

Molekulaarisen nanoteknologian toteutettavuus

Fysiikan Laudatur-seminaari 29.3.04

1. Johdanto

Nanoteknologialla tarkoitetaan nykyään monia eri tutkimusaloja joita yleensä yhdistää sellaisten rakenteiden luominen, joiden rakennuselementtien suuruusluokka on alle ~100 nm. Tähän kategoriaan katsotaan tällä hetkellä mm. nanoputkien, nanoelektroniikan ja nanopinnoitteiden tutkimus. Rahoitusteknisistä syistä yhä useammat tutkimusalat on viime vuosina haluttu liittää nano-taivasalan alle.

Alkuperäinen Eric Drexlerin lanseeraama nanoteknologian määritelmä oli kuitenkin täsmällisempi. Hän erotteli kahdentyyppiset teknologiat materiaalien ja komponenttien tuottamiseen: toisaalta tutun *bulkki-teknologian*, jossa atomeja ja molekyyliä käsitellään yhtenäisenä massana (bulk), ja toisaalta *molekulaarisen teknologian* tai *nanoteknologian*, jossa hallitaan täsmällisesti atomien ja molekyylien sijainti väli- ja lopputuotteissa (Drexler, 1986). Drexler on myöhemmin yhdistänyt jälkimmäiset termit *molekulaariseksi nanoteknologiaksi* (MNT) erotuksena muista nanoteknologian haaroista. MNT:aa voidaan pitää nanoteknologian yleisimpänä muotona, josta muut nanoteknologian sovellukset voidaan teoriassa johtaa, mutta MNT edustaa kuitenkin hyvin erilaista paradigmaa kuin se johon perinteinen orgaaninen kemia ja esim. nanoputket perustuvat.

MNT:n etuja bulk-teknologiaan nähden katsotaan yleensä olevan mm. lopputuotteiden pieni kitka ja tehokkuus, mahdollisuus valmistaa rakenteita jotka ovat käytännössä perinteisen kemiallisen synteessin ulottumattomissa, mahdollisuus tuottaa MNT:n vaatiman laitteiston komponentteja laitteistoa itseään käyttäen (kopiointi), ja yleisesti pudottaa monien komponenttien tuotantokustannuksia jopa useilla kertaluvuilla. Timanttirakenteiden rutiininomainen tuottaminen ovat eräs tutkituimpia MNT:n sovelluksia.

Tässä esityksessä analysoidaan MNT:aa sen käytännön toteutettavuuden (feasibility) kannalta. Erityisesti viime vuonna (2003) keskustelu siitä, onko MNT ylipäätään mahdollista, on kiihtynyt kansainvälisillä keskustelufoorumeilla. Vastustus ei ole keskittynyt niinkään Drexlerin teoreettisiin tuloksiin, vaan siihen, jätetäänkö niissä huomiotta jotain sellaisia tekijöitä, jotka käytännössä tekisivät mahdottomaksi MNT:n hänen esittämässään muodossa.

Tässä käydään ensin läpi MNT pääpiirteittäin siinä muodossa kuin se on esitetty teoksessa (Drexler, 1992). Pikaisesti katsastetaan ilmeisimmät vasta-argumentit MNT:n käytännön toteutettavuudelle, ja sen jälkeen edetään kemian nobelisti Richard Smalley'n esittämiin vasta-argumentteihin (Smalley, 2003). Jälkimmäisiä ei ole valittu käsittelyyn niinkään siksi että alan tutkijat välttämättä pitäisivät niitä teknisesti erityisen relevantteina, vaan lähinnä siksi että ne ovat tällä hetkellä yleisesti tunnetuimpia MNT:n vasta-argumentteja, ja niiden analysointi muodostaa hyvän läpileikkauksen MNT:sta. Lopuksi esitellään lyhyesti joitakin MNT:lle relevantteja olemassaolevia teknologioita ja teoreettisesti tutkittuja laitteita.

2. Molekulaarinen nanoteknologia

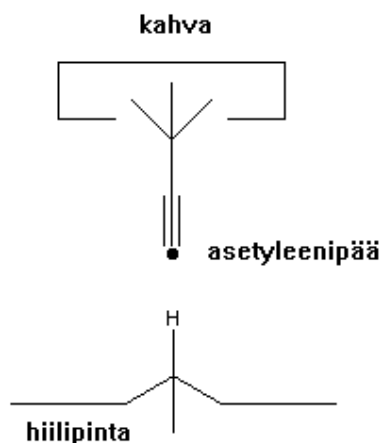
MNT:n tavoitteena on skaalata olemassaolevat mekaanisten koneiden ja tuotannon periaatteet nanometritasolle, jossa atomit ja molekyylit toimivat koneiden rakenneseinä. Jotta tämä olisi mahdollista, on tarkasteltava toisaalta bulkki-tuotannon perustana olevien fysiikan lakien skaalautumista nm-tasolle ja toisaalta esitettävä tapoja toteuttaa molekulaariset vastineet niille komponenteille ja komponenteista muodostettaville tuotantolinjoille joihin bulkki-teknologia perustuu. Tällaista tarkastelua on tehnyt mm. Drexler (1992), ja teoria on erityisesti fysikaalisten periaatteiden osalta melko selvä. Molekulaaristen komponenttien toteuttamiseen on lukemattomia erilaisia mahdollisuuksia. Koska kovalentteihin hiilirakenteisiin perustuvat (orgaaniset) järjestelmät tarjoavat erityisen laajan kirjon tunnettuja ja mahdollisia rakenteita, suuri osa tutkituista komponenteista koostuu hiilivedyistä.

2.1 Mekanosynteesi ja kone-faasi

MNT poikkeaa paradigmana oleellisesti bulkki-teknologisesta lähestymistavasta jota orgaanisessa kemiassa on pitkään sovellettu menestyksekkäästi. Siinä missä jälkimmäisessä tuotetaan massiivisia atomimääriä yhdessä reaktiossa, MNT:ssä tarkastelun kohteena ovat järjestelmät joissa käsitellään vain yhtä tai muutamaa atomia kerrallaan. Esim. synteettisessä kemiassa ahkerassa käytössä olevien vapaan energian, entalpian ja entropian käsitteiden hyöty on MNT:ssä rajallinen.

Nestefaasissa, erityisesti vedessä, suuri määrä molekyylejä reagoi keskenään Brownin liikkeen ajamana, väliaineen ominaisuuksia hyödyntäen. MNT taas perustuu ns. kone-faasiin (machine-phase) jossa väliainetta ei ole (tyhjiö ja kuiva pinta) tai se on kemiallisesti riittävän inertti (esim. orgaaniset liuokset). Kone-faasi on määritelty ympäristönä jossa systeemin kaikkien potentiaalisesti reaktiivisten alueiden sijainteja kontrolloidaan (Drexler, 1992). Ei-toivottujen reaktioiden mahdollisuus pyritään siis minimoimaan. Kaikki reaktiot jotka perinteisessä nestefaasin kemiassa tapahtuisivat, voidaan konefaasissa mekaanisesti estää tapahtumasta.

Tyypillisessä kone-faasin reaktiossa pidetään kohdemolekyylä tai -materiaalia paikallaan, samalla kun yhtä tai muutamaa siinä olevaa atomia operoidaan. Esim. kuvassa 1 on esitetty yhden vetyatomien abstrahointi (poistaminen) timanttipinnasta vetyabstraktio-työkalulla. Tällainen laite voidaan toteuttaa käyttämällä työkalun aktiivisessa päässä esim. asetyleeniä, joka muodostaa vedyn kanssa voimakkaamman sidoksen kuin timanttipinta. Kun asetyleeni tuodaan pinnan läheisyyteen, se irrottaa vetyatomien timanttipinnasta jättäen jälkeensä aktiivisen aukon, johon voidaan myöhemmin sijoittaa uusi hiiliatomi, jolloin timanttipinta laajenee (Merkle, 1997). Peruskemia tällaisten reaktioiden takana voi olla hyvinkin yksinkertaista, mutta ympäristön on oltava sellainen, jossa satunnaisia molekyylejä on liikkeellä niin vähän, ettei ole todennäköistä että luotu aukko reagoi jonkin asiaankuulumattoman molekyylin kanssa ennen kuin siihen ehditään tuoda haluttu atomi. Tällainen tilanne olisi mahdoton toteuttaa vesiliuoksessa.



Kuva 1. Vedyn abstraktio-työkalu.

MNT:ssä voidaan puhua myös *mekanosynteesistä*, jolla tarkoitetaan sellaista kemiallista synteesiä jota hallitaan atomitason täsmällisyydellä mekaanisten järjestelmien avulla. Mekanosynteesiä voi olla helpompi visualisoida makroskooppisten valmistusmenetelmien kuin nestefaasin kemiallisten reaktioiden kautta. Puhutaan molekulaarisista koneista, tuotantolinjoista, hihnoista, laakereista, hammasrattaista, akseleista jne. Sellaisia olosuhteita, joissa mekanosynteesi on mahdollinen, kutsutaan *eutaktisiksi*.

Mekanosynteesiin voidaan käyttää ja sillä voidaan tuottaa hiilivetykomponentteja, jotka ovat kemiallisesti inerttejä muualla kuin halutuissa kohdissa. Hiilivetyrakenne voidaan myös tehdä reaktiiviseksi tietyssä kohtaa poistamalla vetyatomi. Tällä tavoin voidaan periaatteessa tuottaa lähes mitä tahansa fysikaalisesti mahdollisia mielivaltaisen suuria atomin tarkkuudella suunniteltuja hiilivetyrakenteita.

2.2 Skaalaus makroskopiasta nanometri-tasolle

Osa klassisen mekaniikan käyttämistä makroskooppisia systeemejä hyvin kuvaavista suureista voidaan skaalata nanometri-tasolle (kunhan ei mennä aivan yksittäisiin atomeihin asti): mm. voima, jäykkyys, massa, teho, kapasitanssi, sähköstaattiset suuret ja värähtelytaajuus. Sen sijaan esim. kitka, kulumiselinikä, resistanssi ja sähkövirta ovat melko hyödyttömiä käsitteitä tässä mittakaavassa.

Esim. tehon, voiman ja nopeuden määritelmistä nähdään, että tehotiheys (P / V) on kääntäen verrannollinen systeemin karakteristiseen pituuteen. Nm-suuruusluokkaa olevat kestävästä materiaaleista valmistetut laitteet voivat siis saavuttaa poikkeuksellisen korkeita tehotiheyksiä makroskooppisiin koneisiin verrattuna.

Vastaavasti voidaan muita suureita skaalaamalla todeta, että nanotason laitteet voivat toimia hyvin suurilla nopeuksilla, kiihtyvyyksillä ja taajuuksilla. Lämpökapasiteetti ja terminen johtavuus skaalaamalla taas voidaan osoittaa, että myös niiden jäähtytys voi olla suhteellisesti paljon tehokkaampaa kuin makroskooppisten laitteiden.

2.3 Lähestymistapoja toteutukseen

Usein esitetään kaksi radikaalisti erilaista tapaa toteuttaa MNT: ns. *top-down* ja *bottom-up* -menetelmät.

Top-down-menetelmä on lähempänä perinteistä insinööritiedettä. Siinä katsotaan, että

pienentämällä vähitellen sitä mittaa jossa voimme manipuloida materiaa, ensin mikrotasolle ja sitten nanotasolle, voimme lopulta tuottaa atomaarisia rakenteita oleellisesti samanlaisilla menetelmillä kuin tänään tuotetaan mikrotason rakenteita. Tällainen menetelmä on mm. optinen litografia, jossa poraamalla ja etsaamalla tuotetaan mikrometri-rakenteita piistä. Ideana on aloittaa suurehkosta piilevystä, johon sitten ”kaiverretaan” yhä hienojakoisempia yksityiskohtia. Tätä menetelmää voidaan käyttää myös suuremmalla kuin mikrometrin resoluutiolla. Toinen esimerkki on pyyhkäisysensori-mikroskooppi (scanning probe microscope), jolla voidaan kohdistaa voimia yksittäisiin atomeihin. Top-down-menetelmien etu on niiden perinteisyys, edullisuus ja saatavuus. Haittapuolena on, että vaikka niillä lopulta päästäisiinkin alkeelliseen MNT:aan, niin makroskooppisella laitteistolla yhtä atomia kerrallaan siirtävä lähestymistapa on tietenkin melko tehoton.

Bottom-up-menetelmässä rakennetaan atomaarisia rakenteita itseorganisoituvien prosessien kautta. Proteiinit ovat hyvä esimerkki monomeeri-ketjuista, jotka ketjun 1-ulotteisen sekvenssin määrääminä säännöllisesti organisoituvat tiettyyn 3-ulotteiseen rakenteeseen. Tällöin riittää tuottaa rakenteen ”resepti” eli molekyyliketju, joka sitten pelkän Brownin liikkeen ja molekulaaristen vuorovaikutusten ajamana löytää itse halutun rakenteen. Tapa jolla ribosomit tuottavat proteiineja perustuu nimenomaan tähän oikotiehen, ja siten sen mahdollisuus on periaatteessa todistettu. Onkin esitetty, että ribosomi on alkeellinen MNT-kokooja. Itseorganisoituminen tapahtuu yleensä vain nestefaasissa, eikä siis sovellu lopulliseksi MNT:n toimintamenetelmäksi, mutta vesipohjaisessa liuosfaasissa syntyviä karkeita molekyylikoneita voidaan käyttää parempien ja parempien koneiden tuottamiseen, joita puolestaan voidaan hyödyntää sellaisten laitteiden valmistamisessa jotka voisivat jatkaa tuotantoa tyhjiössä ja kuivalla pinnalla.

2.4 Universaalin kokoojan mahdollisuudesta

Universaali kokooja (universal assembler) on sovellus von Neumannin klassisesta teoreettisesta kokoojasta, joka voi muodostaa kaikenlaisia rakenteita tietystä atomaaristen rakennuskomponenttien maailmassa. Se voi myös tehdä kopioita itsestään.

Mikäli voitaisiin rakentaa MNT-laite, joka koostuu vain elementeistä, joita laite itsekkin voi valmistaa, ei ole mitään periaatteellista estettä sille, että tämä laite voisi tehdä kopioita itsestään. Tällä tavoin voitaisiin myös nopeuttaa tuotantoprosessia oleellisesti: vaikka yhden kokoojan toimintanopeus olisi hyvin hidas, se voisi tietystä tehtävästä suoriutuakseen tehdä ensin riittävästi kopioita itsestään ja vasta sitten aloittaa varsinaisen tuotantoprosessin. Koska myös jokainen sen kopio voisi tehdä kopioita itsestään, kokoojien määrä kasvaisi kopiovaiheessa eksponentiaalisesti. Jos vaikkapa yhteen kopio-operaatioon kuluisi ~1 h, olisi jo 80 h jälkeen syntynyt ~ 10^{24} kopiota, ja määrä miljoonakertaistuisi joka 20. tunti. Käytännön rajoitteita on toki valtavasti. Raaka-aineita voidaan ehkä syöttää järjestelmään helpostikin, mutta minne kopiot sijoitetaan? Jäävätkö ne ajalehtimaan ja jos jäävät, miten niitä voidaan käyttää uusien kopioiden luomiseen? MNT-teoreetikot kuitenkin olettavat, että nämä kysymykset voidaan ratkaista huolellisilla insinööri-tieteellisillä ratkaisuilla, ja ettei niihin sisälly mitään periaatteellisia ongelmia.

Kuten kaikkiin ns. replikaattoreihin, myös lisääntymiskykyisiin kokoojiin liittyy suuri ympäristöriski. Liian tehokkaiksi suunnitellut spontaanisti lisääntyvät kokoojat voisivat aiheuttaa maailmanlaajuisen ekokatastrofin ympäristöön karatessaan. Tätä voi ajatella esim. sen kautta, miten tuhoisa jokin bakteeri voisi olla, jos sen metaboliaa ja rakennetta olisi tehostettu kaikin ihmiselle tunnetuin ja lähitulevaisuudessa saatavilla olevin keinoin. MNT-replikaattoreiden tapauksessa tästä katastrofista käytetään yleensä nimitystä *globaali ekofagia* (global ecophagy) tai havainnollisemmin *gray goo* (harmaa mönjä), joka viittaa kokoojan jälkeensä jättämään kuona-aineeseen ja itse kokoojien muodostamaan massaan.

Nykyään Drexler ja muut MNT-teoreetikot eivät pidä tätä riskiä merkittävänä. Suunnitellut MNT-tuotantolinjat muistuttavat yhä enemmän tehdasta ja yhä vähemmän biologisia systeemejä. Vaikka niitä käytettäisiin kokoojien kopioiden tuottamiseen, kokoojat olisivat kuitenkin niin

monimutkaisia ja niiden toiminta vaatisi niin spesifisiä olosuhteita, että ne eivät yksinkertaisesti pystyisi valmistamaan kopioita itsestään tuotantolinjan ulkopuolella. On tietenkin mahdollista, että joku lopulta onnistuu tulevaisuudessa sellaisiakin tietoisien yrityksen kautta tuottamaan. Mutta mikäli MNT onnistuu, se muuttaa maailman talous- ja tuotantosuheteita niin suurissa määrin, että monet talouteen ja sotavarusteluun liittyvät riskit saattavat olla oleellisempia (CRN, 2004).

3 Joitakin vasta-argumentteja

Seuraavaksi käsittelemme muutamia MNT:aan liittyviä mahdollisia ongelmia. Koska MNT perustuu ennennäkemättömän tarkkaan fysikaaliseen manipulaatioon, on selvää, että se on altis erilaisille häiriöille. Käymme lyhyesti läpi joitakin häiriölähteitä ja niiden merkitystä, ja sen jälkeen vilkaisemme atomitasolla mahdollisesti relevanttia atomisijaintien epätarkkuuden ongelmaa. Kaikki analyysit perustuvat teokseen (Drexler, 1992).

3.1 Termodynamiikka, säteily ym. häiriöt

Drexler tarkastelee molekulaarisia koneita potentiaalienergiapinnan (potential energy surface, PES) avulla. Toimiva kone on tietysti oikeassa moniulotteisen PES:n potentiaalkuopassa, ja voidaan olettaa, että kone lakkaa toimimasta jos siihen tuodaan ulkopäin niin paljon energiaa, että sen molekulaarinen konfiguraatio siirtyy johonkin toiseen kuoppaan. Tällaisen siirtymän voivat aiheuttaa mm. lämpöliike ja ionisoiva säteily. Kun kuoppien seinämien korkeudet tunnetaan, voidaan laskea siirtymätodennäköisyydet ajan ja lämpötilan funktioina.

Relevantit kemialliset reaktiot voidaan jakaa kahteen ryhmään: niihin joissa yksi molekulaarinen sidos katkeaa ja niihin joissa yhden sidoksen katkeamista seuraa heti toisen sidoksen syntyminen. Koska sidoksen syntyminen voi olla energeettisesti edullista, jälkimmäisen kaltaisia reaktioita tapahtuu yleisesti ottaen enemmän kuin edellisen kaltaisia. Monien orgaanisten molekyylien rakenne silti estää peräkkäisen sidoksen hajoamisen ja uudelleensyntymisen.

Voidaan kuitenkin osoittaa, että luonnonsäteily on keskimäärin niin voimakasta, että ellei sitä pystytä torjumaan, niin tyypillisissä tapauksissa luonnonsäteily dominoi termodynamiikkaa häiriölähteenä. Systeemissä, jossa on tyypillinen kemiallisten sidosten määrä massayksikköä kohti, yhden sidoksen keskimääräinen rikkoutumistaajuus on $\sim 10^{-19}$ 1/s. Useimpien tärkeiden kovalenttien sidosten (mm. hiilen ja alkuaineiden H, N, O, P, F, Si, P, S ja Cl välillä) rikkoutuminen termaalisissa prosesseissa vaatii enemmän kuin ~ 313 maJ aktivaatioenergian (kun lämpötila on 300 K), mistä voidaan laskea, että tyypillinen sidoksen termalinen rikkoutumistaajuus on pienempi kuin $\sim 10^{-20}$ 1/s, eli yhtä kertaluokkaa pienempi kuin säteilyn aiheuttama. Koska säteilyn torjuntaa voidaan pitää yleisesti ottaen vaikeana, voidaan konservatiivisesti olettaa, että luonnonsäteily määrittää yleisen minimirajan sidoksen rikkoutumistaajuudelle (enimmäisajan keskim. eliniälle).

Olettaen, että säteilyn määräämä vähimmäisrikkoutumistaajuus on väistämätön, voidaan järjestelmä tehdä luotettavammaksi redundanssilla eli käyttämällä enemmän komponentteja tietyn funktion aikaansaamiseen kuin mitä olisi välttämätöntä. Niinpä yhden komponentin pettäessä (esim. säteilyn takia) systeemin funktionaalisuus säilyy. Näin voidaan helposti lisätä systeemin keskimääräistä käyttöikää hyvinkin radikaalisti.

Mm. ulkoiset sähkökentät ja fotokemialliset reaktiot ovat myös mahdollisia virhelähteitä, jotka on käsiteltävä tapauskohtaisesti.

3.2 Sijainnin epätarkkuus

Mekaaniset koneet edellyttävät toimiakseen, että kukin osa on riittävän tarkasti halutussa paikassa tiettyä ajanhetkenä. Tätä kuvataan usein komponentin sijainnin todennäköisyystiheys-funktiolla. Monia nanomekaanisia järjestelmiä voidaan approksimoida lineaarisilla malleilla, joissa palauttavat voimat ovat verrannollisia etäisyyteen tasapainotilasta.

Nanometri-kokoluokan jousille, sauvoille, kaasutäytteisille männille ym. voidaan lasketa niiden täsmälliseen sijaintiin liittyvä epätarkkuus, johon huomioidaan sekä kvanttimekaaniset että termaaliset vaikutukset. Useimmissa tapauksissa sijainnin epätarkkuus on yksinkertainen lämpötilan ja ko. molekulaarisen rakenteen (sen sidosten) jäykkyyden funktio. Huoneen lämpötilassa harmonisen oskillaattorin tapaan käyttäytyvät ei-patologiset rakenteet noudattavat useimmissa tilaneteissa riittävällä tarkkudella yhtälöä:

$$s^2 = kT / k_s$$

jossa s on sijainnin keskihajonta, k Boltzmannin vakio, T lämpötila ja k_s jousivakio.

Tämä yhtälö riittää erityisen hyvin suurempien nanomekaanisten järjestelmien tarkastelemiseksi. Se ei aseta mitään periaatteellista estettä sellaiselle sijainnin määrittämisen tarkkuudelle, joka on välttämätön MNT-koneiden rakentamiseksi.

4 Smalley'n argumentit

Richard Smalley esitti kuuluisat Fat Fingers- ja Sticky Fingers -argumenttinsa ensin Scientific Americanissa vuonna 2001. Argumenttien tarkoitus oli osoittaa, että yksittäisiä atomeja voidaan manipuloida vain jos kemiallinen ympäristö hallitaan täsmällisesti, mikä voitaisiin toteuttaa eräänlaisilla yksittäisillä sormilla. Smalley kuitenkin osoitti että tämä olisi käytännössä mahdotonta.

Keskustelu jatkui vuonna 2003, Drexlerin myöntäessä että Smalley'n esittämät manipulaattorit eivät luultavasti toimiskaan – mutta että ne MNT-arkkitehtuurit, joita Drexler on tutkinut, eivät perustu tällaisiin sormiin alunperinkään. Seurannut jokseenkin poliittinen ja melko epätieteellinen keskustelu lehdistössä osoitti ainakin, että vaikka Drexlerin työtä vaivaa selvä konkreettisten esimerkkien vähäisyys, niin Smalley'n argumentit näyttivät perustuvan vain perinteisessä nestefaasi-kemiassa kehitettyyn intuitioon ja osittain puutteellisiin tietoihin ja virheellisiin käsityksiin.

4.1 Fat Fingers

Smalley'n *Fat Fingers*-argumentin mukaan sellaiset manipulaattorin varret (fingers), jotka pystyisivät operoimaan yksittäisiä atomeja, olisivat niin paksuja etteivät ne yksinkertaisesti mahtuisi toimimaan $\sim 1 \text{ nm}^3$ suuruisella alueella jolla atomit perinteisissä kemiallisissa reaktioissa osallistuvat reaktioon. Smalley olettaa, että jotta voitaisiin hallinta koko tilanteeseen liittyvää kemiaa, varsia voitaisiin tarvita jopa viisi tyypilliseen mekanosynteettiseen operaatioon.

Tähän väitteeseen voidaan esittää kaksi vastausta. Ensinnäkin voidaan käsitellä vain tilanteita joissa toinen reaktion kohdeatomi on kiinnittyneenä johonkin (massiiviseen) kemialliseen substraattiin ja toinen tuodaan reaktiopaikalle yhden manipulaattori-varren avulla. Tällainen tilanne on saatu kokeellisesti aikaan STM-mikroskoopilla (Ho & Lee, 1999). Samaa kategoriaan kuuluu myös edellä käsittelemämme timanttipinnan manipulointi, joka on molekyyliidynaamisella simulaatiolla todistettu mahdolliseksi.

Toiseksi voidaan ottaa lähestymistapa joka kokonaan välttää tilanongelman: rajoitetaan manipulaattorien toiminta suurempien 10-100 atomin systeemien siirtelemiseen kerralla. Tällöin nuo suuremmat peruselementit voidaan ensin syntetisoida perinteisillä orgaanisen kemian

synteesimenetelmillä, minkä jälkeen manipulaattorit kokoavat niistä lopputuotteen. Tässä tapauksessa joudutaan tietysti tyytymään vain sellaisista osista koostuviin nano-koneisiin, jotka pystytään tuottamaan perinteisillä menetelmillä, mutta tämän ongelman merkittävyyttä on vaikea arvioida. Tuloksena olisi MNT joka ei olisi aivan niin kaikkivoipa kuin Drexlerin alkuperäisessä esityksessä, mutta jotain kertonee kuitenkin, että vastaavaa menetelmää käyttää esim. ribosomi, jonka toiminnan tehokkuudesta todistaa mm. *homo sapiensin* olemassaolo.

4.2 Sticky Fingers

Sticky Fingers-argumentin mukaan manipulaattorivarret tarttuvat siirtelemiinsä molekyyliin tavalla, joka tekee mahdolliseksi irrottaa ja pudottaa niitä oikeisiin kohtiin. Ts. jos varsi vetää siirrettävää molekyyliä riittävän voimakkaasti puoleensa pystyäkseen siirtämään sitä, sen vetovoima on niin suuri että irrottaminen täsmällisellä hetkellä on käytännössä mahdotonta.

Useita mahdollisia tapoja irrottaa siirrettävä molekyyli on kuitenkin ehdotettu. Voidaan esim. johtaa jännite-ero molekyylin ja varren välille siten, että molekyyli irtoaa (Ho & Lee, 1999). Toisena esimerkkinä (Merkle, 2003) on karbeeni-työkalu, joka asettaa reaktiivisen hiiliatomin timanttipinnalle (100), ja jota sitten taivutetaan 90 astetta jolloin pi-sidos hiiliatomiin katkeaa. Jäljelle jäävä sigma-sidos on niin heikko, että se katkeaa yksinkertaisesti vetämällä työkalu pois pinnalta. Muita tapoja on kokeiltu käytännössä mm. pyyhkäisysensori-mikroskoopilla, ja vastaavien työkalujen määrä on lisääntymässä.

4.3 Entsyymien toimintakonteksti

Smalley'n Finger-argumenttien tavoite oli osoittaa, että vedessä toimivat molekyylikoneet eivät voi perustua atomien täsmälliseen sijoitteluun, koska jatkuvasti läsnäoleva vesi rajoittaa oleellisesti mahdollisten vakaisen rakenteiden joukkoa, ja tarvittavien sormien määrä on epärealistinen. Drexlerin ratkaisu on MNT:n rajoittaminen kuiviin tyhjiöympäristöihin tai inertteihin väliaineisiin. Entsyymejä ja ribosomeja on yleensä pidetty luotettavimpana todisteena siitä, että MNT on periaatteessa mahdollista. Mutta kuten Smalley toteaa, sikäli kuin entsyymit ja ribosomit taas eivät voi toimia muualla kuin vedessä, niin niillä ei voi todistaa tyhjiössä tapahtuvaa MNT:aa mahdolliseksi.

Tässä vaiheessa Smalley'n argumentaatio kuitenkin kuivuu kokoon. Entsyymikemiassa on nimittäin tiedetty jo 80-luvulla, että entsyymit voivat toimia muissakin väliaineissa kuin vedessä, ja jopa höyryfaasissa kokonaan ilman liuosta. Koska heikommin reagoivassa väliaineessa ei-toivotut sivureaktiot vähenevät, entsyymit voivat toimia itse asiassa paremmin ilman vettä (Klibanov, 1994).

Vaikka Smalley'n näkemys onkin tässä kodin osoitettu vääräksi, ei tämä kerro meille paljoakaan MNT:sta. Koko argumentaatio on nimittäin tässä vaiheessa siirtynyt joka tapauksessa pahasti sivuraiteelle: on kyseenalaista, miten hyödyllistä MNT on ylipäätään ymmärtää entsyymien kautta. Drexlerin alkuperäinen lähestymistapa (1992) on monella tapaa selkeämpi, ja mikäli MNT:n mahdollisuus halutaan kiistää, niin vasta-argumenttien analysointi olisi mielekkäämpää jos ne perustuisivat tämän analyysin kritisoimiseen.

Lähteet

CRN - Center For Responsible Nanotechnology 2004: *Dangers of Molecular Manufacturing*, <http://www.crnano.org/dangers.htm>

Drexler, Eric 1986: *Engines Of Creation*, Anchor Books

Drexler, Eric 1992: *Nanosystems - Molecular Machinery, Manufacturing, and computation*

Merkle, Ralph C. & Freitas, Robert A. Jr. 2003: "Theoretical analysis of a carbon-carbon dimer placement tool for diamond mechanosynthesis", *J. Nanosci. Nanotechnol.* **3** June 2003

Smalley, Richard 2001: "Of chemistry, love, and nanobots", *Scientific American* **285** (September): 76-77

Smalley, Richard 1993: "Nanotechnology", *Chemical And Engineering News* **81** (December 1): 37-42

Walch, Stephen & Merkle, Ralph 1998: "Theoretical studies of diamond mechanosynthesis reactions", *Nanotechnology* **9**, pages 285-296