis tagab vajaliku arvutustäpsuse ja kasutatud valemite võimalikkuse, kuid andmed kirjutatakse välja iga ps järel, mis annab hea ülevaate simulatsiooni boksis toimuvast.

Uuritava polümeeri aatomite osalaengud ja massid [[20](#a)], mida vajatakse simuleerimisel elektrilise vastastikmõjude arvutamiseks ning kõigi kolme algmudeli genereerimiseks on välja toodud (tabelis 1) koos märkuse all olevate laengute viidetega.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Aatomi tüüp | Mass /*amu* | | Laeng /*e* | Märkused | | |
| CPE | 12.01070 | -0.1620 | | | [[21](#d)] | PE süsinik |
| CcPE | 12.01070 | -0.0810 | | | [[21](#d)] | PE ja PEO siduv süsinik |
| CmPE | 12.01070 | -0.1620 | | | [[21](#d)] | PE metüülrühma süsinik |
| HPE | 1.00794 | 0.0810 | | | [[21](#d)] | PE vesinik |
| HmPE | 1.00794 | 0.0540 | | | [[21](#d)] | PE metüülrühma vesinik |
| HcPE | 1.00794 | 0.0810 | | | [[21](#d)] | Siduva süsiniku vesinik |
| CPEO | 12.01070 | 0.1030 | | | [[22](#c)] | PEO süsinik |
| CmPO | 12.01070 | 0.1032 | | | [[22](#c)] | PEO metüülrühma süsinik |
| OPEO | 15.99940 | -0.3480 | | | [[22](#c)] | PEO hapnik |
| HPEO | 1.00794 | 0.0355 | | | [[22](#c)] | PEO vesinik |
| HmPEO | 1.00794 | 0.0236 | | | [[22](#c)] | PEO metüülrühma vesinik |
| Li | 6.94100 | 1.0000 | | |  | Liitium ioon |
| P | 30.97380 | 1.4000 | | | [[23](#e)] | Fosfor |
| F | 18.99840 | -0.4000 | | | [[23](#e)] | Floor |

Tabel 1: Kopolümeeri ning LiPF6 aatomid, massid ja laengud

### 3.2.2 Aatomite sidemed ja nurgad

Aatomite vahelised sideme- ja nurgapotentsiaalid simulatsioonides, arvutatakse vastavalt järgnevatele valemitele, millele järgneb viide.

[[18](#V)] [[18](#V)]

Valemites *K* on jõukonstant, *r0* sideme pikkus ja *ϴ0* aatomite vaheline nurk ning (tabelis 2) ja (tabelis 3) on välja toodut nende väärtused.

HxPE CxPE juures x tähistab, \_, m ja c ning HyPEO CyPEO juures y tähistab, \_ ja m.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Sideme tüüp | Jõukonstant *K /kcal mol-1* | | Pikkus *r0*  /*Å* | Märkused |
| CPE-CxPE | 620.0 | 1.526 | | [[6](#S)] |
| CxPE-HxPE | 680.0 | 1.09 | | [[6](#S)] |
| CcPE-OPEO | 500.0 | 1.43 | |  |
| CPEO-CyPEO | 505.0 | 1.54 | |  |
| CPEO-OPEO | 500.0 | 1.43 | |  |
| CyPEO-HyPEO | 510.0 | 1.09 | |  |
| P-F | 400.0 | 1.635 | | [[23](#e)] |

Tabel 2: Aatomi sidemete potentsiaaliparameetrid

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Nurga tüüp | Jõukonstant K  /*kcal mol-1 rad-2* | Nurk *ϴ0*  / o | Märkused |
| CPE-CPE-CxPE | 80.0 | 109.50 | [[6](#S)] |
| HPE-CPE-HPE | 70.0 | 109.50 | [[6](#S)] |
| HPE-CPE-CxPE | 100.0 | 109.50 | [[6](#S)] |
| HcPE-CcPE-CPE | 100.0 | 109.50 | [[6](#S)] |
| CPE-CcPE-CPE | 80.0 | 109.50 | [[6](#S)] |
| HmPE-CmPE-HmPE | 70.0 | 109.50 | [[6](#S)] |
| HmPE-CmPE-CPE | 100.0 | 109.50 | [[6](#S)] |
| CcPE-OPEO-CPEO | 219.0 | 112.00 | [[22](#c)] |
| OPEO-CcPE-HcPE | 98.0 | 109.45 |  |
| OPEO-CcPE-CPE | 152.9 | 110.00 | [[22](#c)] |
| OPEO-CPEO-CyPEO | 152.9 | 110.00 | [[22](#c)] |
| CPEO-OPEO-CPEO | 219.1 | 112.00 | [[22](#c)] |
| OPEO-CPEO-HPEO | 98.0 | 109.45 |  |
| HyPEO-CyPEO-HyPEO | 83.1 | 109.45 |  |
| HPEO-CPEO-CyPEO | 93.0 | 109.45 |  |
| HmPO-CmPO-CPEO | 93.0 | 109.45 |  |
| F-P-F | 200.0 | 90.00 | [[23](#e)] |

Tabel 3: Valentsnurkade potentsiaaliparameetrid

### 3.2.3 Dihedraalnurgad

Dihedraalnurga tüübid ja nende potentsiaalide parameetrid (tabel 4), mida kasutatakse andi ja sylv potentsiaali valemites vastavalt.

Andi potentsiaali valem: [[24](#b)]

Sylv potentsiaali valem: [[22](#c)]

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Dihedraalnurga tüübid | Potentsiaali  tüüp | K1  K2 | K3  K4 | K5  K6 | K7 | Märkused |
| CPE-CPE-CcPE-OPEO | andi | 2.565636  0.911991 | 0.205438  -0.112785 | -1.009894  1.100081 | 0.358764 | [[24](#b)] |
| CPE-CcPE-OPEO-CPEO | sylv | 1.238295  1.340394 | 1.497879  -3.684750 | -0.161957  -1.090618 | 0.852339 | [[22](#c)] |
| CcPE-OPEO-CPEO-CPEO | sylv | 1.238295  1.340394 | 1.497879  -3.684750 | -0.161957  -1.090618 | 0.852339 | [[22](#c)] |
| CPEO-CPEO-OPEO-CPEO | sylv | 1.238295  1.340394 | 1.497879  -3.684750 | -0.161957  -1.090618 | 0.852339 | [[22](#c)] |
| OPEO-CPEO-CPEO-OPEO | sylv | 0.528204  3.629221 | 4.261889  -7.753174 | -3.312786  -0.284378 | 2.943021 | [[22](#c)] |
| CPEO-OPEO-CPEO-CmPEO | sylv | 1.238295  1.340394 | 1.497879  -3.684750 | -0.161957  -1.090618 | 0.852339 | [[22](#c)] |

Tabel 4: Dihedraalnurkade potentsiaali parameetrid, kus kõigi konstantide K1-K7 ühikuteks on *kcal mol-1* .

Aatomite vahelised dihedraalnurgad, mis on esitatud (tabelis 5), arvutatakse koosiinuse potentsiaali valemi järgi.

[[18](#V)], [[6](#S)]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Dihedraalnurga tüübid | | |
| CPE-CPE-CPE-CPE | CcPE-CPE-CPE-HPE | CmPE-CPE-CPE-CPE |
| CPE-CPE-CPE-CcPE | CPE-CPE-CcPE-HcPE | CmPE-CPE-CPE-HPE |
| CPE-CPE-CcPE-CPE | HPE-CPE-CPE-HPE | HmPE-CmPE-CPE-CPE |
| CPE-CPE-CPE-HPE | HPE-CPE-CcPE-HcPE | HmPE-CmPE-CPE-HPE |
| CPE-CcPE-CPE-HPE |  |  |

Tabel 5: Dihedraalnurga tüübid koosiinuse potentsiaali valemi jaoks.

### 3.2.4 Van der Waalsi jõud

Kaugmõju ehk Van der Waalsi jõud aatomite vahel arvutatakse kindlate valemite järgi.

Van der Waalsi jõud saadakse aatomite vahel, mis on välja toodud (Tabelis 6) jõukonstantidega K, kasutades Buckinghami potentsiaali.

[[18](#V)]

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Aatom | Aatom | K1 /  *kcal mol-1* | K2 /  *Å* | K3 /  *kcal mol- 1Å6* | | Märkused |
| CxPE | Li | 31574.0 | 0.15362 | | 24.4 |  |
| CxPE | P | 858371.4 | 0.21670 | | 1150.2 |  |
| CxPE | F | 164064.4 | 0.23295 | | 212.2 |  |
| HxPE | Li | 31463.3 | 0.15103 | | 4.3 |  |
| HxPE | P | 512948.5 | 0.19564 | | 204.0 |  |
| HxPE | F | 78494.7 | 0.20266 | | 37.6 |  |
| CPEO | CyPEO | 31615.1 | 0.30251 | | 647.8 | [[22](#c)] |
| CyPEO | OPEO | 42931.6 | 0.2755 | | 352.8 | [[22](#c)] |
| CyPEO | HyPEO | 15046.7 | 0.27151 | | 181.5 | [[22](#c)] |
| CyPEO | P | 45094.0 | 0.26681 | | 1227.0 | [[23](#e)] |
| CyPEO | F | 45094.0 | 0.26681 | | 101.0 | [[23](#e)] |
| HyPEO | P | 18965.0 | 0.24254 | | 253.0 | [[23](#e)] |
| HyPEO | F | 12300.0 | 0.24137 | | 45.0 | [[23](#e)] |
| OPEO | HyPEO | 20432.6 | 0.2445 | | 98.8 | [[22](#c)] |
| HPEO | HyPEO | 7161.2 | 0.2405 | | 50.8 | [[22](#c)] |
| OPEO | P | 101480.0 | 0.23641 | | 967.0 | [[23](#e)] |
| OPEO | F | 101480.0 | 0.23641 | | 206.0 | [[23](#e)] |
| CmPEO | CmPEO | 31615.1 | 0.30251 | | 647.8 | [[22](#c)] |
| OPEO | OPEO | 58298.9 | 0.24849 | | 192.1 | [[22](#c)] |
| HmPEO | HmPEO | 7161.2 | 0.2405 | | 50.8 | [[22](#c)] |

Tabel 6: Buckinghami potentsiaali parameetrid

12-6 nimelist potentsiaali kasutatakse (tabelis 7) välja toodud aatomite vaheliste jõudude arvutamiseks.

12-6 potentsiaali valem: [[18](#V)]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Aatom | Aatom | K1 /  *kcal mol-1Å12* | K2 /  *kcal mol-1Å6* | Märkused |
| CxPE | CxPE | 1043080.2 | 675.6 | teisendatud |
| CxPE | HxPE | 97171.5 | 126.9 | teisendatud |
| CxPE | CyPEO | 1079430.3 | 680.3 |  |
| CxPE | HyPEO | 123783.6 | 185.4 |  |
| CxPE | OPEO | 449796.1 | 380.3 |  |
| HxPE | HxPE | 7516.1 | 21.7 | teisendatud |
| HxPE | CyPEO | 91628.8 | 121.9 |  |
| HxPE | OPEO | 38181.5 | 68.2 |  |
| HxPE | HyPEO | 10507.5 | 33.2 |  |

Tabel 7: 12-6 potentsiaali parameetrid

Dibu potentsiaal:

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Aatom | Aatom | K1 /  *kcal mol-1* | K2 /  *Å* | K3 /  *kcal mol-1Å6* | K4 /  *kcal mol-1Å4* | Märkused |
| CyPEO | Li | 8140.0 | 0.37994 | 0 | 473.2 |  |
| HyPEO | Li | 13139.0 | 0.22852 | 0 | 94.1 |  |
| OPEO | Li | 191106.0 | 0.1751 | 0 | 76.9 |  |
| Li | Li | 44195.0 | 0.13742 | 0 | 9.4 |  |
| Li | P | 2964.0 | 0.48781 | 0 | 270.0 |  |
| P | P | 5000000.0 | 0.2 | 2350.0 | 600.0 |  |
| P | F | 2014881.0 | 0.2324 | 500.0 | 195.0 |  |
| F | F | 135782.0 | 0.21997 | 80.0 | 31.0 |  |

Tabel 8: Dibu potentsiaali parameetrid

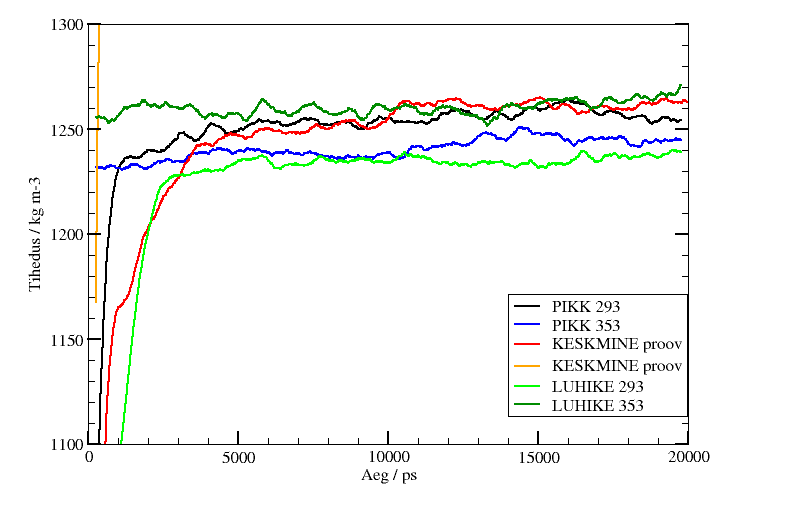
Liitiumi ja floori vahelist Van der Waalsi jõudu arvutatakse valemi di12 alusel, kuhu on parameetrid juba sisestatud.

[[23](#e)]

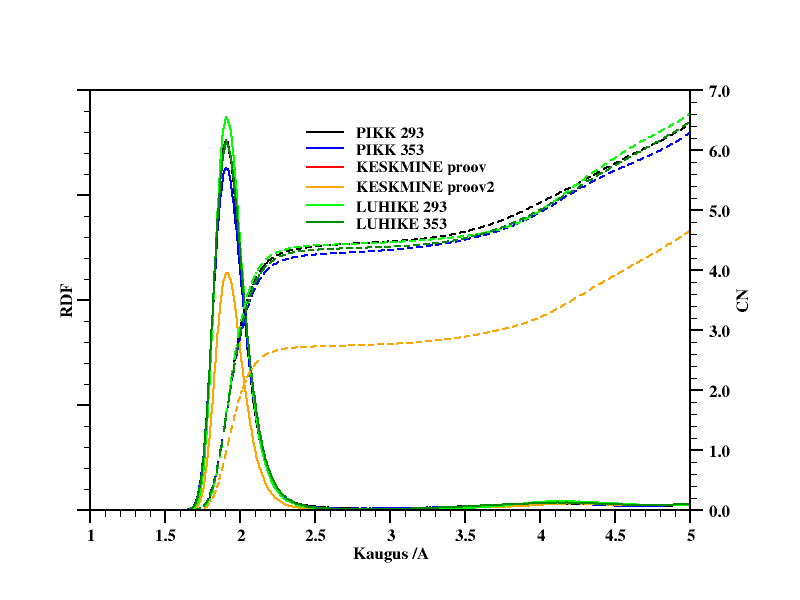
# 4. TULEMUSTE ANALÜÜS

# 4.1 Süsteemi tihedus

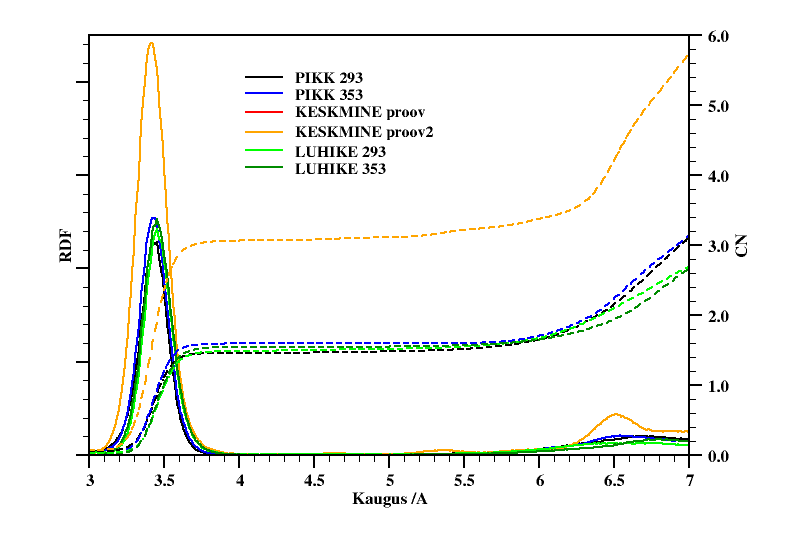
*DL\_POLY 2* poolt väljastatud simulatsiooniraku ruumala muutuse andmete põhjal on tehtud polümeer soola komplekside tiheduste sõltuvused ajast (graafik1). Pikk, keskmine ja lühike tähistavad vastavalt polümeeri pikkust kolmes erinevas simulatsioonisüsteemis. (NPT) simulatsiooni algstaadiumis paari nanosekundi jooksul toimus poksi kokkutõmbumine, et saavutada etteantud rõhk, mille tagajärjel süsteemi tihedus kasvas. Kuna õrgema temperatuuri simulatsioon järgnes madalamale pole ka alguses tiheduse kasvu. Üldiselt võib lugeda kõigi kuue süsteemi ehk uuritava elektrolüüdi tiheduseks 1250 kg/m3. Kirjanduses ilmunud sarnase süsteemi simulatsioonil, kus kasutati P(EO)31 ja PF6 anioone, saadi tiheduseks 1270kg/m3 [[10](#P)]. Madalam tiheduse tulemus on tingitud kopolümeerides sisalduvast polüetüleenis, mille tihedus jääb alla polüetüleenile.

Graafik 1: Kopolümeeri ja LiPF6 süsteemide tiheduste sõltuvused ajast

# 4.2 Koordinatsioon

Molekulaardünaamiline simulatsioon annab võimaluse välja arvutada koordinatsiooniarvu (CN) ja radiaaljaotusfunktsiooni (RDF). Koordinatsiooniarv näitab mitme kõrval oleva aatomiga on uuritav aatom koordineeritud ning radiaaljaotusfunktsioon annab ülevaate koordineeritud aatomite vahelistest kaugustest ehk sidemete pikkustest. Mida kitsam on RDF piik, seda vähem kaugused vastavate aatomite vahel fluktueeruvad. Huvipakkuvateks aatompaarideks, tänu vastasmärgilistele laengutele, osutuvad Li-OPEO ja Li-P, millede CN ja RDF on süsteemide kaupa välja toodud vastavalt (graafik 2 ja 3), kus värv tähistab ühte süsteemi ning arv süsteemi nimetuse järel kajastab simulatsiooni temperatuuri Kelvinites. Graafik 2: Li+ ja OPEO radiaaljaotusfunktsioonid pideva ning koordinatsiooniarvud katkendliku joonega.

Graafiku 2 alusel võime lugeda Li+ ja etüleenihapniku vaheliseks koordinatsiooniarvuks kõikide süsteemide puhul keskmiselt 4.5, mis tähendab, et enamus katioone on koordineeritud korraga kas 4 või 5 erineva etüleenihapnikuga. Piikide asukoha järgi loeme, et kõikide süsteemide puhul on koordineeritud Li+ ja OPEO omavaheline kaugus keskmiselt 1.9Å. Samade tulemusteni on jõutud ka PEO ja LiClO4 simuleerimisel, kus arvutades saadi Li+ ja OPEO vahekaugusteks 1.95Å ja neutron difraktsiooni mõõtmistest nende koordinatsiooni arvuks 4.8 .

Graafik 3: Li+ ja Pradiaaljaotusfunktsioonid pideva ning koordinatsiooniarvud katkendliku joonega.

Koordineeritud aniooni ja katiooni vaheliseks kauguseks võime kolmanda graafiku piikide asukoha järgi lugeda keskmiselt 3.5Å, mis muutub selle ümber väikestes piirides. Koordinatsiooniarvuks tuleb katkendlike joonde horisontaalosa kõrgus 1.5, mistõttu katioonid on kõikides süsteemides enamasti seotud kas ühe või kahe aniooniga. Kui liita koordinatsiooniarvud katiooniga koordineeritud aatomi OPEO ja aniooni vahel, saame väärtuseks 6. Seega tuleb välja, et antud süsteemides käitub Li+ kui 6 valentne ioon, olles koguaeg koordineeritud 6 aatomiga kas OPEO või aniooni fosforiga.

# 4.3 Li+ koordinatsioonide statistika

*DL\_POLY 2* väljastab koordinaatide ajaloo kõigi aatomite kohta simulatsiooni jooksul, millest on hea välja selgitada, kas ja milliste aatomitega on Li+ simulatsiooni ajal seotud. Simulatsiooniboksist otsiti Li+ ümbruses aatomeid, mis jäävad 5Å raadiuse sisse. Aatomiteks, millega katioon on enamus simulatsiooni vältel kindlalt koordineeritud, osutusidki ainult kõrvalahelate hapnikud ning soola anioonid PF6-.Katioon ja uuritav aatom on koordineeritud, kui nende omavaheline radiaaljaotusfunktsioonist tulenev kaugus, püsib simulatsiooni vältel muutumatuna. Järgnevad diagrammid illustreerivad kahel temperatuuril, kolme erineva süsteemi, kohta protsentuaalselt, kui palju simulatsioonirakus olevaid Li+ on korraga seotud vastava arvu uurimise all olevate aatomitega.

Digramm 1: Li+ ja OPEO kordineeritus (1.9 Å) temperatuuril 293 K

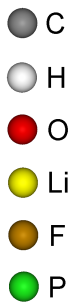
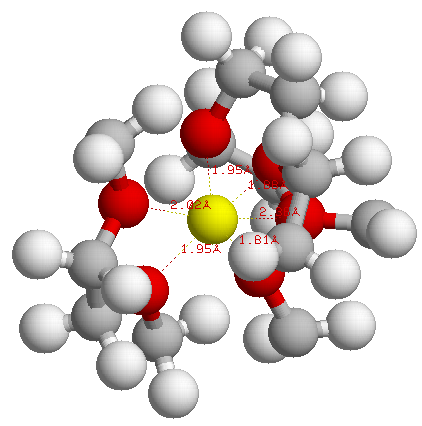
Diagramm 2: Li+ ja OPEO koordineeritus (1.9 Å) temperatuuril 353 K

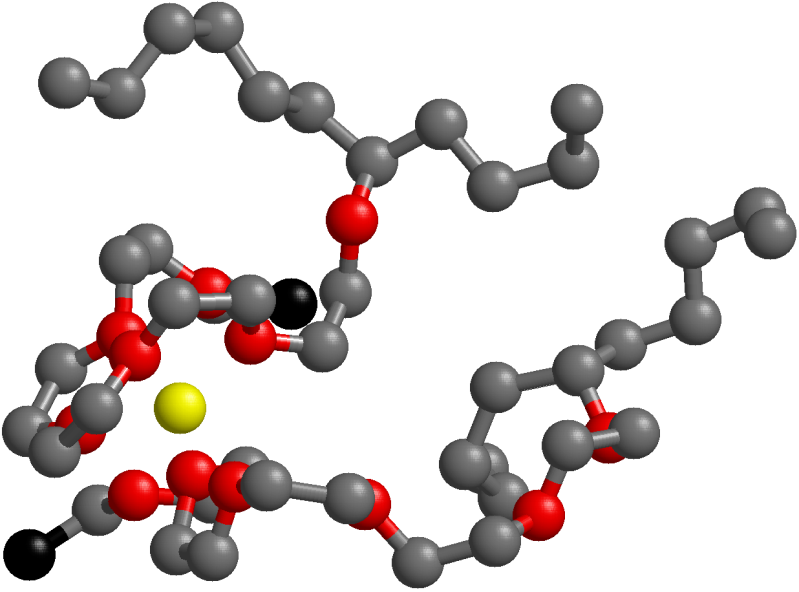
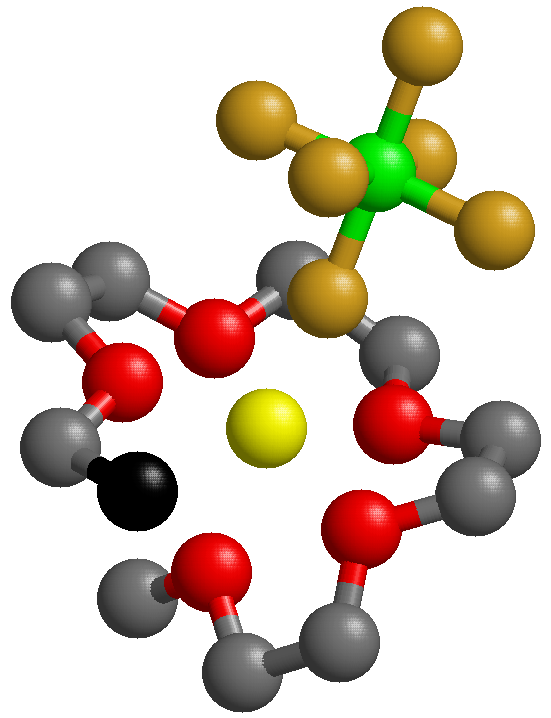
Diagramm 3: Li+ ja PF6- koordineeritus (3.5 Å) temperatuuril 293 K

Diagramm 4: Li+ ja PF6- koordineeritus (3.5 Å) temperatuuril 353 K

Diagrammid iseloomustavad süsteemide sarnast koordinatsiooni statistika jaotust. Selgub ka statistiliste koordinatsioonide järgi, kui liita süsteemi siseselt katioonide kõik koordineeritused ja jagades summa katioonide arvuga süsteemis, saame tulemuseks kõigil kuuel juhul, et Li+ on korraga seotud ümardades 6 aatomiga. Ei leitud Li+, millel koordinatsiooni arv ületaks 6 ega Li+, millel puuduks koordineeritus teiste aatomitega. Eelnevatelt diagrammidelt on näha pikas ja lühikeses süsteemis suurem osa Li+ koordineeritud korraga 4, 5 või isegi 6 kõrvalahela hapnikuga (joonis5) ning ligikaudu sama suures osas seotud 2, 1 või mitteühegi PF6-ga. Kui süsteemis leidus Li+, mis ei olnud koordineeritud aniooniga, siis olid need seotud 6 erineva polüetüleeni hapnikuga. Kõrgemal temperatuuril on diagrammidelt näha, et pikkade peaahelatega kopolümeeride süsteemis on kolmandik Li+ koordineeritud 6 OPEO-ga korraga, ning lühemate kopolümeeride korral eelistatud Li+ koordineerumine 4 OPEO ja 2 aniooniga korraga. Seega lühikeste kopolümeeride korral on elektrolüüdis suurem tõenäosus anioonide ja katioonide klasterdumiseks (joonis6).

Võrreldes süsteeme temperatuuride alusel, võib öelda, et Li+ on koordineeritud ligikaudu 10 % -lise täpsusega sama moodi. Ehk temperatuuridel 20Co ja 80Co käitub sellist tüüpi kopolümeeri elektrolüüt sarnaselt, mis näitab, et elektrolüüdi kõrgematel temperatuuridele iseloomulikke jooni on võimalik tuua ka madalamatele temperatuuridele.



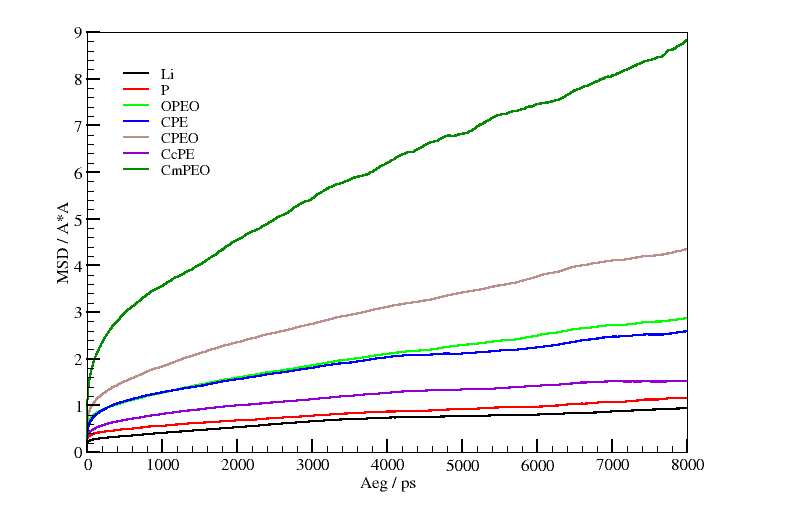
Joonis 5: Lühikese süsteemi simulatsiooniboksist välja lõigatud Li+, mis on koordineeritud kopolümeeri kahe kõrvalahelaga. Kaugused Li+ ja OPEO vahel /Å

Joonis 6,7: Lühikesest süsteemist välja lõigatud Li+, mis on koordineeritud PF6- ja 5 OPEO-ga ning Li+, mis on kordineeritud 6 OPEO-ga sidudes kahte kõrvalahelat. Kõrvalahela otsa süsinikud on tähistatud mustaga.

# 4.4 MSD

MSD (mean squared displacement) oma olemuselt iseloomustab aatomite liikuvust arvestades nii nende võnkumisi kui ka pikemaid edasi triivimisi. MSD on ajas kasvav ning arvutatakse üht tüüpi aatomite kohta all toodud definitsiooni järgi.

Valemis kajastuv on vektor, ehk teepikkus, mida üht tüüpi kindel aatom *i* või aatomite grupp on liikunud ajaintervalli *t* jooksul ning kõigi selliste aatomite teepikkused on võetud ruutu ja keskmistatud üle mitmete ajaintervallide. Joonestades graafiku MSD väärtused ajas, saame sirge, mille tõus on võrdelises seoses uuritavate aatomite difusiooni koefitsiendiga (D). MSD graafikud on tehtud nii aatomite kui ka süsteemide kaupa, et võrrelda erinevate aatomite liikuvusi süsteemi siseselt. Lühikeste peaahelatega kopolümeeri ja soola aatomite MSD võrdlused temperatuuril 293 K on toodud (graafikul 4).

Graafik 4: Lühikese süsteemi MSD / Å2 aatomite kaupa temperatuuril 293 K.

Graafiku andmete põhjal tuleb välja, et ioonidon väiksema ning kopolümeeri kõrvalahela otsad on suurema liikuvusega, mis on tingitud kõrvalahelates sisalduvatest PEO hapnikutest. Li+ vähene liikuvus võib olla tingitud kõrvalahelate ümber põimumisest, kuna iooniga moodustab suurema osa interaktsioone OPEO. On näha ka ,et PEO süsinike liikuvus on suurem kui peaahela polüetüleeni süsinikel, mille põhjuseks võib lugeda samuti OPEO sisalduvust. Kui võrrelda OPEO ja Li+, siis esimese liikuvus on suurem, sest kordineeritud aatomite liikuvus on väiksem kui mitte kordineeritud samade aatomite liikuvus ning OPEO on süsteemis 12 korda rohkem kui Li+, milledest kolmandik ei ole kordineeritud Li+-dega. Süsteemide võrdluseks on (diagrammil 5) kujutatud kõigist simuleeritud süsteemidest valitud aatomite difusiooni koefitsiendid D, ühikuga m2 s -1, mis on arvutatud MSD graafikute tõusudest. Antud tulemused teeb realistlikuks ka sarnases süsteemis vabade LiPF6 ja ristahelatega ühendatud P(EO)20 puhul saadud Li+ difusiooni koefitsient D vahemikus m2 s-1.

Diagramm 5:Süsteemide kaupa Li+, P ja OPEO difusiooni koefitsiendid D / m2s-1

On teada, et PEO temperatuuri tõustes kaotab kristallilisust, ka graafikult võib lugeda OPEO suuremat liikumist temperatuuril 80Co. Seevastu võib täheldada, et Li+ difusiooni koefitsient on kõrgemal temperatuuril langenud, mille põhjuseks oleks kopolümeeri kõrvalahelate hea ja kiire painduvus, et siduda katioone, laskmata neil süsteemis ringi liikuda. Mõlemal temperatuuril on aga lühikeste peaahelate kopolümeeri süsteemid suurima Li+ difusiooni koefitsendiga. Pikkade kopolümeeride kõrvalahelad ei ole võimelised end ioonide jaoks mugavamalt ümber orienteeruma , kui seda on lühemate peaahelatega kopolümeeride kõrvalahelad. Temperatuuri tõstmisel on pikas süsteemis OPEO difusiooni koefitsient väiksema kasvuga kui lühikeses süsteemis, kuna diagrammide 1 ja 2 põhjal on katioonid kordineerunud OPEO-ga pikas süsteemis 19% rohkem kui lühikeses. Seega pikas süsteemis ei ole ahelad nii liikuvad tänu suuremale Li+ ja OPEO koordinatsionile ning pikemale peaahelale.

# 6. KOKKUVÕTE

7. KASUTATUD KIRJANDUS

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | M. Grujicic, K. M. Chittajallu, G. Cao, and W. N. Roy, "An atomic level analysis of conductivity and strength in poly(ethylene oxide) sulfonic acid-based solid polymer electrolytes," *Materials Science and Engineering*, **B 117**, 187–197, (2005). |
| [2] | C. Chen, P. Depa, V. G. Sakai, J. K. Maranas, J. W. Lynn, I. Peral, and J. R. D. Copley, "A comparison of united atom, explicit atom, and coarse-grained simulation models for poly (ethylene oxide)," *The Journal of Chemical Physics*, **124**, 234901, (2006). |
| [3] | X. Zhang, Z. Li, H. Yang, and C. C. Sun, "Molecular Dynamics Simulations on Crystallization of Polyethylene Copolymer with Precisely Controlled Branching," *Macromolecules*, **37**, 7393-7400, (2004). |
| [4] | J. W. Halley and Y. Duan, "Role of atomic level simulation in development of batteries," *Journal of Power Sources*, **110**, 383-388, (2002). |
| [5] | R. C. Agrawal and G. P. Pandey, "Solid polymer electrolytes: materials designing and all-solid-state battery applications: an overview," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 223001, (2008). |
| [6] | E. A. Zubova, N. K. Balabaev, and L. I. Manevitch, "Molecular mechanisms of the chain diffusion between crystalline and amorphous fraction in polyethylene," *Polymer*, **48**, 1802-1813, (2007). |
| [7] | A. Manuel Stephan, "Review on gel polymer electrolytes for lithium batteries," *European Polymer Journal*, **42**, 0021-0042, (2006). |
| [8] | L. J. A. Siqueira and M. C. C. Ribeiro, "Molecular dynamics simulation of the polymer electrolyte poly(ethylene oxide) / LiClO4. I. Structural properties," *The Journal of Chemical Physics*, **122**, 194911, (2005). |
| [9] | Y. Duan and J. W. Halley, "Mechanisms of lithium transport in amorphous polyethylene oxide," *The Journal of Chemical Physics*, **122**, 054702, (2005). |
| [10] | L. T. Costa and M. C. C. Ribeiro, "Molecular dynamics simulation of polymer electrolytes based on poly(ethylene oxide) and ionic liquids. II. Dynamical properties," *The Journal of Chemical Physics*, **127**, 164901, (2007). |
| [11] | J. R. Wickham, S. S. York, and N. M. Rocher, "Lithium Environment in Dilute Poly(ethylene oxide)/Lithium Triflate Polymer Electrolyte," *J. Phys. Chem.*, **B 110**, 4538-4541, (2006). |
| [12] | Y. Liu, Y. Ono, T. Matsumura, A. Hirano, T. Ichikawa, N. Imanishi, and Y. Takeda, "All solid-state Li-ion batteries based on intercalation electrodes and poly (ethylene oxide)-LiX electrolytes," *Res Rep Fac Eng Mie Univ*, **30**, 1-12, (2005). |
| [13] | O. Borodin and G. D. Smith, "Molecular Dynamics Simulations of Comb-Branched Poly(epoxide ether)-Based Polymer Electrolytes," *Macromolecules*, **40**, 1252-1258, (2007). |
| [14] | C. Xu, C. Ma, and M. Taya, "Electrolyte for Laminated Polymer Lithium Rechargeable Battery," *Electroactive Polymer Actuators and Devices*, 692714, (2008). |
| [15] | V. V. Hoang, "Molecular Dynamics Simulation of Amorphous SiO2 Nanoparticles," *J. Phys. Chem.*, **B 111**, 12649-12656, (2007). |
| [16] | G. Yang, W. Hou, Z. Sun, and Q. Yan, "A novel inorganic–organic polymer electrolyte with a high conductivity: insertion of poly(ethylene) oxide into LiV3O8 in one step," *Journal of Materials Chemistry*, **15**, 1369–1374, (2005). |
| [17] | G. Srinivas, W. C. Swope, and J. W. Pitera, "Interfacial Fluctuations of Block Copolymers: A Coarse-Grain Molecular Dynamics Simulation Study," *J. Phys. Chem.*, **B111**, 13734-13742, (2007). |
| [18] | W. Smith, M. Leslie, and T. R. Forester, *The DL POLY 2 User Manual*. Daresbury Laboratory, England, 2004. |
| [19] | E. Soolo, J. Karo, H. Kasemägi, M. Kruusamaa, and A. Aabloo, "Application of the Monte Carlo method for creation of initial models of EAP molecules for Molecular Dynamics simulation," *Proceedings of SPIE*, **6168**, 61682A-2, (2006). |
| [20] | *http://www.webelements.com*. |
| [21] | J. Pozuelo, F. Mendicuti, and E. Enrique, "Conformation and mobility of polyethylene and trans-polyacethylene chains confined in a-cyclodextrins channels," *Polymer*, **43**, 523-531, (2002). |
| [22] | S. Neyertz, D. Brown, and J. O. Thomas, "Molecular dynamics simulation of crystalline poly(ethylene oxide)," *J. Chem. Phys.*, **101**, 10064, (1994). |
| [23] | O. Borodin, G. D. Smith, and R. L. Jaffe, "Ab Initio Quantum Chemistry and Molecular Dynamics Simulations Studies of LiPF6/Poly(ethylene oxide) Interactions," *Journal of Computational Chemistry*, **22**, 641-654, (2001). |
| [24] | A. Hektor, M. K. Klintenberg, A. Aabloo, and J. O. Thomas, "Molecular dynamics simulation of the effect of a side chain on the dynamics of the amorphous LiPF6–PEO system," *J. Mater. Chem*, **13**, 214-218, (2003). |
| [25] | G. D. Smith, R. L. Jaffe, and H. Partridge, "Quantum Chemistry Study of the Interactions of Li+, Cl-, and I- Ions with Model Ethers," *J. Phys. Chem.*, **101**, 1705-1715, (1997). |
| [26] | Z. Tao and P. T. Cummings, "Molecular dynamics simulation of inorganic ions in PEO aqueous solution," *Molecular Simulation*, **33**, 1255-1260, (2007). |
| [27] | P. G. Bruce, "Energy materials," *Solid State Sciences*, **7**, 1456-1463, (2005). |
| [28] | L. A. Guilherme, R. S. Borges, E. Mara, S. Moraes, G. G. Silva, M. A. Pimenta, A. Marletta, and R. A. Silva, "Ionic conductivity in polyethylene-b-poly(ethylene oxide)/lithium perchlorate solid polymer electrolytes," *Electrochimica Acta*, **53**, 1503-1511, (2007). |

# 8. SUMMARY

Polüetüleen/polüetüleenoksiid kopolümeeri (PE/PEO) ja LiPF6 elektrolüüdi MD simuleerimine

Priit Priimägi

In our work…