

Elektroaktiivsete polümeeride rakendused

TURU-UURING

Tellija: Tartu Ülikool

Teostaja: Invent Research OÜ



Aprill 2008

Konfidentsiaalne!

1.	Elektroaktiivsed polümeerid	3
1.1	Elektroaktiivsete polümeeride tüübid ning nende omadused.....	4
1.2	Elektroaktiivsetel polümeeridel põhinevad aktuaatorid ja sensorid	5
2.	Elektroaktiivsete polümeeride turg.....	8
2.1	Elektroaktiivsete materjalide turg rakenduste kaupa.....	9
2.2	Elektroaktiivsete materjalide turg regioonide kaupa	10
2.3	Elektroaktiivsete polümeeride turg materjalide kaupa	11
3.	Elektroaktiivsete polümeeride rakendused	12
3.1	Meditsiinilised rakendused.....	12
3.1.1	Mikropumbad.....	12
3.1.2	MRT seadmed	12
3.1.3	Kateetrid.....	13
3.1.4	Nägemisteravuse korrigeerimine	15
3.1.5	Ühekordsed infusioonipumbad.....	15
3.2	Robootika ja mehhatroonika rakendused.....	17
3.4	Sensorite rakendused ehituses.....	19
3.5	Kantavate dielektrilistel elastomeeridel põhinevate sensorite ja aktuaatorite rakendused	19
4.	EAP materjalide, komponentide ning seadmete tootjad.....	21

1. Elektroaktiivsed polümeerid

Teaduse ning tehnoloogia kiire arengu tulemusena on välja töötatud mitmeid molekulaarsel tasemel „intelligentseid“ materjale. Need materjalid on võimelised tunnetama muutusi ümbritsevas keskkonnas, töötleva saadud informatsiooni ning vastama muutustele tulenevalt enda omadustest. Kujumäluga sulamid ning piesoelektrikud on näideteks sellistest materjalidest. Juba mitme kümnendi jooksul on uuritud ka väliste stiimulitele kuju või mahu muutusega reageerivaid polümeere.

Sellised aktiivsed polümeerid võivad näiteks regeerida elektriväljale, magnetväljale, pH taseme muutusele või valgusele. Aktiivsed polümeerid jagunevad kahte rühma – elektriliselt mitteaktiivsed polümeerid (keemiliselt aktiveeritavad polümeerid, kuju mälu polümeerid, mille struktuuri saab muuta kahe erinevate dimensioonidega oleku vahel, valgusaktiivsed polümeerid, magnetaktiivsed polümeerid ja termoaktiivsed polümeerid) ning elektroaktiivsed polümeerid. **Elektroaktiivsed polümeerid (*electroactive polymers*, EAP) on materjalid, mille omadused muutuvad nende rakendatava elektripinge või välise elektrivälja toimetel.**

Üheks aktiivsete polümeeride kõige suuremat potsentsiaali omavaks kasutusala on bioonika, mille eesmärk on loodusest pärinevate ideede otsene rakendamine tehnikas ning disainis. Kõige märkimisväärsimateks biomimeetika väljunditeks on tehisintellekti ning inimese füüsilisi protsesse ja võimeid jäljendavate seadmete loomine. Bioonilise tehnika arengut on seni piiranud kohmakad ja keerulised liikuvad mehhanismid, nende kontrolliseadmed ning kogukad toiteallikad.

Bioloogilistele lihastele sarnaste omadustega aktiivsed polümeerid võimaldavad teha biomimeetika arengus tähelepanuväärseid edusamme. Neil polümeeridel on bioloogiliste lihastega võrreldav elastsus, vastupidavus vigastustele, suur liikuvus ning energiatõhusus. Vähem ei ole olulised ka lihastele lähedased esteetilised omadused ja elektromehaaniliste komponentide tööga seotud müra puudumine. Sarnaselt bioloogilistele lihastele töötavad elektroaktiivsetel polümeeridel põhinevad kunstlihased ühtviisi efektiivselt sõltumata nende suurusest. See tähendab, et täpselt sama tehnoloogiaga ning samal meetodil toodetud seadmeid on võimalik kasutada nii mikroskoopiliste kui ka väga suurt jõudu nõudvate rakenduste jaoks.

EAP materjalide kasutusala aga ei piirdu vaid biomimeetiliste seadmetega. Ärilisest aspektist pakuvad laialdast huvi elektroaktiivsetel polümeeridel põhinevad odavad, kerged ning kõrge energiatihedusega täituriid. Need vastupidavad ja lihtsalt vormitavad täituriid võivad leida laialdast rakendust meditsiinis ja lennuki-, kosmose- ning autotööstuses. EAP aktuaatorite maksimaalne taastuv deformatsioon on kuni sada korda suurem kui jäikadel ja habrastel piesoelektrikutel ning nende reaktsioonikiirus ja vastupidavus ületab kujumäluga sulamite vastavaid näitajaid.¹

¹ <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/37602/1/05-1898.pdf>

Elektroaktiivsetes polümeerides toimuvad protsessid on pööratavad, st. deformeerides materjali, genereerib see elektrivoolu. Seega saab neid kasutada ka mitmesuguste sensoritena või ka vooluallikana.

EAP lihaste ning neist valmistatud aktuaatorite puudused on seotud peamiselt materjali efektiivsuse, eluea ning juhtimisprobleemidega.

1.1 Elektroaktiivsete polümeeride tüübid ning nende omadused

Elektroaktiivseid polümeere klassifitseeritakse vastavalt omaduste või kuju muutumise mehhanismile kahte gruppi – elektronjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid ningioonjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid.

Elektronjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid, näiteks dielektrilised elastomeerid, elektrostaadid, ferroelektrilised polümeerid ja elektreedid, vajavad töötamiseks suhteliselt kõrget pingevahemikku (sõltuvalt omadustest 10-150V/ μm), mille ülemine piir on väga lähedal tasemele, kus materjal kahjustub pöördumatult.

Elektronjuhtivate elektroaktiivsete polümeeride eeliseks on nende kõrge energiatihedus, kiire reageerimisaeg (üldjuhul mõne millisekundi piires) ning keemiline stabiilsus. Selliste materjalide töökindlus õhukeskkonnas ning omadus säilitada võrdlemisi madala voolu all saavutatud positsioon annab neile suure kasutuspotentsiaali erinevates mehhatroonika ja robotika rakendustes. Ainsaks piiravaks teguriks võib elektronjuhtivate polümeeride puhul olla võrdlemisi kõrge klaasistumis- ehk faasisiirdetemperatuur, mis piirab kasutust väga külmades tingimustes (näit. kosmoses).

Tabel 1 EAP materjalide eelised ning puudused

Materjalid	Eelised	Puudused
Elektronjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid	Kiire reageerimisaeg Hoiavad madala voolu all saavutatud positsiooni Kõrge energiatihedus Suur jõud Ei vaja spetsiaalset kaitsekihti	Töötamiseks vajalik kõrge pinge (100 MV meetri kohta) Sõltumata pinge polaarsusest liiguvad elektrostriksiooni tõttu monopolaarselt
Ioonjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid	Mitmesuunaline liikumine vastavalt pinge polaarsusele Töötavad madalal pingel Mõned ioonjuhtivad polümeerid on teatud tingimustel bistabiilsed	Töötavad vedela või tahke elektrolüüdi juuresolekul Vajavad õhukeskkonnas töötamiseks õhukest ning paindlikku kaitsekihti materjali pinnale Aeglane reaktsioonikiirus Väikesed jõud Relaksatsiooniefekt vooluimpulsi lõppemise järel Veepõhises süsteemis toimub elektrolüüs pingetel >1,23V

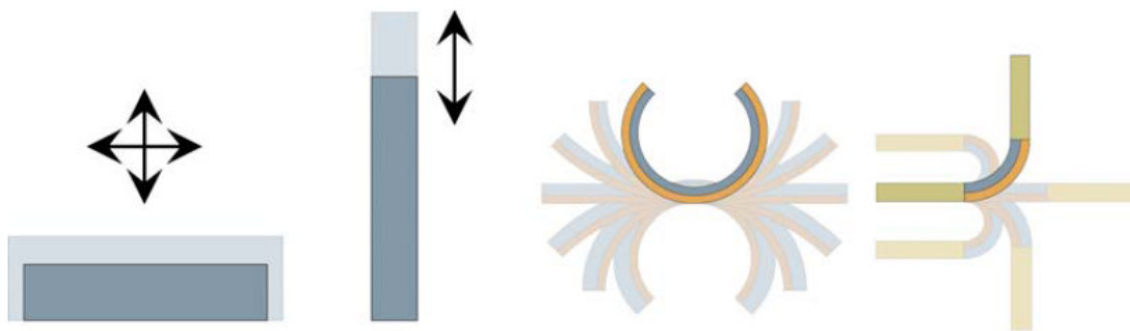
Allikas: Yoseph Bar-Cohen, „Artificial Muscles using Electroactive Polymers (EAP): Capabilities, Challenges and Potential“

Ioonjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid (näit. geelid, süsinik nanotorud, ioonsed polümeer-metall materjalid) baseeruvad ionide difusioonil. Taolised materjalide tööpõhimõte on ionide migratsioon (elektro-osmoos) materjali ühest piirkonnast teise välise elektrivälja mõjul. Tavaliselt liiguvad ionid polümeeri sees olevas polaarses vedelikus, nagu näiteks vesi võiioonvedelikus, mis on ise ka ionide allikaks. Neid materjale iseloomustab madal tööpinge (1-5 V), suur liigutuse ulatus (paindumisel), suhteliselt väikesed jõud ning elektronjuhtivatest polümeeridest aeglasem reaktsioonikiirus. Reaalselt leiavad ioonjuhtivad polümeerid rakendust täituritena miniatuursetes seadmetes ning robotites.

1.2 Elektroaktiivsetel polümeeridel põhinevad aktuaatorid ja sensorid

Aktuaatorid on oluliseks osaks paljudes meid igapäevaselt ümbritsevates masinates ning seadmetes. Kui mõnda seadme komponenti või osa on vaja liigutada, siis teevad seda enamasti hüdraulilised, pneumaatilised või elektrilised täiturid. Ennekõike viimase kümnendi jooksul on nende aktuaatorite liikide kõrvale tõusnud mitmed uutel avastatud füsiko-keemilistel põhimõtetel töötavad täiturtehnoloogiad, mis ületavad paljudelt omadustelt traditsioonilisi mehhatroonilisi seadmeid.

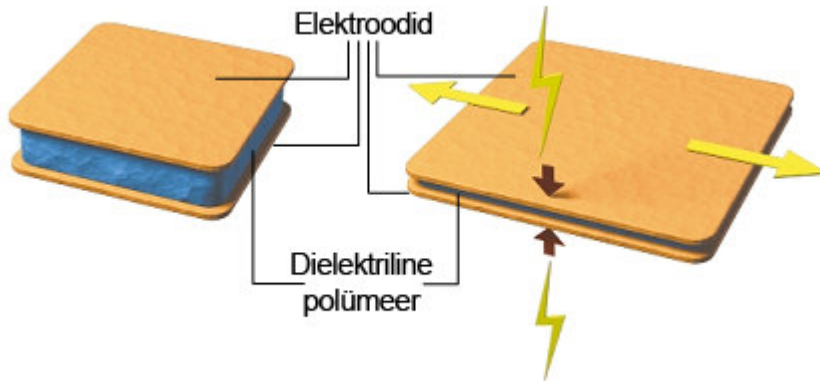
Elektroaktiivsete polümeersete täiturite ning sensorite potentsiaalsed rakendusvaldkonnad ja kasutusvõimalused on peaaegu piiramatud ning üha laienevad. Võrreldes hetkel kasutusel olevate tehnoloogiatega, on EAP materjalidel aktuaatoritena mitmeid praktilisi eeliseid – polümeersete materjalidena on nad kerged, lihtsalt vormitavad ning nende füüsikalisi omadusi on vastavalt konkreetsetel vajadustele võimalik tootmisprotsessis muuta. Samuti on erinevate elektroaktiivsete polümeeride seas materjale, mis painduvad, muudavad ruumala või deformeeruvad lineaarselt elektrivoolu toimel. Kombineerides lihtsaid paisuvaid või painduvaid polümeere teiste materjalidega, on teoreetiliselt võimalik luua märksa keerulisemaid kontrollitud liikumisi sooritavaid süsteeme. Selline lai valik erinevaid omadusi lubab tulevikus leida EAP materjalide seast sobiva asenduse ka keerulistele täiturseadmetele.



Joonis 1 Elektroaktiivsete polümeeride deformatsioon – kolmedimensiooniline, lineaarne, painduv.

Aktuaatorite peamiseks tehnilisteks näitajateks on jõud, mida aktuaator arendab, täituri reaktsiooniaeg ja kiirus ning jooksuri liikumisulatus ehk käik.

Elektroaktiivsed polümeersed aktuaatorid ületavad maksimaalselt liikumisulatuselt kõiki teisi uusi täiturtehnoloogiaid (piesoelektrilised-, magnetrostriktiivsed- ja kuju mälu täituriid, elektro- ning magneto-reoloogilised täituriid). EAP täituriite liikumisulatus jääb olenevalt materjalidest vahemikku 5% (juhtivad polümeerid) kuni 300-400% (silikoonil ja akrüülil põhinevad dielektrilised elastomeerid). EAP aktuaatorite arendatavad jõud on kõige suuremad juhtivate polümeeride (CP) puhul, kuni 50 MPa. Polümeersete geelide vastav näitaja jääb aga alla 1MPa.



Joonis 2 Dielektriline elastomeer aktuaator

Täiturtehnoloogiareaktsioonikiirus erineb materjaligruppide lõikes ning vastavalt komponendi omadustele 10-100 kordselt. Ioonjuhtivatel EAP materjalidel põhinevate täituriite kiirendus on halvem kui elektronjuhtivatel tehnoloogiatel, kuna see on sõltuvuses ionide difusiooni kiirusest. Erandiks on siinkohal süsinik-nanotorud, mille kiirus on võrreldav elektronjuhtivate materjalidega. Energiatihedus töösükli kohta on konkurentsituks kõige kõrgem süsinik-nanotorudest täituriitel (50 J/cm^3) ning madalaim polümeersedel geelidel ($\leq 10^{-1} \text{ J/cm}^3$). **Parimate omadustega EAP täituriite energiatihedus energiamuunduriteks ületab elektromehhaniliste aktuaatorite vastavaid näitajaid 10-20 kordselt.**²

EAP aktuaatorite reaaleluline rakendamine on juba praegu pakkumas suurt huvi mõningate väga odavate ning kättesaadavate EAP materjalide poolt praktikas demonstreeritavate karakteristikute tõttu. Näiteks on mõningad dielektrilised elastomeerid, nagu 3M poolt toodetavad VHB 4910 isekleepuvad akrüülkiled, katsetes näidanud elektriliselt indutseeritud pindala suurenemist kuni 380% ulatuses. Kõrge energiatihedus (3.4 J g^{-1}) ning tugevad rõhud (8 MPa) muudavad selle materjali kasutamise atraktiivseks robotikas, meditsiiniseadmetes ning erinevates proteesides. Samas jääb VHB kiledel põhinevate täituriite efektiivsus tunduvalt alla materjali enda omadustest tulenevale teoreetilisele töövõimele. Täituri madal efektiivsus tuleb ennekõike materjali defektidest nagu kristalliseerumine, varieeruv kile paksus ning ebaühtlane polümeersete molekulide ristseotus. Sellised defektid vähendavad ka aktuaatori töökindlust ning halvendavad seeläbi tehnoloogia kommertsialiseerimise perspektiive.³

² Jose L. Pons, "Emerging actuator technologies: a micromechatronic approach", John Wiley & Sons 2005

³ Yuan et al. "Fault-Tolerant Dielectric Elastomer Actuators using Single-Walled Carbon Nanotube Electrodes", Advanced Materials, 2008, 20, 621–625

Tabel 2 Erinevate EAP täiturite energiad ning venivus

Materjal	Jõud (kJ/m)	Deformeeruvus %
Dielektriline elastomeer (VHB)	150	maks. 380
Juhtivad polümeerid	100	2
Ioonsed polümeermetall materjalid	5,5	0,5

Allikas: Kwang J. Kim and Satoshi Tadokoro, „Electroactive polymers for robotic applications: artificial muscles and sensors“, Springer-Verlag 2007

EAP täiturite ehitus on uudne ning kiiresti arenev uurimisvaldkond. Hetkel on paljud EAP aktuaatorite ehituses kasutust leidvad põhimõtted üle võetud teistelt viimaste kümnendite jooksul esile kerkinud täiturtehnoloogiatelt. Olulisemad lahendamist nõudvad probleemid efektiivsemate ning töökindlamate EAP aktuaatorite konstrueerimisel on järgmised:

- Sobiva tehnoloogia valik – EAP aktuaatorite valik peaks ennekoike sõltuma materjalide vastavusest konkreetse rakenduse nõuetele. Näiteks potentsiaalseks rakendamiseks inimorganismis on tõenäoliselt kõige turvalisemad ioonjuhtivad EAP aktuaatorid, kuivõrd elektronjuhtivate täiturite käivitamiseks vajalik kõrge elektripinge võib kujutada ohtu tervisele. Ioonjuhtivatest materjalidest on omakorda bioloogiliselt kõige sobivamad juhtivad polümeerid (*conducting polymers*, CP).
- Elektroodi ehitus – elektroodi disain on üks tähtsamaid aspekte suure töökoormusega aktuaatorite ehituses. Suure deformeerumise võimega EAP täiturite puhul (dielektrilised elastomeerid, IPMC) on ohuks elektroodide degradeerumine, mis võib viia seadme riknemiseni. Võimalikus alternatiivseks elektroodide materjaliks on ühekihilised süsiniknanotorud, mis elastsed ning veatolerantsed.
- Katvad kaitsekihid – Ioonjuhtivatest EAP materjalidest täiturite pind peab töötamiseks olema märg, kuivades lõpetab seade funktsioneerimise. „Märgade“ täiturite katmiseks sobilike vastupidavate hermeetiliste pakendite väljatöötamine on nende laiemasse kasutusse toomise oluliseks eelduseks.
- Tugevad elektriväljad – Elektronjuhtivaid täitureid iseloomustavad kiire reaktsiooniaeg, tugev jõud ning tööks vajalik kõrge pinge, mis tõstatab mitmeid tehnoloogilisi ning praktilisi probleeme seoses vooluringi konstruktsiooniga. Eriti tähtis turvalisuse tagamine inimeste poolt kantavate või sagedasti käsitletavate seadmete puhul.
- Uued konfiguratsioonid ning disainilahendused – CP aktuaatorite puhul on rakendatud multimorfsetelt piesoelektrilistel täituritelt pärinevat mitmekihilist paigutust, mis lubab lineaarset deformatsiooni konverteerida painduvaks liikumiseks. Vastupidine disainilahendus on vajalik ioonjuhtivate polümeersete täiturite puhul, kus materjali loomulik paindumine tuleb muundada lineaarseks liikumiseks.

2. Elektroaktiivsete polümeeride turg

2007. aastal olid EAP aktuaatorite ning sensorite suurimad tarbijad erinevad teadus-arendustegevusega seotud akadeemilised organisatsioonid. Kõige olulisemaks nõudluse allikaks on ennekõike Põhja-Ameerika ülikoolides läbiviidavad teaduslikud uurimisprojektid. Teaduslikuks kasutuseks mõeldud materjalid ja seadmed on üldjuhul valmistatud kliendi konkreetsetest vajadustest lähtuvalt.

Polümeerid moodustavad suure hulga erinevate omadustega materjalide klassi. Erinevalt näiteks metallidest ning keraamilistest materjalidest esinevad polümeerid mitmes erinevas vormis – vedelana, tahkena, elastse kummina. Polümeersete materjalide omadused sõltuvad nende vanusest ning töökeskkonna temperatuurist. Samuti on nad tundlikud koormuste ning erinevate väliste keemiliste ja füüsiliste mõjutajate poolt esile kutsutud mikrostruktuursetele muutustele.

Elektroaktiivsete polümeeride suur hulk ning nende unikaalsed omadused teevad vajalikuks kõigi spetsiifiliste karakteristikute defineerimise enne materjalide kommertskasutusse jõudmist. EAP seadmete laiemale turule jõudmise eelduseks on uute materjalide iseloomustamise meetodite ja testiprotokollide väljatöötamine ning polümeeride deformeerumist ja purunemist kirjeldavate täpsete teoreetiliste mudelite koostamine.

Olulisel määral võivad elektroaktiivsete polümeeride turu arengut lähiajal mõjutada järgmised tegurid:

- **Tootmisprotsesside ning materjalidele esitatavate nõuete standardiseerimine** – kuna EAP materjalide ning seadmete turg on varajases arengustaadiumis, siis ei ole tootjad täpselt defineerinud kõiki toodete omadusi. Samuti puuduvad tööstusharus standardiseeritud tootmis- ja testiprotokollid. Selle tulemusena on turul hulk erinevate tehniliste näitajatega lahendusi, mis ei ole üksteisega ühilduvad. Kindlate kvaliteedinõuete ning protokollide väljatöötamine on lähemal ajal ilmselgelt prioriteet, kuna EAP seadmete potentsiaalsed tarbijad kosmose- ja meditsiinisektori näol esitavad kõrgeid nõudmisi seadmete ning komponentide turvalisusele ja töökindlusele.
- Uutel tehnoloogiatel on keeruline saavutada kommertsiaalset edu ilma arenenud tootmise infrastruktuurita. EAP seadmete tootmise kui **tööstusharu kiireks kasvuks** on vajalik pooljuhtide tööstusele sarnase **komponentide valmistamise teenuse pakkujate võrgu (väärtusahela) kujunemine**, mis võimaldaks arendajatel vältida mahukaid kapitalipaigutusi mikrotootmise seadmetesse.
- **Äri- ning koostöömudelid** – kujunevate tööstusharude kasvuks on oluline hästi töötavate äri- ning koostöömudelite loomine. EAP materjalide ning komponentide valmistajate partneriteks on sageli meditsiineseadmete OEM-tootjad. Teisalt on lepingulisele mikrotootmisele keskendunud ettevõtted tegemas koostööd majasisest EAP alast arendust läbiviivate farmaatsia- ning biotehnoloogiafirmadega.

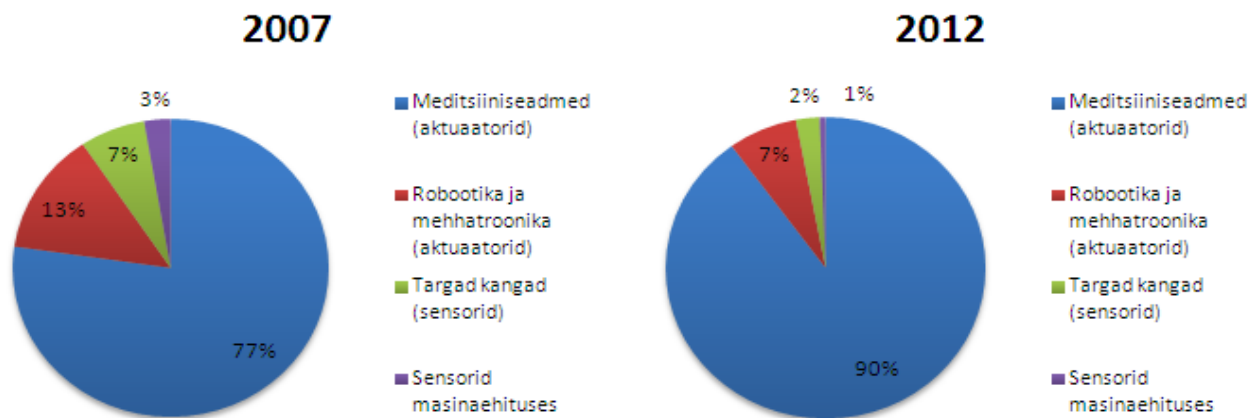
2.1 Elektroaktiivsete materjalide turg rakenduste kaupa

Elektroaktiivsete polümeeride rakenduste turumaht kasvab 2007. aasta 15 miljonilt dollarilt 247 miljoni dollarini 2012. aastal ehk kokku ligi 16,5 korda. Meditsiiniseadmete segment moodustab domineeriva turuosa nii 2007. kui ennustatavalt ka 2012. aastal. Selle põhjuseks on suurte meditsiiniseadmete tootjate aktiivne EAP materjalide alane uurimis- ning arendustöö, mille tulemusel on ettevõtted 2012. aastaks tõenäoliselt jõudnud kommersialiseerida esimesed märkimisväärsed müügikäibega mitteinvasiivsed tooted. Meditsiinitehnika valmistajate suur aktiivsus, võrreldes teiste tööstusharudega, on seotud EAP seadmete võrdlemisi madala töövoimsusega, mis ei luba neid veel kasutusele võtta suurt jõudu nõudvates rakendustes.

Tabel 3 Elektroaktiivsete polümeersete täiturite ning sensorite turg 2007 ja 2012 a.

Turg	2007 (milj. USD)	2007 (%)	2012 (milj. USD)	2012 (%)	AAGR ⁴ (%) 2006-2011
Meditsiiniseadmed (aktuaatorid)	11,6	77,3	222,5	90,0	80,5
Robootika ja mehhatroonika (aktuaatorid)	2,0	13,3	17,0	7,0	43
„Targad kangad” (sensorid)	1,0	6,7	6,0	2,4	41,4
Sensorid masinaehituses	0,4	2,7	1,5	0,6	30,2
Kokku	15,0	100,0	247,0	100,0	75,1
Sensorid kokku	12,6	84,0	228,5	92,5	78,5
Aktuaatorid kokku	2,4	16,0	18,5	7,5	50,4

Allikas: „Electroactive Polymer Actuators –Types, Applications, New Developments, Industry Structure and Global Markets“, Innovative Research and Products (iRAP) Inc.



Joonis 3 Elektroaktiivsete polümeeride rakenduste osakaalud koguturust 2007 ja 2012 a.

⁴ Keskmise aastane kasvumäär ehk AAGR –Average Annual Growth Rate.

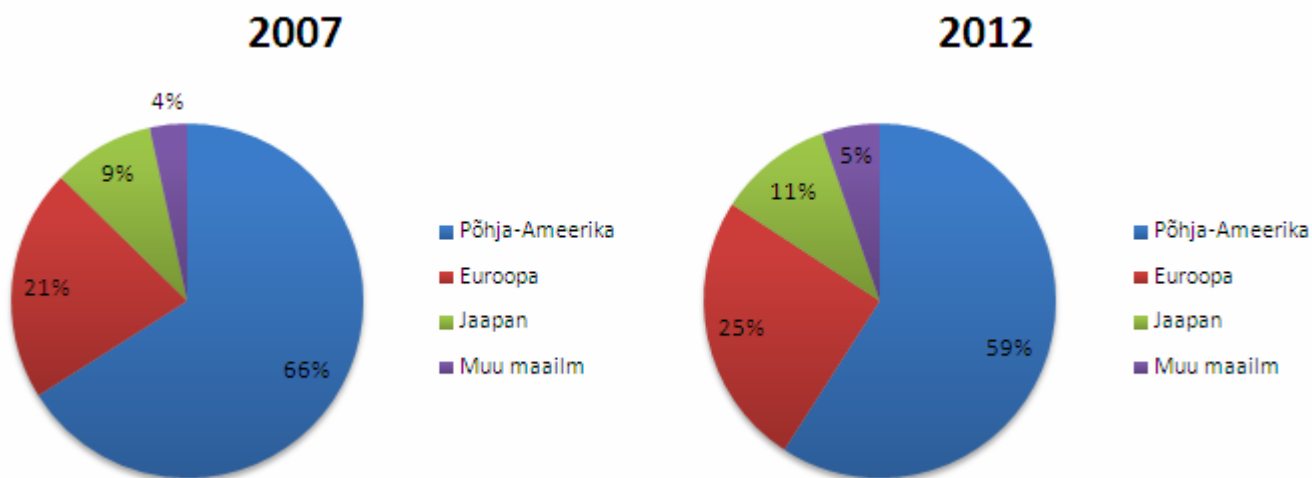
2.2 Elektroaktiivsete materjalide turg regioonide kaupa

Põhja-Ameerika on eeldatavasti ka 2012. aastal hoidmas juhtivat positsiooni EAP seadmete arenduses ning tootmises. Suurimat protsentuaalset kasvu näitab perioodil 2007-2012 Euroopa turg, kus üheks juhtivaks riigiks on Itaalia. Muu maailma piirkondadest on kiireima arenguga Kagu-Aasia, riikidest ennekõike Lõuna-Korea ning Hiina.

Tabel 4 EAP rakenduste turg riikide/regioonide kaupa 2007 ja 2012 a.

Riik/Regioon	2007 (milj. USD)	2012 (milj. USD)	AAGR % 2007-2012
Põhja-Ameerika	9,9	146,0	71,3%
Euroopa	3,2	62,0	80,9%
Jaapan	1,4	26,0	79,3%
Muu maailm	0,5	13,0	91,8%
Kokku	15,0	247,0	75,1%

Allikas: „Electroactive Polymer Actuators –Types, Applications, New Developments, Industry Structure and Global Markets“, Innovative Research and Products (iRAP) Inc.



Joonis 4 Elektroaktiivsete polümeeride rakenduste turg regioonide kaupa 2007 ja 2012 a.

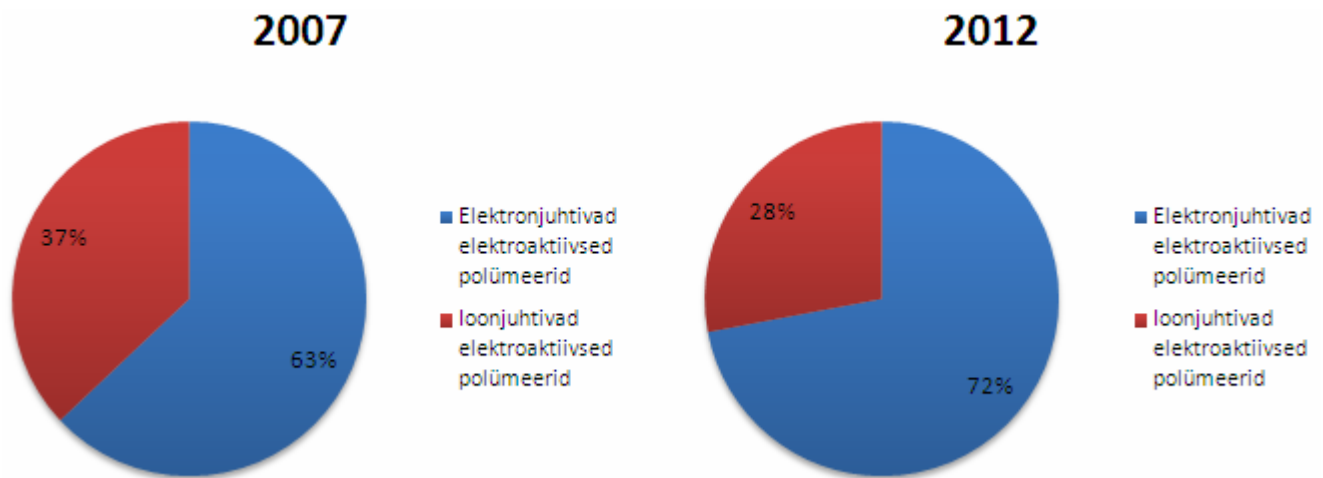
2.3 Elektroaktiivsete polümeeride turg materjalide kaupa

Elektronjuhtivate elektroaktiivsete polümeeride puhul leiavad enim rakendust dielektrilised elastomeerid. Ioonjuhtivatest polümeeridest on laiem kasutusega ioonjuhtivad polümeersed geelid ning ioonsed polümeermetall materjalid. Ioonjuhtivatest materjalidest suurima müügi-käibega Du Pont'i Nafion ning Asahi Glass'i Flemion.

Tabel 5 Elektroaktiivsete polümeeride turg materjalide kaupa 2007 ja 2012 a.

Tehnoloogia	2007 (milj. USD)	2012 (milj. USD)	AAGR % 2007-2012
Elektronjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid 1) dielektrilised elastomeerid	9,5	178,0	79,6%
Ioonjuhtivad elektroaktiivsed polümeerid 1) ioonjuhtivad polümeersed geelid 2) ioonsed polümeermetall materjalid	5,5	69,0	65,8%
Kokku	15,0	247,0	75,1%

Allikas: „Electroactive Polymer Actuators –Types, Applications, New Developments, Industry Structure and Global Markets“, Innovative Research and Products (iRAP) Inc.



Joonis 5 Elektroaktiivsete polümeersete materjalide turuosad 2007 ja 2012 a.

3. Elektroaktiivsete polümeeride rakendused

3.1 Meditsiinilised rakendused

3.1.1 Mikropumbad

Mikropumpadel on tähtis roll mitmete teaduslade ning tööstuste tulevikurakendustes. Laboritehnoloogias töstavad mikropumbad pipettide ning mikrotiiter-lahjendajate täpsust väga väikeste vedelike koguste mõõtmisel. Meditsiinis on nad võtmetähtsusega implantteeritavate dooseerimiseadmete, infusioonpumpade ning erinevate sulguriproteeside ehituses. Madalatemperatuursetes kütuseelementides (*Direct Methanol Fuel Cell*, DMFC) tagavad mikropumbad etanooli efektiivse ringlemise.

Rootsi ettevõtte Micromuscle⁵ EAP materjalid ning tehnoloogia on kasutuses Euroopa Liidu 6. raamprogrammi projektis IntelliDrug, mille tulemusel loodi miniatuurne ravimidosaator.⁶ IntelliDrug on suunatud eelkõige krooniliste haiguste põdejatele, kelle raviks või haiguse kontrolli all hoidmiseks on vajalik pidev ravimite manustamine. Suhu siirdatuna täiendavalt ka hambaproteesi ülesandeid täitev seadeldis koosneb ravimiga täidetud mahutist, ventiilist ning elektrooniliste anduritega varustatud polüpürrool mikrotäituritest.⁷

Sülg siseneb IntelliDrugis olevasse mahutisse läbi seda ümbritseva membraani, lahustab ravimit ja voolab läbi väikese kanali tagasi suuõõnde. Kanalis asuvad lahustunud ravimi kogust ja kontsentratsiooni jälgivad andurid, mis reguleerivad vastavalt vajadusele eraldatava ravimi kogust kas sulgedes või avades kanali otsas asuvat ventiili. Seadeldis mahutab kuni kahe nädala ravimivaru. Kui ravim hakkab lõppema, annab IntelliDrug sellest haigele märku. Tühjaks saanud seadeldise võib patsient ise uue vastu välja vahetada. Tühi seadeldis täidetakse uuesti, sel vahetatakse patarei ning seejärel on seade valmis uuesti kasutusse minema.

IntelliDrugi prototüüpi esitleti esmakordselt MedTec messil Stuttgartis 2007. aasta veebruaris. Nüüd viiakse selle testimiseks läbi kliinilised katsed, kasutades ravimina uimastite võõrutusraviks kasutatavat naltreksooni. Kui kliinilised katsed tõendavad seadme efektiivsust, võib see olla avalikkusele kättesaadav juba 2010. aastal.

3.1.2 MRT seadmed

Magnetresonantstomograafia (MRT) on meditsiiniline uuring, mille käigus saadakse inimkehast pilt tugevate magnetväljade ja raadiolainete abil. Signaalide registreerimiseks MRT abil kasutatakse magnetvälja asetatud vesiniku aatomite tuumade omadust neelata raadiolainete energiat. MRT-instrumendi põhikomponendiks on magnet, mille poolt tekitatava magnetvälja tugevus võib ületada kümneid tuhandeid kordi Maa magnetvälja tugevuse. Kujutiste saamiseks patsiendi erinevatest elunditest rakendatakse neile lisaks suure magneti püsi-

⁵ www.micromuscle.com

⁶ www.intellidrug.org

⁷ Goettsche et al. "Highly Integrated Oral Drug Delivery System With Valve Based On Electro-Active-Polymer", IEEE 20th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2007

magnetväljale veel teatavaid magnetvälja gradiente ning raadiolainete impulsse, seejärel registreeritakse patsiendi vesiniku aatomite tuumade reaktsioon genereeritud ergastusele. Kujutuse signaalidetektsioon toimub elektromagneetilise induksiooni põhimõttel, mille käigus indutseeritakse "antennidena" toimivates mähistes või poolides pinge. Saadud andmete põhjal on võimalik arvuti abil konstrueerida erinevate elundite kujutisi, mis annavad asendamatu informatsiooni meditsiiniliseks diagnostikaks.

Kuna olemasolevate teadmiste põhjal magnetväli tervist ei kahjusta, peetakse MRT-d ohutuks, võrreldes näiteks röntgenikiirgusel põhinevate meetoditega, sealhulgas kompuutertomograafia, röntgenangiograafia ja tavaröntgen, milledega kaasneb kahjulik ioniseeriv kiirgus.

MRT uuringu käigus saadava kujutise kvaliteet sõltub paljuski signaali vastu võtva pooli tundlikkusest, mille optimaalne tase erineb sõltuvalt uuritavast kehapiirkonnast. Parima kujutise kvaliteedi saavutamiseks tuleb igaks uuringuks valida õige suurusega pool, mis vastab vaadeldava organi omadustele. Poolide vahetamine on aga aega nõudev protsess, mis tõstab protseduuri hinda ning vähendab seadme produktiivsust.

EAP täiturite abil on võimalik muuta spetsiaalse konstruktsiooniga poolide suurust MRT seadmes, ilma neid sellest eraldamata. Erinevalt elektromehhanilistest täituritest, mille kasutamist sellistes ülesannetes ei luba väga tugevad magnetväljad, on EAP aktuaatorid MRT seadmetes igati töökindlad ning vastupidavad. Poolide dimensioonide muutmise vahemikud sõltuvad EAP täiturite arvust – täiendavate binaarsete aktuaatorite lisamine võimaldab poolide suurust muuta sujuvamalt, ilma defineeritud astmeteta.⁸

3.1.3 Kateetrid

Üheks esimeseks EAP materjalidel põhineva meditsiiniseadme prototüübiks oli 1999. aastal Jaapani Osaka rahvuslikus uurimisinstituudis loodud juhitud intravaskulaarne kateeter, mille valmistamiseks kasutati kullast elektroodidega kaetudioonjuhtivat polümeeri. 0,6 millimeetrise läbimõõduga toru pinnale kantud elektroodid jaotati kogu kateetri pikkuses neljaks segmendiks, mis võimaldas seadet liigutada igas suunas kuni 90 kraadi suuruse nurga ulatuses.⁹

Kateetrid (*guide catheter*) on tänapäeva meditsiinis laialdaselt kasutusel veresoonte, südame ja koronaararterite kateteriseerimisel. Kateetrite kaudu viiakse kehasse koronaarangioplastika ja stentimise teostamise vahendid, radiograafilised kontrastained ning invasiivse elektrofüsio- loogia seadmed.

Maaailma suurimate meditsiiniseadmete tootjate hulka kuuluv USA ettevõtte Boston Scientific¹⁰ on välja töötanud EAP aktuaatoritega varustatud suunatavad kateetrid, mida

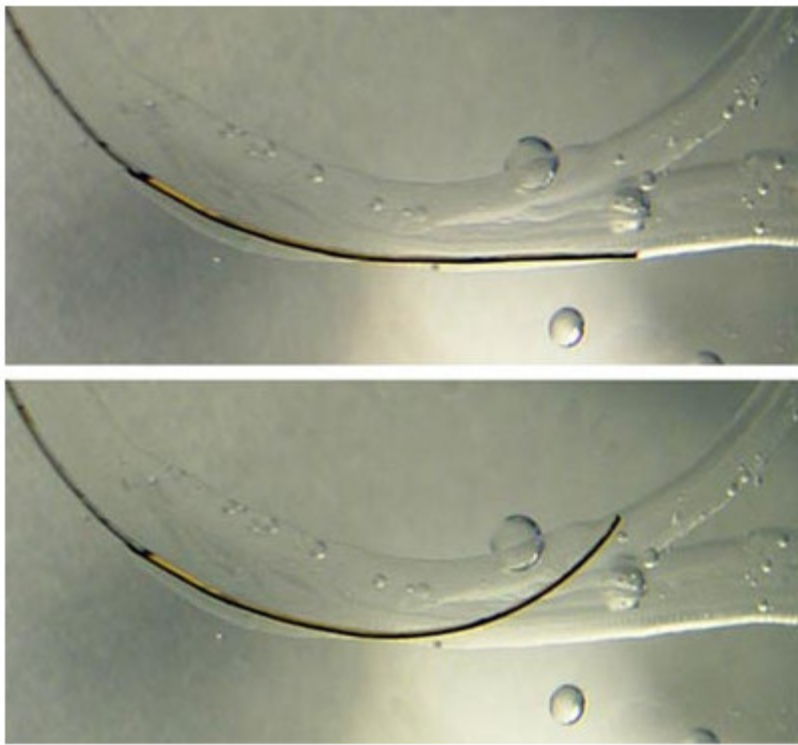
⁸ DF Kacher, J Vogan, A Wingert, M Hafez, J-S Plante, S Dubowsky, FA Jolesz. "Development of a Reconfigurable MRI Coil using Electrostrictive Polymer Artificial Muscle Actuators," Proceedings of the International Society of Magnetic Resonance in Medicine p3394, (May, 2004) Kyoto, Japan.

⁹ http://ndeaa.jpl.nasa.gov/nasa-nde/newsltr/WW-EAP_Newsletter1-1.pdf

¹⁰ www.bostonscientific.com/home.bsci

võivad juhtida pildidiagnostika andmete põhjal vajaliku seadme kuju arvutavad algoritmid. Kogu protseduuri käigus sooritatud liikumine on võimalik salvestada ning vajaduse korral taas kateetri juhtsüsteemi sisestada. Polüaniliinist, polüpürroolist, polüsulfoonist või polüatsetüleenist valmistatud täiturid paiknevad kogu kateetri ulatuses ning neid on võimalik üksteisega lukustada, nii et seadme kuju fikseerub jäigalt. Sellise kateetri peamiseks eeliseks on tunduvalt parem ligipääs anotoomiliselt keeruka lokalisatsiooniga kehapiirkondadesse.

Sarnase lahenduse võimalusi on uurinud ka Rootsi Micromuscle AB, kus on valmistatud EAP materjaliga kaetud ning patsiendi kehas suunatava kateteerimise juhtetraadi prototüüp. Traadi liikumine erinevate positsioonide vahel toimub pinge rakendamisel mõne sekundi jooksul. Viimaste aastate jooksul on analoogseid kättesaadavastioonjuhtivast polümeerist Nafion koosnevaid kateetrite ning endoskoopide mudeleid loonud mitmed akadeemilised uurimisgrupid.¹¹¹²



Joonis 6 Micromuscle AB poolt väljatöötatud painutatav juhtetraat

¹¹ Fang et al. „A new approach to develop ionic polymer–metal composites (IPMC) actuator: Fabrication and control for active catheter systems“, *Sensors and Actuators A* 137 (2007) 321–329

¹² W. Jong Yoon, Per G. Reinhall, Eric J. Seibel, “Analysis of electro-active polymer bending: A component in a low cost ultrathin scanning endoscope”, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 133, 12 February 2007, 506-517

3.1.4 Nägemisteravuse korrigeerimine

USAs Virginia osariigis tegutsev Environmental Robots Inc.¹³ on koostöös oftalmoloogia ettevõtetega arendamas transkutaanselt induktsioonivooluga juhitavaid EAP kunstlihastest implantaate, mis sobivad silma refraktsioonihäirete, nagu näiteks presbüopia, hüperoopia, müoopia ning astigmatism kirurgiliseks parandamiseks.

Inimeste suutlikkus fokuseerida ehk näha hästi esemeid, mis asetsevad silmast erisugustel kaugustel, on võimalik tänu akommodatsioonile, s.o. silma võimele tugevdada ja nõrgendada refraktsiooni. Silma refraktsioonihäired tähendavad seda, et sisenevad valguskiired ei tekita silma võrkkestale tervalt fokuseeritud kujutist. Müoopia e. lühinägevuse korral on silmamuna läbimõõt valgustmurdva süsteemi tugevuse suhtes liialt pikk s.t kujutis tekib võrkkesta ees – korrigeerimiseks kasutatakse valgust hajutavaid läätsi (miinusklaasidega prille). Hüperoopia e. kaugelenägevuse puhul on silmamuna dioptrilise aparadi optilise tugevuse suhtes liiga lühike, s.t kiired fokuseeruvad võrkkesta taha – korrigeerimiseks kasutatakse valguskiiri koondavaid läätsi (plussklaasidega prille). Presbüopia on üks hüperoopia alavorm. Astigmatism on põhjustatud sarvkesta või silmaläätse ebakorrapärasest kujust, mis omades erinevaid kumerusi erinevates telgedes põhjustab osade valguskiirte langemise võrkkesta ette ja osade valguskiirte langemise võrkkesta taha – korrigeerimiseks kasutatakse silindrikujulisi läätsi.

Environmental Robots-i patendid US6511508 ning US7090696¹⁴ kirjeldavad refraktsioonivigade korrigeerimiseks mõeldud mitteinvasiivset seadet, mille keskseks komponendiks on elektroaktiivsest polümeerist koosnev muudetava läbimõõduga rõngas või rõnga segmendid. Skleerale ehk kõvakestale kinnitatuna võimaldab mikrokiibi poolt juhitud EAP materjalist rõngas kokkutõmbumise või paisumise teel muuta silmamuna läbimõõtu nägemistele suunas (kutsudes esile ajutise müoopia või presbüopia). Selle tulemusel liigub võrkkesta tasapind valguskiirte fookusesse ning taastub terav nägemine. Seadme vooluallikas on implanteeritud patsiendi naha alla või kinnitatud näiteks kõrva taha. Mõlemal juhul on seadme töö patsiendi poolt täielikult kontrollitav, mistõttu võib seadet iseloomustada kui implanteeritud prille või kontaktläätsesid.

3.1.5 Ühekordsed infusioonipumbad

Ühendriikide ettevõtte Medipacs on välja töötanud EAP materjalidest koostatud infusioonipumba *Pulse Activated Cell System* (PACS), mis on kerge, programmeeritav ning tunduvalt täpsem kui teised tänapäeval levinud ühekordsed pumbad¹⁵. Selline liikuvate mehhaaniliste osadeta ning odav infusioonipumba konstruktsioon on täielikult skaleeritav, mis võimaldab sama tehnoloogiaga valmistatud seadmeid rakendada kehale kinnitatavates ravimi mikrodosaatorites või erakorralises meditsiinis kasutatavates suure läbilaskevõimega pumpades.

¹³ www.environmental-robots.com

¹⁴ <http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPODOC&IDX=US2003139808&F=0>

¹⁵ www.medipacs.com

Aparatuur koosneb paljudest digitaalselt kontrollitud täituriga varustatud kambritest, mis kordamööda sulgudes ning avanedes pumpavad vedelikku täpselt defineeritud kogustes ning kindla kiiruse ja rõhuga. Ettevõtte poolt arendatud teises testversioonis on tööd tegevaks materjaliks bioloogiliselt sobiv polümeerne geel, mis deformeerub elektripingel toimel. Arvutikiibi poolt kontrollitud mobiiltelefoni suurune pump töötab pingel 3V ning on katsetes näidanud head töökindlust rõhul üle 0,2 bar.

Tabel 6 EAP meditsiiniseadmete turg 2007 ja 2012 a.

	Kokku seadmeid	Turu hõivamine saja ühiku kohta	EAP seadme hind ja müügiimaht	EAP seadmete turg (milj. USD)
2007				
Mikropumbad	300 miljonit	0,05	\$10/0,15 milj	1,5
Kateetrid	vt. lisa	0,015	vt. lisa	1,2
MRT seadmed	vt. lisa	0,005	vt. lisa	3,2
Nägemisteravuse korrigeerimine	vt. lisa	0,02	vt. lisa	0,7
Ühekordsed infusioonpumbad	330 miljonit	0,15	\$10/0,5 milj	5,0
Kokku				11,6
2012				
Mikropumbad	900 miljonit	0,5	\$9/4,5 milj	40,5
Kateetrid	vt. lisa	0,2	vt. lisa	33,4
MRT seadmed	vt. lisa	0,1	vt. lisa	83,6
Nägemisteravuse korrigeerimine	vt. lisa	0,03	vt. lisa	15,0
Ühekordsed infusioonpumbad	350 miljonit	1,78	\$8/6,25 milj	50,0
Kokku				222,5

Allikas: „Electroactive Polymer Actuators –Types, Applications, New Developments, Industry Structure and Global Markets“, Innovative Research and Products (iRAP) Inc.

Lisa:

2007 Kateetrid – turu kogumaht 7,956 miljardit dollarit ja turu hõivamine 0,015

2007 MRT seadmed – turu kogumaht 63,648 miljardit dollarit ja turu hõivamine 0,005

2007 nägemise korrigeerimine – turu kogumaht 3,5 miljardit dollarit ja turu hõivamine 0,02

2012 Kateetrid – turu kogumaht 16,7 miljardit dollarit ja turu hõivamine 0,2

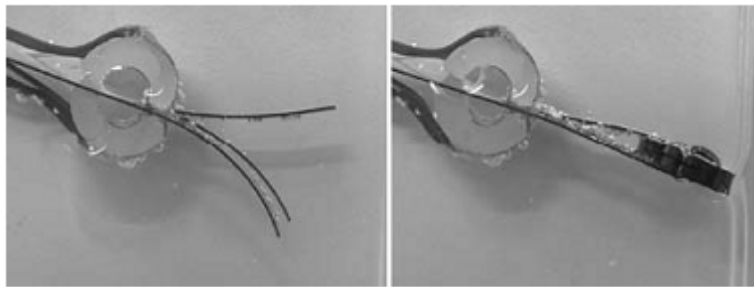
2012 nägemise korrigeerimine – turu kogumaht 50 miljardit dollarit ja turu hõivamine saja ühiku kohta 0,03

3.2 Robotika ja mehhatroonika rakendused

Teedrajavaks sammuks EAP täituritega robotite arengus oli 2002. aasta detsembris Jaapani Eamex Corporationi poolt esitletud „robot-kala“ Fish-Robot, mis oli esimene elektroaktiivsete polümeeride kommertsiaalne rakendus.¹⁶

Praktikas omavad EAP täituriid kõige suuremat mõju ilmselt mikrorobotika arengule, kuna üksikuid rakke või molekulide kogumeid liigutavate mikroskoopiliste robotite ehituses ei ole mehhaaniliste komponentide kasutamine võimalik. Lee et al. näitasid, et EAP materjalid toimivad efektiivselt täituritena ka nanomõõtmetes. Eksperimendi käigus saavutati 50 nm läbimõõduga ning 6 µm pikkuste polüpürrool (ioonjuhtiv materjal) nanotorude taastuvaks deformatsiooniks 36%. Sellised tulemused lubavad EAP materjalidele suurt tulevikupotentiaali nanorobotite ning nano-elektromehaaniliste süsteemide ehituses.¹⁷

Jaapani RIKEN instituudi teadlased on loonud ioonsest polümeermetall materjalist Nafion 117 mikroroboti prototüübi.¹⁸ Haaratsitega DOF (*degree-of-freedom*) roboti ülesandeks on sooritada mikromanipulatsioone kõikvõimalikes meditsiini- ja biotehnoloogia rakendustes. Parema liikuvuse saamiseks lõigati laseriga polümeeri katvasse elektroodi muster, mis jagas materjali erinevateks juhitudavateks sektsioonideks.



Joonis 7 Jaapani RIKEN instituudi teadlaste loodud mikrorobot. Manipulaator avatud positsioonis ning haaramas.

EAP aktuaatorite kasutamine kosmoserobotites pakub mitmeid olulisi eeliseid, võrreldes tavapärase mehhaaniliste komponentidega. Esiteks võimaldab väiksem liikuvate osade hulk seadmes tõsta selle vastupidavust ning töökindlust. Teiseks kaasneb ennekõige metallist valmistatud komponentide asendamisega kokkuhoid süsteemi kaalus ning ruumalas. See aspekt on eriti tähtis kosmoseseadmete ülesviimisel ning navigeerimisel, kus kasuliku koorma kompaktsus aitab saavutada ressursside efektiivsemat kasutust.

2007. aastal valmis Rooma ning Pisa ülikooli teadlaste koostöös Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA) programmi *EAP-based artificial muscles as an alternative to space mechanisms* raames EAP täitureid kasutava marsiroboti kontseptsioon. Sfäärikujuuline tuule jõul liikuv kulgur kasutab

¹⁶ http://www.eamex.co.jp/product_e.html

¹⁷ Lee et al. „Electroactive Polymer Actuation at the Nanoscale“, Nanotechnology, 2006. IEEE-NANO 2006. Volume 2

¹⁸ http://www.bmc.riken.jp/index_en.html

suuremate takistuste ületamiseks Pisa ülikoolis välja töötatud dielektrilise elastomeeri heeliksist koosnevad lineaartäiturit.¹⁹ Simulatsioonide tulemusena saavutati seadme vertikaalne liikumine 7% ulatusest sfääri diameetrist.²⁰

Ameerika Ühendriikide kosmoseuuringute keskuse NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) uurimiskeskuses on arendamisel kõndivad mitmejalgsed kosmoserobotid, mida plaanitakse kasutada planeetide uurimiseks. JPL-i teadlase ning ühe enimsiteeritud EAP materjalide uurija Yoseph Bar-Coheni juhtimisel on läbi viidud esimesed praktilised katsed mehhaaniliste komponentide asendamiseks elektroaktiivsete polümeersete täituritega sellistes seadmetes.²¹

Kuna kosmosetehnoloogia tellimused eeldavad vaid väikese koguse spetsiifilistele ning karmidele nõuetele vastavate seadmete tootmist, siis on kosmoseaparatuuri komponentide valmistamine kasvavale ja arenevale EAP tööstusele heaks võimaluseks eksperimenteerida uute materjalide ja disainilahendustega. Sellise praktilise väljundiga „katsepolügooni“ olemasolu töötab veelgi kiirendada arendustegevust ning lubab ennast missioonikriitilistes rakendustes tõestanud tehnikal kiiremini laiale turule jõuda.

Robootika EAP rakenduste üheks olulisemaks tarbijaks või osutuda meelelahutustööstus, kes kulutab aastas enam kui 2 miljardit dollarit tegelaskujude animeerimiseks mõeldud robotitele.²² Kõige kaugemale on selliste EAP lihastega robotite arenduses jõudnud Hanson Robotics²³, kelle *HumanKind* ja *RoboKind* tooted on lisaks varustatud keeruka sensoorse süsteemi ning tehisintellekti tarkvaraga.

Tabel 7 EAP seadmed meditsiini- ning mängurobotites 2007 ja 2012 a.

2007	Kokku	Turu hõivamine saja ühiku kohta	EAP seadme hind ja müügimaht	EAP seadmete turg (milj. USD)
Meditsiinirobotid	653	0,85	\$450/22	0,01
Mängurobotid	222000	18,4	\$20/40848	0,9
Kokku				0,91
2012				
Meditsiinirobotid	5650	10	\$400/2260	0,9
Mängurobotid	429000	60	\$20/257400	5,1
Kokku				6,0

Allikas: „Electroactive Polymer Actuators –Types, Applications, New Developments, Industry Structure and Global Markets“, Innovative Research and Products (iRAP) Inc.

Tabel ei hõlma endas kosmose- ning militaarotstarbelisi roboteid

¹⁹ Carpi et al. “Helical dielectric elastomer actuators”, Smart Materials and Structures 14 (2005) 1210–1216

²⁰ Carpi et al. „Martian Jumping Rover Equipped with Electroactive Polymer Actuators: A Preliminary Study“, IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 43, NO. 1 JANUARY 2007

²¹ <http://eis.jpl.nasa.gov/ndeaa/nasa-nde/nde-aa-l/nde-aa-l.htm>

²² <http://ndeaa.jpl.nasa.gov/ndeaa-pub/SPIE-2001/Paper-SPIE-4329-74-entertainment.pdf>

²³ <http://www.hansonrobotics.com>

3.4 Sensorite rakendused ehituses

USA ettevõtte Discover Technologies Inc. on USA Laevastiku Uurimiskeskuse (US Office of Naval Research) tellimusel arendamas ionomeeranduritel põhinevaid nihkepinge sensoreid, mida kasutatakse kiiresti liikuvate veesõidukite kerele hõõrdumisest tekkivate takistusjõudude mõõtmiseks.²⁴

Suurte turbulentsete voolude tõttu rakenduvad veesõidukitele kiiresti ning laias vahemikus kõikuvad koormused, mis on tihti peale kontsentreeritud laeva kere kitsale piirkonnale. Nende koormuste kujunemise täpsem mõistmine on üheks oluliseks eelduseks kütusesäästlikumate, vaiksamate, parema manööverdusvõimega ning kiiremate laevade ehitamisel.

Ioonjuhtivast polümeerist Nafion 117 valmistatud EAP andurite eelis teiste mõõtmistehnoloogiate ees seisneb võimaluses mõõta mõjuvaid jõudusid otse, mitte tuletades neid vee voolukiiruse või soojuslevi näitajate kaudu. Samuti ei mõjuta kompaktsed sensorid laeva sõiduomadusi ning võimaldavad seetõttu saada väga täpseid mõõtmistulemusi. Nad on mehhaaniliste sensoritega võrreldes märgatavalt vastupidavamad vibratsioonile, temperatuurikõikumistele ning teistele keskkonnatingumustele.

3.5 Kantavate dielektrilistel elastomeeridel põhinevate sensorite ja aktuaatorite rakendused

Viimase kümnendi jooksul on kommunikatsiooni- ja infotehnoloogia arengu üheks tähtsamaks trendiks olnud kõikvõimalike teenuste ning andmevoogude täpsem personaliseerimine. Personaalse tervishoiu ning tervisteenuste seisukohalt on üheks lootustandvaks tehnoloogiaks „targad“ või „intelligentsed“ kangad, mille potentsiaalseteks rakendusteks on tervise monitooring, rehabilitatsioon, telemeditsiin, spordimeditsiin, ergonoomika. Tervise jälgimise võimalusi laiendaksid märgatavalt rõivastesse paigutatud painduvad ja kerged andurid, mis mõõdavad inimese kehatemperatuuri, südame tööd, hingamist, aga ka erinevate kehaosade positsiooni ja liikumist.

Juhtmevaba andmeühenduse kaudu võib selline sensorsüsteem näiteks anda treenerile informatsiooni sportlase organismi seisukorrast või hoiatada haiget jälgivat töötajat ohtlikest häiretest patsiendi füsioloogilistes muutujates. Tekstiili integreeritud inimese lihastele sarnanevad aktuaatorid võivad osutada asendamatuks rehabilitatsiooniprotsessis, pakkudes tuge vigastatud mootorsetele funktsioonidele või abistades füsioterapetilises ravis.

Eelpool mainitud lahenduste reaalset kasutuselevõttu on ennekõike piiranud kättesaadava tehnoloogia kohmakus ning vähene vastupidavus. EAP materjalid on aga väga elastsed ja kerged ning neid on võimalik paigutada kangale õhukeste kihtidena, mis ei piira kandja liikumisvabadust. Vajadusel saab neid kududa ka fiibrina kokku teiste materjalidega. Kuna elektroaktiivsetes polümeerides toimuvad protsessid on pööratavad, siis on nad omadustelt

²⁴ <http://www.discover-technologies.com/applications.html>

multifunktsionaalsed ehk võimelised toimima ühes konfiguratsioonis nii täituri kui ka sensorina.

Eluliste näitajate, nagu pulsi ja hingamise jälgimiseks sobivad orgaanilised piesoelektrilised sensorid, mis maksimaalse mugavuse saavutamiseks peaksid olema rõivastesse kootud. Katsetes enim kasutatav piesoelektriline polümeer on polüvinülideendifluoriid (PVDF). Piesoelektrilised polümeerid ehk elektreedid on dielektrikud, mis elektrivälja mõju lakkamisel säilitavad polariseerituse, olles seega püsivmagneti analoogid. Polümeeri deformeerudes aga tekivad selle poolustele laengud, mida on võimalik kindlaks teha asetades materjal elektroodide vahele. Polümeersed elektreedid on kasutusel ennekõike sensorite ehituses, kuna väikese jõu ja deformeeruvuse tõttu on nende kasutamine täiturites ebapraktiline.

Inimese keha kinemaatika – kehaosade positsiooni ja liikumise – jälgimiseks on rõivastes kasutatud piesotakistuslikke sensoreid, mille elektritakistus muutub vastavalt deformeermisele. Puuvill-lycra segust kangale kantud juhtiva polümeeri (CP) polüpürrooli epitaksiaalkiled on mitmetes prototüüpides näidanud häid piesotakistuslikke omadusi. Pisa Ülikoolis on sellise tehnoloogia abil loodud mitmeid andurite abil kehaosade liikumist arvutile edastavaid riideesemeid. Täielikult võimaldavad kõiki andureid kangastesse peita musta süsinikuga segatud elastomeerid (*carbon-loaded elastomer*, CLR), mis kantakse maskide abil kangale nii, et juhtiv polümeer toimib ise ka anduritest andmeid edastava ühendusena. Aastatel 2002-2005 loodi Euroopa Liidu prorgammi WEALTHY (*Wearable Health Care System*) raames mitmeid CLR tehnoloogial põhinevaid monitooringusüsteemide prototüüpe.²⁵

Intelligentsete kangaste ning neist valmistatud rõivaste arendusse on juba pea kahe kümnendi jooksul investeerinud ka USA kaitseministeeriumi sõjaliseks kasutuseks mõeldud uue tehnika arendamise keskus DARPA (*The Defense Advanced Research Projects Agency*), kelle eesmärgiks on lahinguväljal sõdurite tervislikku seisundit jälgiva süsteemi loomine. Selline sensoritega kaitserõivastus lubaks vajaduse korral kiiresti selgitada sõduri saadud vigastuste tõsidust ning vajadust meditsiinilise abi järele. Süsteemi kaudu reaajas kogutav informatsioon vägede võitlusvõime kohta võimaldab jagada üksuseid sõjaväljal efektiivsemalt ning ennetada lisajõudude tekkmise vajadust positsioonidel. DARPA toetatud uuringute tulemusena on uurimisinstituudis SRI International valminud ka sõdurisaapa talda integreeritud elektrigeneraatori mudel, mis suudaks varustada toitega näiteks kaasaskantavaid kommunikatsioonisüsteeme või meelelahtusseadmeid tsiviilrakenduses.²⁶ Saapa kontsas paiknev dielektriline elastomeer täitur genereerib käimisel võimsust 1-10 W.

Tabel 8 EAP rakendused tarkades kangastes ning rõivastes 2007. ja 2012. a.

	Tarkade kangaste ning rõivaste turg (milj. USD)	Turu hõivamine %	EAP seadmete turg (milj. USD)
2007	605	0,33	2
2012	1517	1,12	17

Allikas: Smart Fabrics, 2nd Annual Event; „Electroactive Polymer Actuators –Types, Applications, New Developments, Industry Structure and Global Markets“, Innovative Research and Products (iRAP) Inc.

²⁵ <http://www.wealthy-ist.com>

²⁶ <http://folk.ntnu.no/keshengw/cit/ArtificialMuscle.ppt>

4. EAP materjalide, komponentide ning seadmete tootjad

2007. aastal oli EAP materjalide, komponentide ning seadmete valmistajate tootmine keskendunud väikestele ja keskmise suurusega tellimustele teadustööga tegelevatelt institutsioonidelt. Kõigi selliste tellimuste puhul on tooted eraldi kohandatud ostja poolt esitatud spetsiifilistele nõuetele. Piiratud tellimusmahtude tõttu toimub valdav enamus EAP tehnoloogiatega seotud tootmist laboritingimustes või miniatuursetel liinidel, mis võimaldavad kõigi partiide spetsifikatsioone vastavalt kliendi nõuetele muuta. Kindlate standardiseeritud parameetrite puudumine on aga üheks oluliseks probleemiks, mis võib küsimusele piisavalt tähelepanu pööramata takistada tulevikus EAP tehnoloogia laiemat kommersialiseerimist.

EAP tehnoloogia tööstusharu küpsemine jätkub kiirenevas tempos aastatel 2008-2012, mil üheks olulisemaks arenguks saab olema strateegiliste koostöömodelite kujunemine materjalide, komponentide ning seadmete tootjate ning lõpptoodete valmistajate vahel. Mõningad EAP tehnoloogia firmad on juba alustanud seadmete arendamist ning tootmist tihedamas partnerluses lõpptootjatega. Üheks selliseks ettevõtteks on Rootsi Micromuscle AB, kes on kaasanud mitmete tehnoloogiate väljatöötamisse maailmanimega meditsiiniseadmete tootjaid.

EAP tehnoloogiale spetsialiseerunud firmade olulisemateks klientideks võib pidada meditsiiniseadmete valmistajaid ning robotikale ja tarkadele kangastele spetsialiseerunud ettevõtteid. Pakkumise seisukohalt vaadatuna võib turu jagada kaheks – lõpptoodete valmistajad, kellel on majasisene EAP seadmete arendus- ja tootmisprogramm ning EAP tehnoloogiale spetsialiseerunud ettevõtted.

Enamus EAP materjalide, komponentide ning seadmete tootjaid on keskendunud kindlale rakenduste segmendile. Eriti kehtib see EAP tehnoloogiale keskendunud ettevõtete kohta, kelle tegevus toetub sageli akadeemilise või/ja teadusliku põhjaga spetsiifilisele oskusteabele. Laiemat spektrit tooteid pakuvad ennekõike suured lõpptoodete valmistajad. Seetõttu erineb konkurentsimaastik erinevate EAP tehnoloogiate lõikes märkimisväärselt.

Olulisemad EAP tehnoloogia ettevõtted tegevusalade lõikes on järgmised:

- Meditsiiniseadmete lõpptootjad – Boston Scientific Inc, Ethicon Endo-Surgery, Inc, Chip Rx, Tyco International, St. Jude Medical, Inmersion, Cordis Corporation (Johnson & Johnson tütarettevõte) Schering-Plough Corporation
- Robotite tootjad – Hanson Robotics
- Tarkade kangaste tootjad – Sensatex, Inc.,
- Ionomeer sensorite ning nihkepinge sensorite valmistajad – Discover Technologies, Inc.
- EAP tehnoloogiale spetsialiseerunud ettevõtted – Artificial Muscle, Inc., Eamex Corporation, Environmental Robots Inc., Micromuscle AB, Ecole Professionnelle de Martigny, Ophthalmotronics Corporation.

Tabel 9 Juhtivad EAP seadmete valmistajad ning nende tegevusalad

Ettevõtte	1	2	3	4
Artificial Muscle, Inc. (USA)		x	x	
Boston Scientific Scimed, Inc. (USA)	x			
Chip Rx, Inc. (USA)		x	x	
Danfoss A/S (Taani)	x	x	x	
Discover Technologies Inc. (USA)		x		
Eamex Corporation (Jaapan)	x	x	x	
Environmental Robots Inc. (USA)		x	x	
Ecole Professionnelle de Martigny, EPMA (Šveits)		x	x	
Ethicon Endo-Surgery, Inc. (USA)	x			
Hanson Robotics (USA)			x	
Micromuscle AB (Rootsi)	x			
Medipacs, Inc. (USA)	x			
Ophthalmotronics Corporation (USA)	x			
Scimed Life Systems Inc. (USA)	x			
Sensatex, Inc. (USA)				x

1. Meditsiiniseadmed; mikropumbad ja mikroklapid, poolid MRT seadmetes, nägemisteravuse korrigeerimine, ühekordsed infusioonpumbad.

2. Sensorid ehituses

3. Mehhatroonika ja robotika rakendused (väljaarvatud kosmose- ning sõjatööstus)

4. Targad kangad

Kõige suuremat turuosa hoiavad EAP täiturite segmendis Jaapani Eamex Corporation, Ühendriikide Environmental Robotics ning Rootsi Micromuscle AB. Teised ettevõtted ei ole veel alustanud suuremahulist kommertsiaalset tootmist. Medipacs, Inc. on demonstreerinud funktsioneerivat EAP materjalidel põhinevat infusioonpumba mudelit, mille reaalsel tootmist soovitakse alustada 2008. või 2009. aastal.

Tabel 10 Elektroaktiivsete polümeersete täiturite tootjad ja turuosad

Ettevõtte	Turuosa %
Eamex Corporation (Jaapan)	22%
Environmental Robots Inc. (USA)	20%
Micromuscle AB (Rootsi)	10%
Teised tootjad (Artificial Muscle, Inc., EPMA, Medipacs, Inc.)	48%
Kokku	100%

Lõpptoodete valmistajad investeerivad EAP tehnoloogiasse eesmärgiga saavutada enda kesksetes tootesegmentides tehnoloogilist ning funktsionaalset eelist konkurentide ees. Samas on tänu meditsiinitööstuses valitsevale tugevale hinnasurvele EAP seadmed muutumas eraldiseisvaks kõrgemat kasumimarginaali pakkuvaks turusegmendiks. Lähtuvalt sellistest arengutest on mitmed suured meditsiiniseadmete tootjad (Boston Scientific, St Jude Medical) asutanud spetsiaalselt EAP komponentide arendamisele ning valmistamisele keskendunud üksused.

EAP tehnoloogiale spetsialiseerunud ettevõtete eesmärgiks on keskenduda kindlale kitsale rakendusele ja turusegmendile. Enamasti võimaldab selline lähenemine maksimaalselt võimendada väga spetsiifilisest oskusteabest tulenevat konkurentsieelist. Olulisemateks EAP ettevõtete edu mõjutavateks faktoriteks on:

- Oskusteabe efektiivne tõlgendamine reaalseks rakendusteks
- Pikaajalise strateegia väljatöötamine. Uute tehnoloogiliste lahenduste arendus on ajamahukas protsess, mistõttu on vajalik potentsiaalsete sihtturgude täpne defineerimine.
- EAP materjalide omaduste kohandamine vastavalt konkreetsele rakendusele (ilmselgelt on näiteks tööstuslikes robotites ning meditsiiniseadmetes kasutatavatele täituritele esitatavad nõudmised märkimisväärselt erinevad).
- Võime investeerida märkimisväärsed vahendeid teadus – ja arendustöösse.
- Terviklik kvaliteedijuhtimine.