Tampereen yliopisto

Matias Miettinen

HIILIDIOKSIDIPATRUUNOITA SOVELTAVIEN KONSEPTIEN TEKNINEN TOTEUTTAMISKELPOISUUS

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Mikko Vanhatalo
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Matias Miettinen: Hiilidioksidipatruunoita soveltavien konseptien tekninen toteuttamiskelpoisuus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2024

Tämän tutkimuksen tavoitteena on esitellä pieniä kertakäyttöisiä hiilidioksidipatruunoita hyödyntävien laitekonseptien teknistä toteuttamiskelpoisuutta ja sen arviointia. Työssä tutkitaan EN 16509 -standardiin lukeutuvien hiilidioksidipatruunoiden ja näitä soveltavien moniteknisten järjestelmien keskeisimpiä mekatroniikan ja termodynamiikan kysymyksiä tuotekehityksen näkökulmasta. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Tutkimus painottuu alussa itse hiilidioksidipatruunoihin liittyvien standardien, käyttökohteiden ja fyysisten ominaisuuksien esittelyyn. Selvitettyjen kokoluokkien ja teknisten tietojen avulla pohjustetaan nesteytetyn hiilidioksidin käyttäytymistä sekä yleisesti että käyttökohteena olevan järjestelmän toimintaperiaatteen mukaan. Seuraavaksi työssä esitellään termodynaamisten toimintaperiaatteiden ja järjestelmien mekatronisten rakenteiden välisiä suhteita analysoimalla valmiita tuotteita ja erilaisia tutkivia tuotekehitysprojekteja. Näiden suhteiden avulla muodostetaan laajempi käsitys siitä, minkälaisia rajoituksia hiilidioksidipatruunoiden käytölle on erilaisissa tuotekonsepteissa. Työn lopuksi esitellään tutkimuksen aiempiin osiin vedoten sopivia vaihtoehtoja konseptien teknisen toteuttamiskelpoisuuden arvioinnille ja muodostetaan johtopäätökset.

Tutkimus osoittaa, että hiilidioksidipatruunoiden kokoluokat ovat standardisoinnin puutteellisuudesta huolimatta vakiintuneita. Valmistajien välillä mitoissa voi kuitenkin olla pientä vaihtelua, mikä on hyvä ottaa huomioon yhteensopivuuden vuoksi. Hiilidioksidi säilytetään kertakäyttöisissä patruunoissa nesteenä, mikä antaa näille jopa moderneja akkuja paremman energiatiheyden. Nopeasti hiilidioksidia vapauttaessa ilmenevä paineen ja lämpötilan alenemiskierre rajoittavat hiilidioksidipatruunoiden mahdollisia käyttökohteita ja vaikeuttavat suorituskyvyn arviointia. Tutkimuksissa esiintyvien prototyyppilaitteistojen ja markkinoilla olevien valmiiden tuotteiden yleisimmät toimintaperiaatteet ovat pulssimainen paineen vapautus ja kertalaukaisu. Toimintaperiaatteet ja hiilidioksidipatruunojen yleiset ominaisuudet heijastuvat laitteiden rakenteeseen. Fyysisten järjestelmien rakenne on monissa käyttötapauksissa hyvin samanlainen. Hiilidioksidipatruunoita käyttävien järjestelmien teknisen toteuttamiskelpoisuuden arviointiin soveltuu esimerkiksi mallipohjainen lähestymistapa ja itsenäisyysaksiomaattinen suunnittelu sekä näiden yhdistelmä.

Avainsanat: tuotekehitys, termodynamiikka, mekatroniikka, hiilidioksidi, CO2, tekninen toteuttamiskelpoisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. KERTAKÄYTTÖISET KAASUPATRUUNAT 2
2.1 Tyypillinen rakenne 3
2.2 Vakiintuneet käyttökohteet ja kokoluokat 4
3. TERMODYNAAMISET RAJOITTEET 6
3.1 Pulssimainen paineen vapautus 8
3.2 Paineen vapautus kerralla 10
3.3 Vertautuminen muihin painelähteisiin 11
4. MEKAANISET RIIPPUVUUDET 12
4.1 Kiinnitys ja puhkaisu 12
4.2 Pneumatiikan toimilaitteet 13
5. TEKNINEN TOTEUTTAMISKELPOISUUS 16
5.1 Mallipohjainen toteuttamiskelpoisuustutkimus 16
5.2 Järjestelmätason arviointi suunnittelumatriisilla 17
5.3 Hiilidioksidipatruunoita soveltavien konseptien arviointi 18
6. JOHTOPÄÄTÖKSET 19
LÄHTEET 21
LIITE A: HIILIDIOKSIDIPATRUUNOIDEN TARJONTA VERKKOKAUPOISSA 24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO2, CO_2	hiilidioksidi (molekyylikaava)
CA_n	asiakastarve, numeroitu (engl. customer attribute)
DOE	tutkimuksiin perustuva suunnittelu (engl. design-of-experiments)
DP_n	suunnitteluparametri, numeroitu (engl. design parameter)
FR_n	toiminnallinen vaatimus, numeroitu (engl. functional requirement)
TFS	tekninen toteuttamiskelpoisuustutkimus (engl. technical feasibility study)
m	massa
n	ainemäärä
p	paine
R	kaasuvakio
T	lämpötila
V	tilavuus
ρ	tiheys

1. JOHDANTO

Teknologian kehityksen saatossa kysymys erilaisten kompaktien laitteiden mahdollisista voimanlähteistä nousee uudelleen ja uudelleen esiin. Tässä kandidaatintyössä tutkittavat kertakäyttöiset hiilidioksidipatruunat ovat kompakti, yksinkertainen ja kustannustehokas ratkaisu pneumaattisten laitteiden käyttövoimaksi, mutta niitä hyödyntävien laitekonseptien toteuttamiskelpoisuuden tutkiminen ei ole aina suoraviivaista monialaisuuden, standardisoinnin aukkoisuuden ja termodynamiikan poikkeuksien vuoksi.

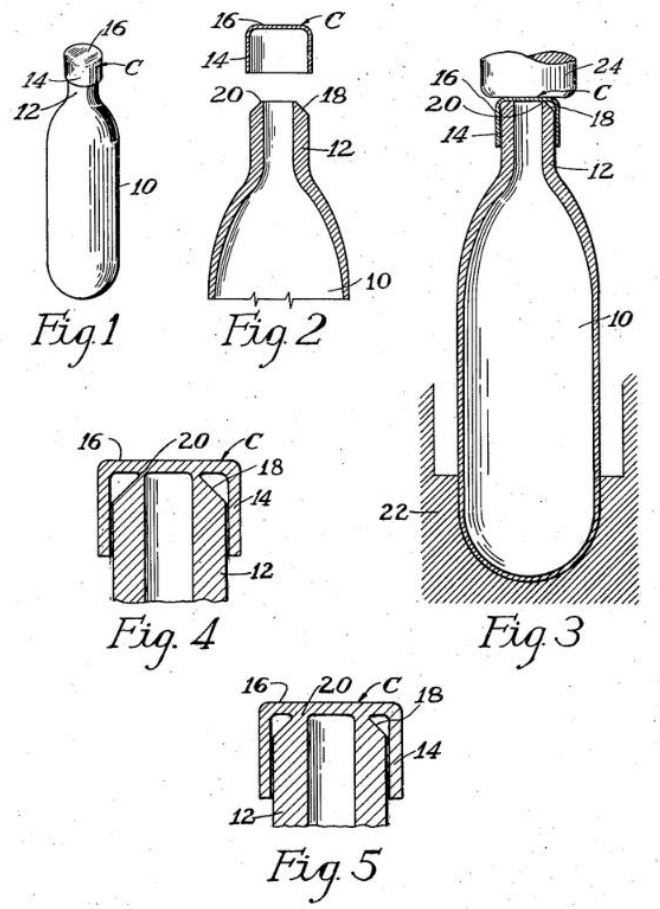
Työssä tutkitaan hiilidioksidipatruunoita sisältäviä järjestelmiä avaamalla niitä ympäröiviä keskeisimpiä termodynamiikan ja mekatroniikan kysymyksiä tuotekehityksen näkökulmasta. Työn keskeisimpiä tavoitteita on esitellä hiilidioksidipatruunoiden yleisimpiä vahvuuksia ja heikkouksia niin vanhoissa kuin moderneissa moniteknisissä järjestelmissä. Tutkimuksen varrella tunnistettuja rajoitteita ja riippuvuuksia hyödyntäen työ huipentuu pohdintaan valintojen merkityksestä suunniteltavan tuotteen rakenteeseen sekä esittelyyn sopivista konseptin teknisen toteuttamiskelpoisuuden arvioinnin metodeista.

Kirjallisuuskatsauksena toteutetun työn alussa esitellään hiilidioksidipatruunoiden yleinen rakenne näihin liittyvien standardien, patenttien ja valmistajien antamien tietojen avulla. Tämän jälkeen luvussa kaksi tutkitaan standardisoinnin puutteen vuoksi, millaisia vakiintuneita kokoluokkia hiilidioksidipatruunoille on näiden kehityksen varrella kertynyt. Ohessa selviää myös yleisimmät käyttökohteet.

Luvussa kolme tarkastellaan hiilidioksidipatruunoiden termodynaamisia ominaisuuksia ja muodostetaan näiden avulla jaottelu eri toimintaperiaatteisiin. Järjestelmien toimintaperiaatteiden rajoituksiin peilaten luvussa neljä esitellään laitteiden yleisimpiä mekatronisia rakenteita ja komponentteja, unohtamatta kuitenkaan rinnastaa patruunoita muihin vaihtoehtoisiin painelähteisiin. Luvussa viisi esitellään kirjallisuuden ja aiemmin työssä löytyneiden rajoitteiden perusteella tehokkaita tapoja uusien laitekonseptien toteuttamiskelpoisuuden arvioinnille. Työn lopussa muodostetaan johtopäätökset saaduista tuloksista.

2. KERTAKÄYTTÖISET KAASUPATRUUNAT

Tässä luvussa esitellään taustatietoa työn keskiössä olevista kertakäyttöisistä pienistä kaasupatruunoista. Ensimmäiset nykyisen malliset pyöristetyt sylinterin muotoiset pienet kaasupatruunat patentoitiin jo 1940-luvulla (kuva 1), ja niitä on nykypäivään asti valmistettu hyvin pienin muutoksin, esimerkiksi nykyinen Crosman Corporation patentoi oman sulkumenetelmänsä 1960-luvulla ja yhtiö myy samaa mallia myös nykyään (Merz 1962).



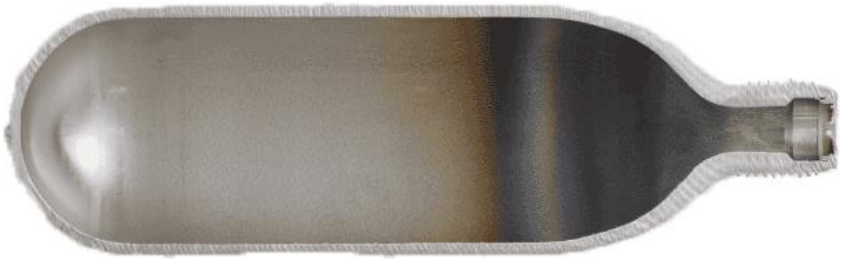
Kuva 1: Welded bulb and cap -patenttipiirros (Weida 1944).

Pienet kertakäyttöiset kaasupatruunat voidaan jakaa eri tyyppeihin. Näistä tyypeistä mainittakoon esimerkiksi retkikeittimiin soveltuvat standardiin SFS-EN 417 lukeutuvat polttoainepatruunat ja standardiin SFS-EN 16509:en lukeutuvat lähinnä pneumaattisiin käyttökohteisiin soveltuvat myrkyttömillä ja syttymättömillä kaasuilla täytetyt alle 120 ml:n kapselit, joihin tässä tutkimuksessa pääasiassa keskitytäänkin.

2.1 Tyypillinen rakenne

Standardi SFS-EN 16509:en (2014, s. 5) määrittelee kapasiteetiltaan 120 ml:n tai pienemmät kertakäyttöiset kaasupatruunat paineistettaviksi myrkyttömillä ja syttymättömillä kaasuilla tai nesteytetyillä kaasuilla. Markkinoilla täytekaasuista yleisin on hiilidioksidi. Harvemmin kaasuina käytetään myös muun muassa happea, heliumia, argonia, paineilmaa ja typpeä sekä näiden sekoituksia, kuten dityppioksidia. (Nippon Tansan Gas [NTG] 2022; Liss 2023; iSi ei pvm.)

Edellä mainitut kaasupatruunat valmistetaan tavallisesti niukkaseosteisesta deoksidoidusta hiiliteräksestä sylinterimäisiksi pyöreäpohjaisiksi kapseleiksi. Myös ruostumaton teräs sopii materiaaliksi tietyin kriteerein. Toisessa päässä on kapea ja avoin kaula, johon voidaan tehdä haluttaessa kierteet. Rakenne on saumaton, ja patruuna valmistetaan joko syvävedolla teräslevystä tai saumattomia putkia muotoilemalla. Kaulan aukon sulkeva osa kiinnitetään kapseliin pysyvästi hitsaamalla tai puristamalla. Sulun on oltava kertakäyttöinen ja avaamiseen vaadittava voima on vähintään 40 N. Sulku on yleensä aukon kohdalta ohut puhkaistava metallikalvo. (SFS-EN 16509:en 2014, s. 8) Kuvassa 2 näkyy hitsauksen aiheuttamat lämpöjäljet patruunan toisessa päädyssä.



Kuva 2: Poikkileikkaus tyypillisestä pienestä kaasupatruunasta (NTG 2022).

ISO 11118 on kaikkia yli 120 millilitran kertakäyttöisiä kaasusylintereitä koskeva standardi, jossa määritetään tyyppihyväksynnän kriteerit ja sen vaatimat taustatiedot esimerkiksi materiaaleista, testauksesta ja mitoituksesta. Materiaalinvalintaa kaikkiin patruunoihin tarkentaa standardi ISO 11114. Kaikki painesäiliöt sisältää standardi EN 13445, jonka eri osissa esitellään muun muassa säiliöiden mitoitus ja testaus muodon ja materiaalin perusteella.

Luvussa mainituista standardeista ei löydy kuitenkaan konkreettisia taulukoita alle 120 ml:n kaasupatruunoiden erilaisille kokoluokille. Ulkomittojen, tilavuuksien ja paineiden konfiguraatiot ovat lopulta siis valmistajien päätettävissä, mikä voi hankaloittaa näitä hyödyntävien laitteiden suunnittelua. Aloittain yhteensopivuussyistä kokoluokat ovat kuitenkin usein vakiintuneita.

2.2 Vakiintuneet käyttökohteet ja kokoluokat

Weidan (1947) patentin tekstin perusteella ensimmäisiä sovelluksia pienille kertakäyttöisille kaasupatruunoille olivat toisen maailmansodan aikaan trendiksi muodostuneet soodasifonit sekä uudenlaiset meripelastuksen välineet. 1950-luvulla nykyinen Crosman Corporation alkoi kehitellä hiilidioksiditäytteisten pienten kaasupatruunoiden käyttöä ilma-aseissa ja lanseerasi oman Powerlet-nimisen 12 g hiilidioksidia sisältävän patruunansa (Crosman 2020). Käyttökohteita ja valmistajia kyseisen kaltaisille hiilidioksidipatruunoille on lukemattomia, mutta pienimuotoisen Suomen markkinoille rajatun verkkokauppojen saatavuusselvityksen tuloksena yleisimpiä käyttökohteita ja kokoluokkia saatiin selville (liite A).

Nykypäivänä urheilu- ja harrastustoiminnassa yleisimpiä käyttökohteita ovat ilma-aseet ja polkupyörien renkaiden täyttölaitteet. Useimmissa ilma- ja airsoft-aseissa käytettävät kaasupatruunat sisältävät 12 g hiilidioksidia. Vastaavasti polkupyörätarvikkeissa yleisimmät koot ovat 16 tai 25 g. Automaattisesti täyttyvissä pelastusliiveissä eli niin kutsutuissa paukkuliiveissä valikoima on laajempi ja vaihtopatruunoita on saatavilla useissa eri ko'oissa aina 10 g:sta 60 g:aan. Tämä johtunee ilmatäytteisiä pelastusliivejä koskevista standardeista EN ISO 12031 ja EN ISO 12032, joissa määritellään pelastusliivien vaatimukset nosteluokituksen ja käyttäjän painon mukaan. Samankaltaisia hiilidioksidilla täyttyviä turvaliivejä on myös kehitetty muun muassa ratsastukseen ja moottoripyöräilyyn. Pelastusliivien ja muiden turvalaitteiden hiilidioksidipatruunat ovat myös huomattavasti kalliimpia kuin esimerkiksi pyöräilyyn ja ilma-aseisiin tarkoitetut. (Liite A)

Elintarviketeollisuudessa vakiintuneita käyttökohteita kertakäyttöisille kaasupatruunoille ovat erilaiset sifonit sekä pienten oluttynnyrien paineistuslaitteet. Myös veden hiilihapotukseen tarkoitettuja laitteita myydään laajalti, vaikkakin niissä usein käytettävät suuremmat hiilidioksidipullot rajaavat ne tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Lääketiedettä sivuavia käyttötarkoituksia ovat myös esimerkiksi pienten eläinten lopettamiseen suunnitellut järjestelmät (Ellis 2017), ja hiilidioksidi onkin mainittu Ruokaviraston (2023) listatuissa lopetus- ja teurastusmenetelmissä.

Hiilidioksidipatruunoiden suorituskyvyn arviointia varten on selvitettävä näiden keskeisimmät ominaisuudet, kuten tilavuus, hiilidioksidin massa ja ulkomitat. Yksityiskohtaisen tiedon hankkiminen itsessään vaatiikin jo huolellista tiedonhakua esimerkiksi käyttöturvallisuustiedotteiden ja tätä kautta löytyneiden alkuperäisten valmistajien tuotekatalogien kautta. Taulukkoon 1 on kerätty kolmen eri valmistajan konfiguraatiot noin 12 g hiilidioksidia sisältäville patruunoille, jotka olivat selvityksen (liite A) mukaan edullisia ja helposti saatavilla.

Taulukko 1: CO2-patruunoiden konfiguraatiot (NTG 2022; Liss 2023; iSi ei pvm.).

Valmistaja	Valmistusmaa	CO_2 (g)	*p* (MPa)	*V* (ml)	*L* (mm)	*D* (mm)	*d* (mm)
iSi	Saksa	10,9	-	14	83,0	18,6	7,3
NTG Europe	Japani	11,5	-	15	82,1	18,6	7,3
Liss Group	Unkari	11,5	8	14	82,4	18,5	7,5

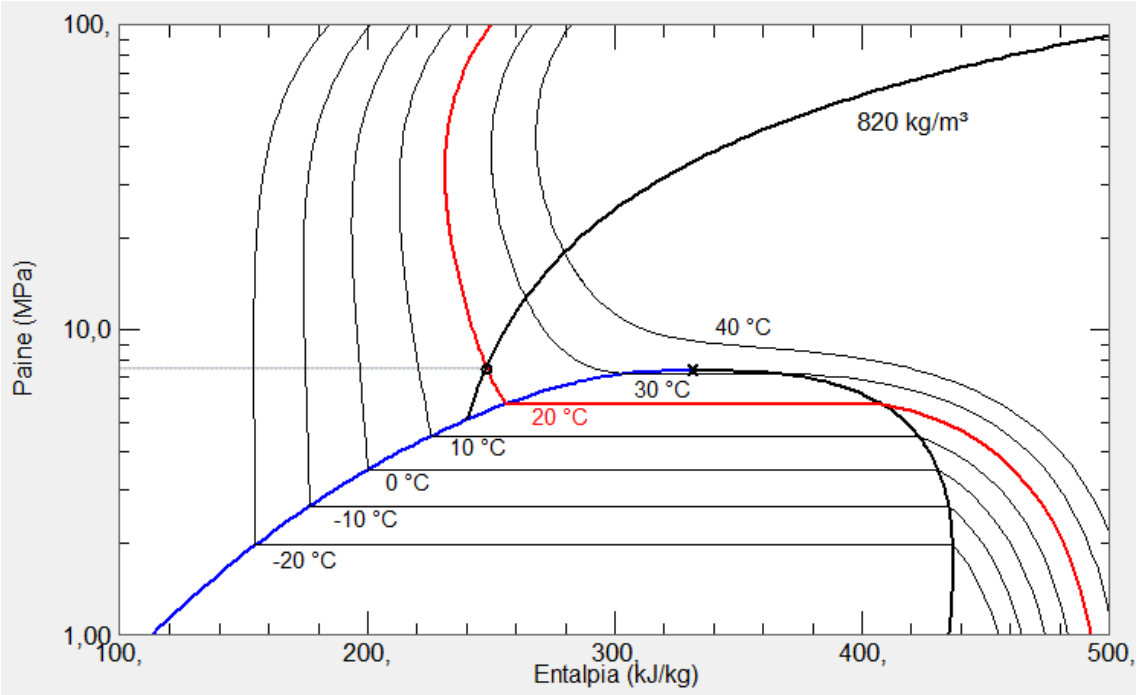
Kuten taulukosta 1 nähdään, eri valmistajien hiilidioksidipatruunat ovat mitoiltaan hyvin lähellä toisiaan tarkan standardisoinnin puutteesta huolimatta. Taulukko 1 ei toisaalta pienen otoskokonsa vuoksi kerro, esiintyykö muissa markkinoilla olevissa hiilidioksidipatruunoissa suuria eroja kokoluokkien sisällä. Taulukosta myös nähdään, että painetta eivät osa valmistajista ilmoita laisinkaan. Hiilidioksidipatruunoiden sisältämän paineen suuruus onkin monimutkaisempi kysymys, mihin luvussa kolme paneudutaan syvemmin.

3. TERMODYNAAMISET RAJOITTEET

Kun tärkeimmät lähtötiedot hiilidioksidipatruunasta on kerätty, voidaan arvioida suorituskykyä termodynamiikan avulla. Kun hiilidioksidin painetta lisätään ja lämpötilaa lasketaan, ideaalikaasun tilanyhtälön antamat tulokset eivät ole enää luotettavia ja tuottavat vääriä tuloksia, etenkin liikuttaessa kyllästymiskäyrän ja kriittisen pisteen läheisyydessä (Çengel & Boles 2006, s. 139). Täyttä varmuutta sisällä olevan aineen olomuodosta ei alkuun ole, joten se on parasta varmistaa faasidiagrammista. Avaamattoman hiilidioksidipatruunan tilavuus *V* ja kaasun massa *m* tunnetaan ja voidaan näin ollen olettaa vakiotiheys:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{11{,}5\ \mathrm{g}}{14\ \mathrm{ml}} \approx 820\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}, \tag{1}$$

missä massa ja tilavuus vastaavat taulukon 1 Liss Groupin patruunan ilmoitettuja arvoja. Piirretään paine-entalpiadiagrammi hiilidioksidille käyttäen Yhdysvaltain standardisointi- ja teknologiainstituutin veloituksetta tarjoamaa miniREFPROP-ohjelmaa. Diagrammiin (kuva 3) merkitessä saatu vakiotiheys, voidaan käyttää huoneen lämpötilan 20 °C:n käyrää ja selvittää risteämäkohdan tasalta kuvan vasemmasta laidasta paine. Tässä tapauksessa saadaan Liss Groupin 11,5 g patruunan paineeksi noin 7,5 MPa, mikä on hyvin lähellä valmistajan ilmoittamaa painetta, kun otetaan huomioon käyrästön tarkkuus ja valmistuksen aikainen mahdollinen lämpötilaero. Vaikka 500 kPa voi kuulostaa suurelta erolta valmistajan ilmoittamaan paineeseen, sillä on lopulta vain marginaalinen merkitys suurimmassa osassa pieniä kaasupatruunoita käyttävissä järjestelmissä, sillä hiilidioksidia on hyvin pieni määrä. Korkea paine myös usein rajoitetaan herkemmissä käyttökohteissa paineenrajoitusventtiileillä esimerkiksi automaatiosovelluksille yleiselle 0,6–0,8 MPa:n paineelle (Iversen et al. 2021).



Kuva 3: Paine-entalpiadiagrammi hiilidioksidille.

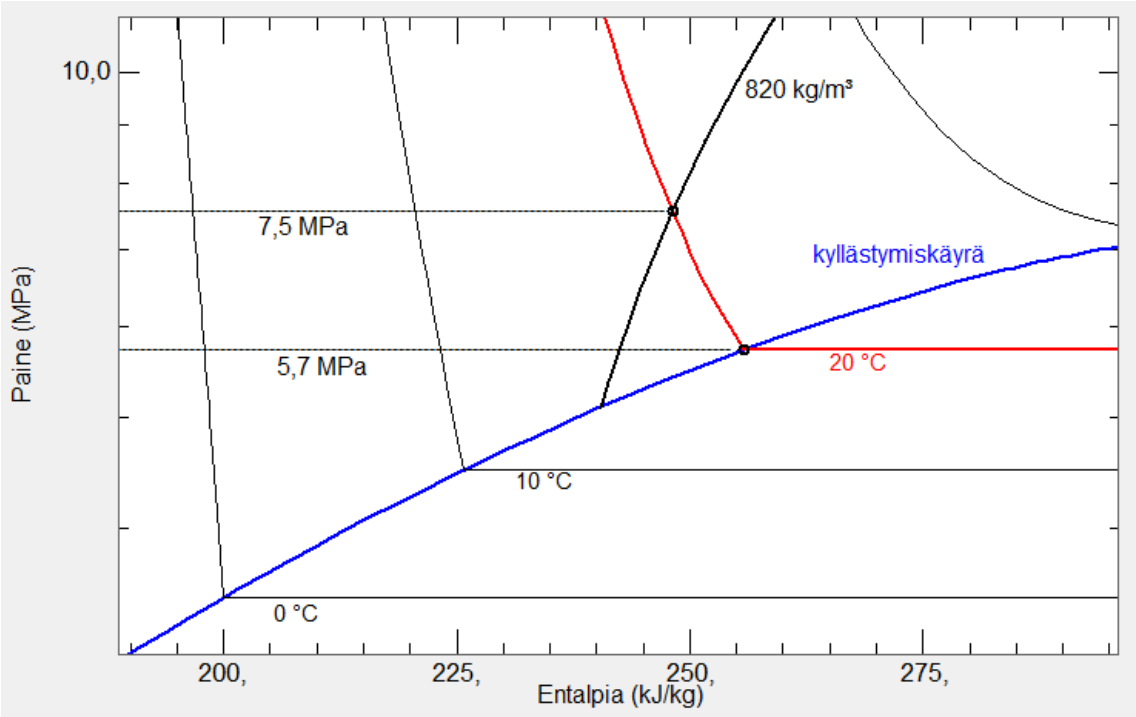
Kuvan 3 diagrammista voidaan patruunan sisällä olevan hiilidioksidin päätellä olevan nestemäisessä muodossa, sillä lämpötila on alle kriittisen pisteen ja lämpötila- ja tiheyskäyrien risteämäkohta on kuvaan sinisellä merkityn kyllästymiskäyrän yläpuolella. Tällä saavutetaan hiilidioksidipatruunoille suuri etu, kun hiilidioksidi saadaan pidettyä hyvin tiiviissä muodossa huoneenlämmössä ja energiaa saadaan varastoitua hyvin pieneen tilaan. Hiilidioksidipatruunoissa onkin suurempi energia-tilavuussuhde kuin moderneissa akuissa (Wehner et al. 2014). Kriittisen pisteen 31,1 °C yläpuolella hiilidioksidia voi olla kuitenkin vain kaasun muodossa riippumatta paineesta, joten lämpötilan kasvaessa huomattavasti tämän yli voi olla riskinä, että patruuna puhkeaa tai räjähtää paineen nousun myötä. Kyllästymiskäyrän päällä liikuttaessa hiilidioksidia voi esiintyä neste- ja kaasumuodossa yhtä aikaa.

Tarkempaa suorituskyvyn arviointia helpottaa hiilidioksidipatruunoita käyttävien järjestelmien jakaminen toimintaperiaatteittain. Luvusta 2.2 päätellen yleisimpiä toimintaperiaatteita voisivat olla paineen vapautus monessa pienessä pulssissa ja paineen vapautus kerralla. Seuraavilla kolmella sivulla arvioidaan hiilidioksidipatruunoita käyttävien järjestelmien termodynamiikkaa näiden kahden toimintaperiaatteen mukaan.

3.1 Pulssimainen paineen vapautus

Kun patruuna avataan huoneenlämmössä ja painetta päästetään ulos, hiilidioksidi kiehuu, kunnes patruunan sisällä oleva paine nousee taas hiilidioksidin kyllästymispaineeseen (Ballinger & Shugar 2011, luku 21.1.1). Hiilidioksidipatruunassa paine siis rajoittuu luonnollisesti itsestään, kunhan liikutaan kriittisen lämpötilan alapuolella ja patruunassa on vielä nestettä jäljellä. Prosessissa lämpötila kuitenkin kylmenee merkittävästi, jolloin myös kyllästymispaine laskee, eli hiilidioksidipatruunasta saatava paine pienenee. Sama kierre esiintyy esimerkiksi irtolian puhdistukseen tarkoitetuissa paineilmapulloissa, joissa painetta ulos päästämällä tölkki kylmenee ja paine nopeasti vähenee, jolloin tölkin täytyy antaa lämmetä hetki ennen käytön jatkamista. Tästä työstä rajataan pois tilanne, jossa paineen vapautuspulssit ovat ajallisesti niin lähellä toisiaan, että patruunan lämpötila ei ehdi tasaantua, sillä se olisi itsessään hyvin laaja kysymys ja vaatisi pitkää selvitystä. Sen sijaan keskitytään tilanteeseen, jossa lämpötilan annetaan pulssien välissä tasaantua, mikä yksinkertaistaa suorituskyvyn arviointia huomattavasti.

Kuvaan 4 piirretystä paine-entalpia-diagrammista voidaan lukea, että hiilidioksidia ulos päästämällä tiheyskäyrän vetäytyessä oikealle lopullinen hiilidioksidipatruunan sisältämä paine on hiilidioksidin kyllästymispaine kyseisessä lämpötilassa. 11,5 grammaa sisältävän Liss Groupin patruunan tapauksessa paine olisi siis aluksi 7,5 MPa ja laskisi ainemäärän vähenemisen myötä 5,7 MPa:iin ja pysyisi siinä niin kauan kuin nestettä riittää lämpötilan pysyessä vakiona. Tämä tarkoittaa osaltaan myös sitä, että järjestelmän saavutettua 5,7 MPa paineen jokainen pulssi poistaa massaltaan vakiomäärän hiilidioksidia. Näin ollen esimerkiksi ilma-aseiden jokainen laukaus on lähes yhtä tehokas.



Kuva 4: 11,5 g:n hiilidioksidipatruunan sisältämä paine vakiolämpötilassa.

Pulssin varsinainen mitoitus on kovin tapauskohtaista ja sen tarkka matemaattinen mallintaminen ei ole tarpeeksi yksinkertaista, jotta sitä voisi tässä työssä käydä perustavanlaatuisesti läpi jokaiselle käyttötapaukselle. Esimerkiksi Rohrbach et al. (2011) ehdottavat yksinkertaisen paineilmakanuunan lähtönopeudelle monimutkaista numeerisesti ratkaistavaa mallia, johon on otettu huomioon muun muassa venttiilin kuristuksen myötä systeemin sisällä vaihteleva tilavuusvirta. Rohrbachin et al. (2011) mallia ovat yrittäneet kehittää Woojin et al. (2023), mutta heidän kehittämä malli kaipasi vielä lisää simulointituloksia ja yksityiskohtien huomioon ottamista kuten paineen vuotoa ja kitkavoiman vaihtelua. Matemaattinen malli riippuu siis olennaisesti järjestelmän geometriasta ja lämpöteknisistä poikkeuksista. Monesti pulssimaisen vapautuksen suorituskyvyn arvioinnissa päädytäänkin empiirisiin tutkimuksiin melko karkean matemaattisen arvioinnin jälkeen, jossa voidaan tarkastella järjestelmää esimerkiksi paineen määritelmän tai Newtonin toisen lain avulla.

3.2 Paineen vapautus kerralla

Hiilidioksidipatruunan paineen vapauttaminen yksittäisenä pulssina on sitä käyttävien järjestelmien yksinkertaisemman luonteen vuoksi helpompi ongelma lähestyä kuin vapautus useammassa pienessä pulssissa. Näissä tapauksissa paineella yleensä täytetään ilmatyyny tai vastaava haluttu tilavuus tiettyyn paineeseen. Nesteytetyillä kaasuilla on usein tyypillistä laajentua moninkertaiseen tilavuuteen, kun ne muuttuvat kaasuksi (Ballinger & Shugar 2011, luku 4.6.5). Hiilidioksidipatruunan tapauksessa siitä vapautuneen kaasun tilavuus normaalissa ilmanpaineessa saadaan arvioitua ideaalikaasun tilanyhtälöllä:

$$V = nRT/p = (11{,}5\mathrm{g}/44\mathrm{g}) \cdot 8.314 \cdot 293{,}15\ \mathrm{K}\ /\ 101\ 325\ \mathrm{Pa}\ \approx 6{,}29\ \mathrm{l}, \qquad (2)$$

missä *n* on hiilidioksidin ainemäärä, *R* on kaasuvakio (J/molK), *T* on lämpötila ja *p* on paine. Pienen 14 millilitran hiilidioksidikapselin neste siis laajenee noin 6 litraan kaasua tavanomaisessa ilmakehän paineessa ja huoneenlämpötilassa, minkä Wehnerin et al. (2014) empiiriset tulokset myös todistavat.

Laajenemiseen kuluva aika riippuu järjestelmän rakenteesta. Chan (2017) sai lonkkamurtumia estävän puettavan 2,5 litran ilmatyynyn täyttymään alle 0,3 sekunnissa 12-grammaisella patruunalla ja 2,8 litraisen ilmatyynyn täyttymään alle 0,35 sekunnissa 38-grammaisella patruunalla. Wehner ym. (2014) havaitsivat omassa painesäädetyssä testilaitteistossaan samankokoisille patruunoille maksimitilavuusvirraksi 18-127 litraa minuutissa, mikä on huomattavasti hitaampi. Kaasun virtaamista voidaan rajoittaa ja laajenemisnopeutta hidastaa erilaisilla paineensäätimillä. Vastaavasti nopeutta voidaan nostaa kytkemällä hiilidioksidipatruunoita useampi rinnan.

Painetta nopeasti vapauttaessa hiilidioksidin lämpötila laskee, joten järjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon hiilidioksidin riski jäätymiselle, jolloin kiinteä hiilidioksidi voi rajoittaa kaasun virtausta tai päästä muussa kuin kaasun muodossa pneumaattisiin järjestelmiin aiheuttaen epätoivottuja tilanteita, kuten tiivisteiden haurastumista (Ballinger & Shugar 2011, luku 4.6.5; Wehner et al. 2014). Nesteeksi paineistetun hiilidioksidin nopea vapauttaminen ympäristön paineeseen ja tämän tarkka matemaattinen mallintaminen onkin itsessään hyvin hankala termohydraulinen kysymys, joka vaatii vielä kokeellista tutkimusta (Ahmad et al. 2013; Zhou et al. 2022). Näistä syistä hiilidioksidipatruunat on parasta käyttää suuaukko ylöspäin, jotta pohjalle painunut neste ei pääse helposti ulos.

3.3 Vertautuminen muihin painelähteisiin

Yksi keskeisimpiä kysymyksiä pneumaattisen järjestelmän kehityksessä on se, että miten paine tuodaan järjestelmään ja miten valintaa tehdessä saatavilla olevat komponenttivaihtoehdot vertautuvat toisiinsa. Wehner et al. (2014) ovat selvittäneet empiirisessä tutkimuksessaan hiilidioksidipatruunoiden vertautumista muihin saman kokoluokan painelähteisiin ja muodostaneet tärkeimmistä vertailuarvoista taulukon (taulukko 2).

Taulukko 2: Käyttövoimien vertailua mukaillen lähdettä Wehner et al. (2014).

	Massa (arvio, g)	Maksimi-paine (MPa)	Maks. virtaama (SLM)	Energia-tiheys (J/g)	Hyöty-suhde (arvio, %)	Saatu kaasun tilavuus (L/g)
Pieni mikrokompressori	130-171	0,2-0,34	1,7-3,5	72,6-99,3	36,7-39,9	0,78-1,38
Pieni hiilidioksidipatruuna	49,9-662	5,6	18-127	30,4-44,1	<49	0,074-0,11
Paineistettu ilmasäiliö	909-1975	20-30	350-650	27,1-83,6	<39	0,05-0,14
Butaanin palaminen	62,7	-	-	2,37	0,5	0,094
Vetyperoksidin hajoaminen	357	0,0507	-	10-28	45	0,04-0,05

Iversen et al. (2021) perustelevat suurjännitekaapeleihin tarttuvaan drooniinsa valikoituneen hiilidioksidipatruunan valintaa ensi sijassa sen yksinkertaisuudella ja keveydellä. Heidän mukaansa esimerkiksi tyypillinen kompressoriratkaisu toisi mukanaan liikaa painoa, akun virrankulutusta ja yleistä kompleksisuutta. Marchese et al. (2014) valitsivat hiilidioksidipatruunat robottikalaansa sen tuoman energian ja tilavuuden suhteen eli energiatiheyden perusteella. Li et al. (2019) puolestaan päätyivät pneumaattisessa lihashihassa patruunoihin näiden saavutettavuuden, edullisuuden sekä painon vuoksi.

Taulukon 2 ja edellä mainittujen muutaman tutkimuksen pohjalta voidaan hiilidioksidipatruunoiden suurimmiksi eduiksi päätellä sen tarjoama suuri paine ja energia pienessä kokoluokassa. Lisäksi mekaaninen yksinkertaisuus ja halvat kustannukset sekä alkuinvestoinnin että operoinnin suhteen vaikuttavat olevan yleisiä tekijöitä valinnassa. Nämä valttikortit kuitenkin saadaan kertakäyttöisyyden ja hankalien termodynaamisten ilmiöiden kustannuksella, jotka toisaalta ovat heikkouksia myös räjähteiden käytössä. Paineilma vaatii puolestaan vahvaa ja painavaa säiliötä, koska se ei tiivisty nesteeksi huoneenlämmössä. Mikrokompressorit vaativat sähkövirtaa, eivätkä anna läheskään yhtä suurta tilavuusvirtaa tai painetta kuin nestemäinen hiilidioksidi. Lopulta pneumaattisen laitteen käyttövoiman valinta on kovin tapauskohtaista ja valinta on hyvä tehdä esimerkiksi erilaisten testien tai valintamatriisien avulla.

4. MEKAANISET RIIPPUVUUDET

Sisällyttäessä kertakäyttöisiä hiilidioksidipatruunoita järjestelmään, on otettava huomioon myös näiden vähimmäistarpeet ohjaustavan ja mekaanisen yhteensopivuuden kannalta. Tässä luvussa esitellään patruunoiden tuomia mekaanisia vähimmäisvaatimuksia ja rajoitteita sekä niiden välisiä riippuvuuksia tarkastelemalla yleisiä komponenttivalintoja tuotteissa ja tuotekehitysprojekteissa aiemmin selvitettyjen toimintaperiaatteiden ja kokoluokkien avulla.

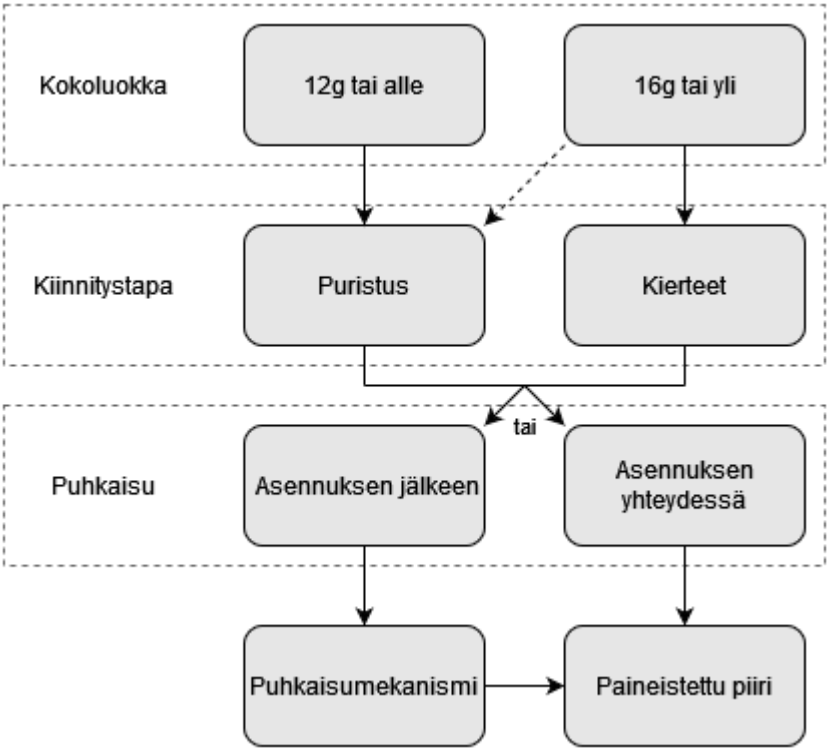
4.1 Kiinnitys ja puhkaisu

Hiilidioksidipatruunan käyttöönotto tapahtuu puhkaisemalla kapean kaulan päädyssä oleva ohut metallikalvo ja puhkaisu vaatii yli 40 N voiman, kuten luvussa 2 saatiin selville. Patruuna voidaan puhkaista joko kiinnityksen yhteydessä tai sen jälkeen. Asennuksen yhteydessä puhkaisu tapahtuu yleensä pienen injektioneulan kärkeä muistuttavan metalliputken toimesta, jota vasten patruuna työntyy joko patruunan kaulassa olevien kierteiden avulla tai muun puristuksen vaikutuksesta (Chan 2017). Hyvä esimerkki tästä on kuvan 5 polkupyörän renkaan täyttölaite, jossa patruunan voi kiertää suoraan tiivistettä ja neulaa vasten, jolloin patruunasta alkaa virrata hiilidioksidia yksinkertaisen ruuvaamalla säädeltävän paineenrajoittimen läpi polkupyörän renkaaseen.

Kuva 5: SKS Germanyn valmistama Airbuster-renkaantäyttölaite.

Asennuksen yhteydessä tapahtuvassa kiinnityksessä on otettava huomioon, että piiri paineistuu heti ja kaasu voi päästä karkaamaan laitteesta ennen pitkää. Tämä aikarajoite voidaan kiertää puhkaisemalla patruuna asennuksen jälkeisenä ajankohtana. Puhkaisu asennuksen jälkeen tehdään useimmiten vapauttamalla patruunan kalvon rikkova iskuri esimerkiksi yksinkertaisen jousi-sokka-systeemin tai servomoottorin avulla. Esimerkiksi useimmat markkinoilla olevat automaattisesti täyttyvät pelastusliivit laukeavat, kun pieni paperista valmistettu osa pehmenee nopeasti vedessä ja päästää jousella viritetyn neulamaisen iskurin vapaaksi (United Moulders Limited 2024).

Työn aiemmissa osissa tutkittiin hiilidioksidipatruunoiden tarjolla olevia kokoluokkia. Liitteen A saatavuusselvityksessä kirjattiin samalla ylös tieto siitä, että onko patruunoissa kierteitä. Kuten liitteestä selviää, alle 16 grammaa sisältävien hiilidioksidipatruunoiden kaula ei ole kierretty, mutta 16 gramman yli mentäessä jokaisessa patruunassa on kierteet. Laitteeseen valitun patruunan kokoluokalla voi siis olla vaikutusta kiinnityksen toteutuksessa. Kuvaan 6 on laadittu valintapuun tapainen kaavio havainnollistamaan rakenteiden valintaa ja niiden välisiä riippuvuuksia tähän asti mainituin vaihein.



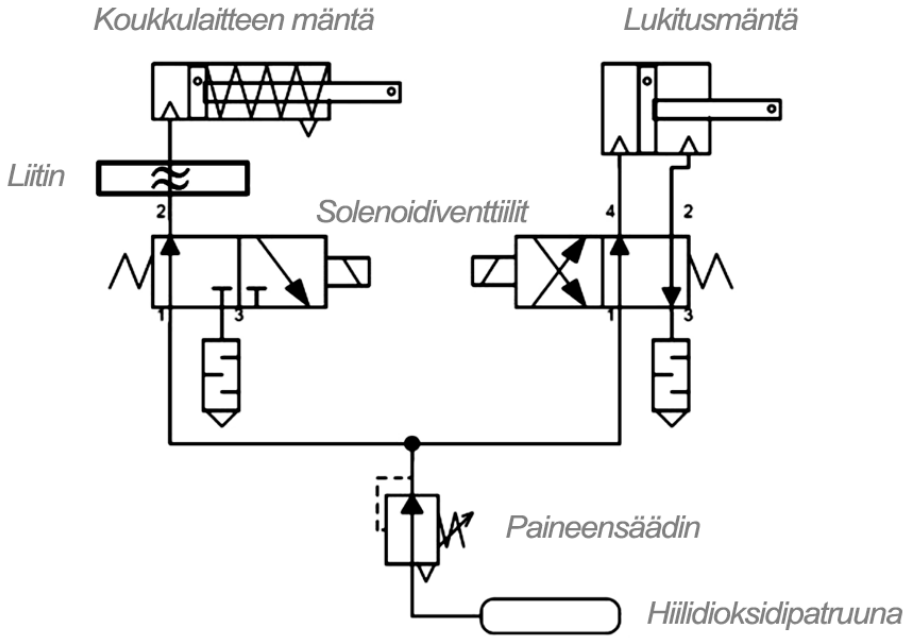
Kuva 6: Havainnollistava kaavio eri rakenteiden välisistä riippuvuuksista.

4.2 Pneumatiikan toimilaitteet

Kuvan 6 kaavio päättyy paineistettuun piiriin ja seuraavana järjestelmän rakenteissa kaasulla tuleekin vastaan erilaiset venttiilit ja muut pneumaattiset toimilaitteet. Erilaisia pneumaattisia toimilaitteita on lukematon määrä ja näiden valinta on hyvin konseptikohtaista. Näin ollen tässä työssä rajataan näistä tarkasteltavaksi vain yleisimmät eri tuotteissa ja tutkimuksissa esiintyvät venttiilit.

Pneumatiikassa venttiilien ohjaustapoja on viisi. Nämä ovat lihasohjaus, mekaaninen ohjaus, sähköinen ohjaus, paineohjaus ja yhdistetty ohjaus. Lihasohjauksesta ja mekaanisesta ohjauksesta käytetään myös yhteistä nimitystä suoraohjausventtiilit. (Hulkkonen 2008) Hiilidioksidipatruunoita sisältävissä järjestelmissä yleisimmät ohjaustavat ovat erilaiset suoraohjausventtiilit ja sähköiset venttiilit.

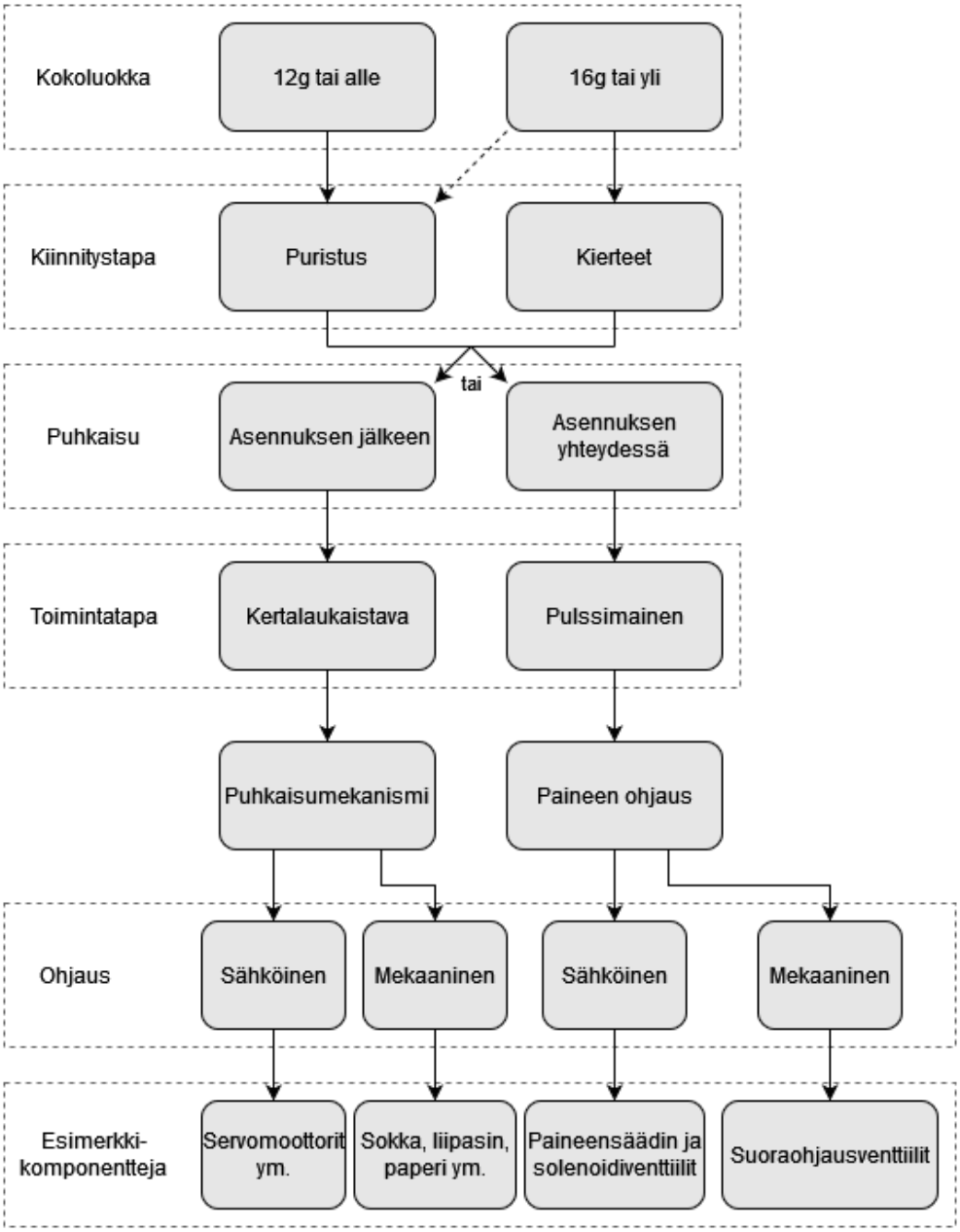
Sähköisiä venttiileitä käyttävissä järjestelmissä esimerkiksi Marchese et al. (2014), Li et al. (2019), Iversen et al. (2021) ja Bortotto et al. (2022) ovat kaikki päätyneet hyvin samanlaiseen rakenteeseen. Kaikissa laitteissa on paineensäädin ja solenoidiventtiilejä, jotka ohjaavat painetta sitä käyttäviin toimilaitteisiin (kuva 7). Solenoidiventtiilejä ohjataan mikroprosessoreilla. Laitteita yhdistää rakenteen lisäksi myös sama pulssimainen toimintaperiaate. Kerran laukaistavissa järjestelmissä on taas päädytty yksinkertaisempaan vaihtoehtoon, missä puhkaisumekanismin jälkeen muita paineen säätelyyn tarkoitettuja toimilaitteita ei ole käytetty (Bragason et al. 2015; Govind et al. 2015; Chan 2017).



Kuva 7: Sähköinen pulssimainen järjestelmä mukaillen lähdettä Iversen et al. (2021).

Suoraohjausventtiileitä käyttävistä pulssimaisesti toimivista järjestelmistä hyviä esimerkkejä ovat muun muassa ilma-aseet. Ilma-aseissa käytetään yleensä painonapilla ohjattua normaalisti suljettua 2/2-suuntaventtiiliä. Kyseisten venttiilien päällimmäinen huono puoli on niiden ohjaamiseen vaadittava kohtuullisen suuri voima, joka johtuu piirin ylipaineesta ja napin jousivoimasta, minkä vuoksi näitä venttiileitä käytetään usein pienikokoisissa tai -paineisissa järjestelmissä (Parr 2011, s. 81). Ilma-aseissa yleensä isketään venttiilin painonappia iskurilla, jolloin pulssista saadaan erityisen nopea.

Järjestelmien toimintaperiaatteella ja pääpiirteisellä rakenteella voidaan siis päätellä olevan yhteyksiä. Pulssimaisessa ohjauksessa rakenteiksi valitaan suoraohjausventtiilit tai sähköinen ohjaus. Patruuna puhkaistaan näissä asennuksen yhteydessä. Kertalaukaistavissa laitteissa käytetään hyväksi asennuksen jälkeistä patruunan puhkomista ja tähän suunnattuja mekaanisia tai sähköisiä puhkaisutapoja. Kuvaan 8 on piirretty kuvan 6 kaavion päivitetty versio rakenteiden välisistä riippuvuuksista.



Kuva 8: Tyypillisiä rakenteiden ja toimintatavan välisiä suhteita.

Kuvan 8 kaavio on kuitenkin vain suuntaa antava ja tyypillisimpiä kokonaisuuksia kuvaava. Esimerkiksi pulssimainen paineen vapautus voitaisiin käytännössä toteuttaa yhtenä pitkänä pulssina tai asennuksen jälkeinen puhkaisumekanismi voitaisiin tarpeen tullen yhdistää pulssimaiseen paineen ohjaukseen. Konseptikohtaisten asiakastarpeiden toteuttamiskelpoisuutta on arvioitava tarkemmin erikseen.

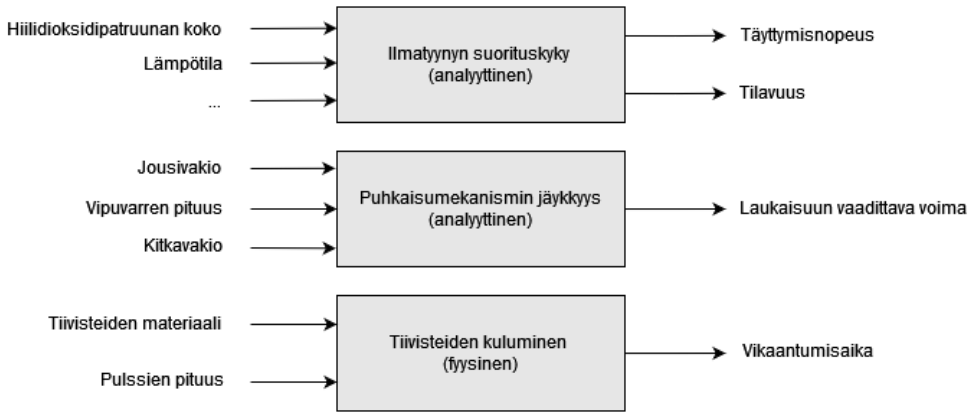
5. TEKNINEN TOTEUTTAMISKELPOISUUS

Hiilidioksidipatruunoita ympäröivät erilaiset rajoitteet ja riippuvuudet korostavat tarvetta tutkia konseptikohtaista teknistä toteuttamiskelpoisuutta. Teknisen toteuttamiskelpoisuuden arviointi on keskeinen osa tuotekehitystä. Tekninen toteuttamiskelpoisuus tarkoittaa sitä, että onko tekninen ongelma kohtuun rajoissa ratkaistavissa ja onko ratkaisu asiakastarpeiden ja muiden ennalta määrättyjen rajaehtojen mukainen.

Teknistä toteuttamiskelpoisuutta arvioidaan teknisellä toteuttamiskelpoisuustutkimuksella (engl. *technical feasibility study, TFS*). TFS on osa laajempaa toteuttamiskelpoisuustutkimusta, jossa teknisen osa-alueen lisäksi tutkitaan taloudellisia, laillisia, operatiivisia ja aikataulullisia muuttujia. TFS:n määritelmän rajat tuotekehityksessä ovat hyvin häilyviä ja kirjallisuudessa tästä on monia, joskus jopa ristiriitaisia tulkintoja. (Bause et al. 2014)

5.1 Mallipohjainen toteuttamiskelpoisuustutkimus

Ulrich ja Eppinger (2016, s. 105) esittävät eräänlaisen mallipohjaisen TFS:n, jossa analyyttisiin ja fyysisiin malleihin perustuen voidaan arvioida suunnittelussa tehtyjen päätösten vaikutuksia konseptin toimintaan. Analyyttiset mallit ovat edullisia ja niiden avulla saadaan tehtyä nopeita arvioita ja ennustuksia toiminnasta. Jos analyyttisiä malleja ei taas kyetä kehittämään, rakennetaan fyysinen prototyyppi, jolle tehdään tarvittavat kokeet. Fyysisten mallien kohdalla on hyvä noudattaa DOE-tekniikoita (engl. *design-of-experiments*), jotta rakennettavien mallien lukumäärä saadaan pidettyä mahdollisimman vähäisenä. Kuvaan 9 on lähdettä (Ulrich & Eppinger 2016, s. 106) mukaillen laadittu esimerkkinä erilaisia teknisen toteuttamiskelpoisuuden arviointimalleja mielivaltaiselle hiilidioksidipatruunoita käyttävälle konseptille.



Kuva 9: Esimerkkejä teknisen toteuttamiskelpoisuuden arviointimalleista.

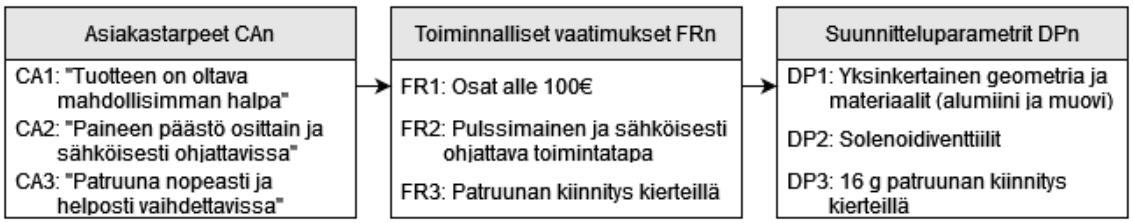
Kuvan 9 tapaiset mallit auttavat suunnittelijoita arvioimaan konseptin teknistä toteuttamiskelpoisuutta vaihtelemalla mallin sisääntulon muuttujia. Mallit ovat yleensä konseptikohtaisia ja muuttuvat konseptin muutosten mukana, joten mallinnus tapahtuu konseptin valinnan jälkeen. Kyseisten mallien vahvuutena on, että tarkastelun kohteiksi ei valikoidu sellaisia tavoitteita, joita ei voida kyseisen konseptin rajoissa saavuttaa. (Ulrich & Eppinger 2016, s. 105–106)

Hiilidioksidipatruunoiden kohdalla lämpötekniset rajoitteet ja mekaaniset riippuvuudet antavat suuntaa mallien tarkastelukohteiden ja luonteen valitsemiselle. Esimerkiksi pulssimaisessa toimintaperiaatteessa pulssin mitoitus osoittautui matemaattisesti hyvin vaativaksi, jolloin erilaiset mallipohjaiset tietokonesimulaatiot tai fyysiset prototyypit voisivat antaa luotettavampia ja todellisuutta paremmin kuvaavia tuloksia.

5.2 Järjestelmätason arviointi suunnittelumatriisilla

Järjestelmätasolla hiilidioksidipatruunoita sisältäville konsepteille teknistä toteuttamiskelpoisuutta arvioidessa ja malleja kehittäessä korostuvat asiakkaan tarpeet ja erilaiset rajoitteet. Bragason et al. (2015) käyttävät hiilidioksidipatruunalla laukeavan laskuvarjon tuotekehitysprosessissa tukena itsenäisyysaksiomaattista suunnittelumatriisia, joka korostaa yhteyksiä asiakastarpeiden, toiminnallisten vaatimuksien ja suunnitteluparametrien välillä. Lisäksi tämä ottaa esimerkiksi hiilidioksidipatruunoiden lämpötekniset ja mekaaniset rajoitteet hyvin huomioon.

Itsenäisyysaksiomaattinen suunnittelumatriisi laaditaan aluksi ”kääntämällä” asiakastarpeet (CA_n) toiminnallisiksi vaatimuksiksi (FR_n), joista edelleen suunnitteluparametreiksi (DP_n). Tämän jälkeen koostetaan matriisi, jonka riveinä ja sarakkeina ovat toiminnalliset vaatimukset ja suunnitteluparametrit (kuva 10). Matriisiin merkataan ”X”, mikäli sarake vaikuttaa riviin ja ”0”, mikäli näillä ei ole yhteyttä. Matriisista pyritään saamaan suunnitteluparametreja muuttamalla diagonaalimatriisi, eli ei-kytketty suunnittelumatriisi. Mikäli matriisi on kolmiomainen tai diagonaalin toinen puoli saadaan muokattua nolliksi lineaarialgebran avulla, on sekin tyydyttävä ratkaisu, eli irti kytketty suunnittelumatriisi. Kytketyiksi suunnittelumatriiseiksi kutsutaan niitä matriiseja, joita ei saada muokattua tällaisiksi. Käytännössä mitä enemmän nollia matriisi sisältää, sen parempi, sillä diagonaalin ulkopuoliset X:t tarkoittavat aina lisäyhteyksiä suunnitteluparametrien ja toiminnallisten vaatimusten välillä. Vähentämällä näitä yhteyksiä saadaan lopulta suunnitteluparametrit yhdistettyä tarkemmin asiakastarpeisiin. (Matt et al. 2020, s. 386–396)

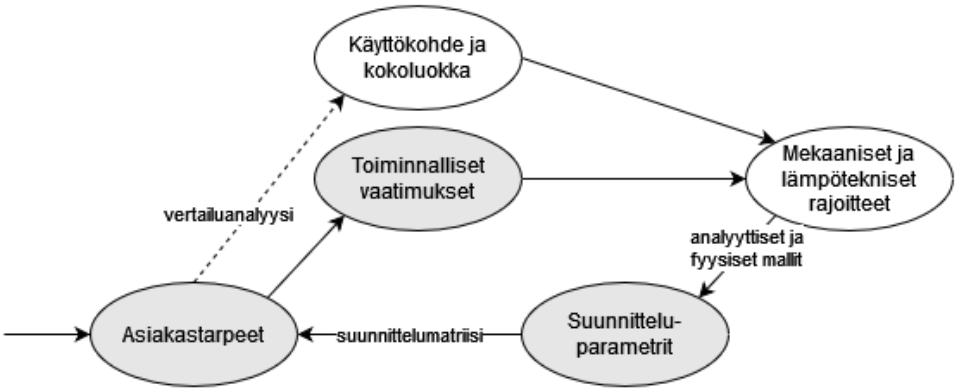


$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix}$$

Kuva 10: Esimerkki irti kytketystä aksiomaattisesta suunnittelumatriisista.

5.3 Hiilidioksidipatruunoita soveltavien konseptien arviointi

Itsenäisyysaksiomaattisen suunnittelumatriisin avulla voidaan luoda preliminäärinen arvio tuotekonseptin tekniselle toteuttamiskelpoisuudelle. Se ottaa hyvin huomioon järjestelmän kokonaisuutena, mutta ei itsessään ohjaa suunnittelutyössä eteenpäin. Toiminnallisten vaatimusten ja suunnitteluparametrien välisiä suhteita voidaan kuvata luvun 4.2 tapaisella valintakaaviolla. Yhdessä Ulrichin ja Eppingerin (2016) mallipohjaisen lähestymistavan kanssa suunnittelumatriisista ja valintakaaviosta voidaan muodostaa runko konseptien teknisen toteuttamiskelpoisuuden arvioinnille hiilidioksidipatruunoita soveltavissa tuotekehitysprojekteissa (kuva 11).



Kuva 11: Hiilidioksidipatruunoita soveltavien projektien arvioinnille ehdotettu runko.

Kuvassa 11 ehdotettu malli lähtee asiakastarpeista, joista käännetään toiminnallisia vaatimuksia. Alussa myös vertaillaan muita tuotteita ja tuotekehitysprojekteja. Toiminnalliset vaatimukset käännetään edelleen suunnitteluparametreiksi ottaen huomioon hiilidioksidipatruunoiden mekaaniset riippuvuudet ja lämpötekniikan tuomat rajoitteet. Suunnitteluparametrien hienosäädössä ja iterointikierrosten edetessä käytetään analyyttisiä ja fyysisiä malleja.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli tutkia hiilidioksidipatruunoita hyödyntäviä järjestelmiä yhdistäviä termodynamiikan ja mekatroniikan kysymyksiä tuotekehityksen näkökulmasta ja esittää löydettyjen rajoitteiden perusteella tapoja arvioida uusien tuotekonseptien teknistä toteuttamiskelpoisuutta. Työn alussa selvisi, että hiilidioksidipatruunoiden kokoluokista on syntynyt kirjoittamaton teollisuuden standardi. Kokoluokkien sisällä eri valmistajien patruunoissa voi olla kuitenkin vähäisiä eroja esimerkiksi ulkomitoissa. Tälle vaihtelulle on hyvä jättää suunnittelussa varaa, jotta eri valmistajien patruunat olisivat konseptiin yhteensopivia.

Seuraavaksi työssä selvisi, että hiilidioksidi säilytetään kertakäyttöisissä patruunoissa nesteen muodossa, mikä tuo niille erityistä kilpailukykyä eri käyttövoimien välillä korkean energiatiheyden vuoksi. Toisaalta nestemäisen hiilidioksidin vapautuksessa laitteen suorituskykyä voi haitata patruunan sisällä tapahtuva faasimuutos ja siitä aiheutuva paineen ja lämpötilan alenemiskierre. Tämä puolestaan rajoittaa hiilidioksidipatruunoiden mahdollisia uusia käyttökohteita ja hankaloittaa suorituskyvyn arviointia.

Tarkastelemalla alan tutkimuksia ja tutkimalla valmiita tuotteita, hiilidioksidipatruunoita soveltavat laitteet jaoteltiin toimintaperiaatteittain. Toimintaperiaatteita olivat pulssimainen paineen vapautus ja kertalaukaistava järjestelmä. Hiilidioksidipatruunoiden kiinnitys- ja puhkaisutavalla, koolla ja järjestelmän valitulla toimintaperiaatteella ilmeni selviä yhteyksiä. Kyseiset rakenteelliset, termodynaamiset ja muut yhteydet alleviivaavat konseptin teknisen toteuttamiskelpoisuuden arvioinnin tarvetta.

Hiilidioksidipatruunoita käyttävien järjestelmien teknisen toteuttamiskelpoisuuden arviointiin löytyi laaja-alaisempi mallipohjainen lähestymistapa sekä erityisesti asiakastarpeita, toiminnallisia vaatimuksia ja suunnitteluparametreja korostava itsenäisyysaksiomaattinen suunnittelumatriisi, jolla saadaan muodostettua hyvä preliminäärinen arvio toteuttamiskelpoisuudelle. Analyyttistä mallintamista hankaloittaa monimutkaiset termodynamiikan ilmiöt. Näin ollen empiiristen kokeiden ja mallipohjaisten tietokonesimulaatioiden käyttö voi olla tarkkuutta vaativissa tilanteissa suotavaa, ellei jopa suositeltavaa. Yhdistämällä itsenäisyysaksiomaattisen suunnittelumatriisin perusperiaatteen, mallipohjaisen toteuttamiskelpoisuustutkimuksen sekä tutkimuksessa löydetyt mekaaniset ja lämpötekniset rajoitteet, saatiin luotua ehdotus kattavalle hiilidioksidipatruunoita soveltavien tuotekonseptien tekniselle toteuttamiskelpoisuustutkimukselle.

Tutkimuksen aihe oli laaja eikä siinä päästy uppoutumaan kovin syvälle mielenkiintoisiin matkan varrella ilmenneihin lisäkysymyksiin. Aihetta sivuavien tutkimusten vähäisyys, standardien puute ja tiedon heikko jäljitettävyys hankaloittivat työn tekoa, mutta toimivat samalla tärkeänä motiivina. Lopuksi ehdotettua teknisen toteuttamiskelpoisuustutkimuksen runkoa ei myöskään päästy testaamaan. Tutkimus kuitenkin antaa pohjaa ja korostaa tarvetta jatkotutkimusaiheille esimerkiksi nestemäisen hiilidioksidin käyttäytymisestä pneumatiikassa tai teknisen toteuttamiskelpoisuuden tutkimisessa.

LÄHTEET

Ahmad, M., Buit, L., Florisson, O., Hulsbosch-Dam, C., Osch, M., Spruijt, M. & Davolio, F. (2013). Experimental Investigation of CO2 Outflow from a High-pressure Reservoir. Energy Procedia. Vol.37 pp. 3005–3017 DOI: 10.1016/j.egypro.2013.06.187

Ballinger, J. & Shugar, G. (2011). Chemical Technicians' Ready Reference Handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill. ISBN 9780071745925

Bause, K., Radimersky, A., Iwanicki, M. & Albers, A. (2014). Feasibility Studies in the Product Development Process. Procedia CIRP. Vol.21 pp. 473–478 DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.128

Bragason, G., Þorsteinsson, S., Karlsson, R., Grosse, N. & Foley, J. (2015) Heat-activated Parachute Release System. Procedia CIRP. Vol.34 pp. 131–136 DOI: 10.1016/j.procir.2015.07.060

Bortotto, A., Agli, G., Favotto, F., Mattiazzi, F., Mihailovic, M., Pozzato, N., Branz, F., Olivieri, L., Caon, A. & Francesconi, A. (2022). ERMES: Design and preliminary simulations for an autonomous docking manoeuvre. 4th Symposium on Space Educational Activities (SSAE). 6 p. DOI: 10.5821/conference-9788419184405.081

Çengel, Y. & Boles, M. (2006). Thermodynamics: An Engineering Approach. 5th ed. McGraw-Hill. 881 p. ISBN 9780072884951

Chan, S. (2017). Airbag system for hip-fracture protection due to falls: mechanical system design and development. Chinese University of Hong Kong, Division of Orthopaedics and Traumatology. 110 p. Saatavilla (viitattu 19.2.2024): https://repository.lib.cuhk.edu.hk/en/item/cuhk-326019

Crosman Corporation (2020). Crosman Product Dates of Manufacture [verkkosivu]. Päivitetty 16.12.2020. Saatavissa (viitattu 18.2.2024): https://discover.crosman.com/blog/crosman-product-dates-of-manufacture

Ellis, M. (2017). Development of a compact system for field euthanasia of small mammals. Journal of Mammalogy. Vol.98(4), pp. 1211–1214. DOI:10.1093/jmammal/gyx072

Govind, V., Kumar, S., Sinoj, T., Thulasidas, K. & Sebastian, M. (2015). Design and Development of Depth Activated Inflatable Recovery System for Undersea Towed Sensor Arrays. Aquatic Procedia. Vol.4, pp. 449–457. DOI: 10.1016/j.aqpro.2015.02.096

Hulkkonen, V. (2008). Pneumatiikka - venttiilit. FLUID klinikka. Vol.18. 20 s. Saatavissa (viitattu 10.3.2024): https://fluidfinland.fi/7

iSi Components GmbH. (ei pvm.). Technical product information [verkkosivu]. Saatavissa (viitattu 18.2.2024): https://swadmin.isi.com/media/b2/50/41/1685688064/iSi_technical_leaflet_en.pdf

Iversen, N., Kramberger, A., Schofield, O. & Ebeid, E. (2021). Pneumatic-Mechanical Systems in UAVs: Autonomous Power Line Sensor Unit Deployment. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 548–554. DOI:10.1109/ICRA48506.2021.9560946

Li, B., Greenspan, B., Mascitelli, T., Raccuglia, M., Denner, K., Duda, R. & Lobo, M. (2019). Design of the Playskin Air: A User-Controlled, Soft Pneumatic Exoskeleton. Proceedings of the 2019 Design of Medical Devices Conference. American Society of Mechanical Engineers. DOI: 10.1115/DMD2019-3231

LISS Zrt. (2023). Special chargers [verkkosivu]. Saatavissa (viitattu 18.2.2024): https://liss-group.com/solutions

Marchese, A., Onal, C. & Rus, D. (2014). Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators. Soft Robotics. Vol.1(1), pp. 75–87, DOI: 10.1089/soro.2013.0009

Matt, D., Modrak, V. & Zsifkovits, H. (2020). Industry 4.0 for SMEs: challenges, opportunities and requirements. Cham, Sveitsi: Palgrave Macmillan. 412 p. ISBN: 9783030254254

Merz, R. (1962). Gas cartridge. Crosman Arms Co Inc, Yhdysvallat. Pat. US3039646A, Hak.nro US66253A, 31.10.1960, (19.6.1962), 4 p. Saatavissa: https://patents.google.com/patent/US3039646A

Nippon Tansan Gas Co.,Ltd. [NTG] (2022). Mini gas cylinders – specifications [verkkosivu]. Saatavissa (viitattu 18.2.2024): https://ntg.co.jp/english/products/#mini-gas-cylinders

Parr, A. (2011). Hydraulics and Pneumatics - A Technician's and Engineer's Guide. 3rd edition. Butterworth-Heinemann. 238 p. ISBN 9780080966748. DOI: 10.1016/C2009-0-64113-1

Rohrbach, Z., Buresh, T. & Madsen, M. (2011). Modeling the exit velocity of a compressed air cannon. American Journal of Physics. Vol.80(1), pp. 24–26 DOI: 10.1119/1.3644253

Ruokavirasto (2023). Lopetus- ja teurastusmenetelmät [verkkosivu]. Päivitetty 16.5.2023. Saatavissa (viitattu 18.2.2024): https://www.ruokavirasto.fi/elaimet/elainten-hyvinvointi/

SFS-EN 16509:en (2014). Transportable gas cylinders. Non-refillable, small transportable, steel cylinders of capacities up to and including 120 ml containing compressed or liquefied gases (compact cylinders). Design, construction, filling and testing. Suomen standardoimisliitto, Helsinki, 16 p.

Ulrich, K. T. & Eppinger, S. D. (2016). Product design and development. 6th ed. New York: McGraw-Hill. 432 p. ISBN 9780078029066

United Moulders Limited [UML] (2024). How our Automatic Inflation System Works [verkkosivu]. Saatavissa (viitattu 8.3.2024): https://www.uml.co.uk/how_it_works.html

Wehner, M., Tolley, M., Mengüç, Y., Park, Y., Mozeika, A., Ding, Y., Onal, C., Shepherd, R., Whitesides, G. & Wood, R. (2014). Pneumatic Energy Sources for Autonomous and Wearable Soft Robotics. Soft Robotics. Vol.1(4), pp. 263–274, DOI: 10.1089/soro.2014.0018

Weida, M. (1947). Welded bulb and cap. Knapp Monarch Co, Yhdysvallat. Pat. US2425448A, Hak.nro US535893A, 16.5.1944, (12.8.1947), 3 p. Saatavissa: https://patents.google.com/patent/US2425448A

Woojin S., Jihoon K., Kyeong sik, J., Thi L., Jeonglae K., Dong K., Hyoungsoon L. & Jaiyoung, R. (2023). Parametric study of a projectile launched by a compressed air cannon. Journal of Mechanical Science and Technology. Vol.37(11), pp. 5913–5933. DOI: 10.1007/s12206-023-1029-x

Zhou, Y., Huang, Y., Tian, G., Yuan, Y., Zeng, C., Huang, J. & Tang, L. (2022). Classification and characteristics of supercritical carbon dioxide leakage from a vessel. Energy. Vol.258 DOI: 10.1016/j.energy.2022.124790

LIITE A: HIILIDIOKSIDIPATRUUNOIDEN TARJONTA VERKKOKAUPOISSA

Myyjä	Merkki	CO2 (g)	Käyttötarkoitus	Kierteet?	kpl	Hinta (€)	Hinta á (€)	€/(g CO2)
XXL	Gamo	12	ilma-aseet	ei	5	4.90	0.98	0.082
	SKS- Germany	24	pyöräily	kyllä	2	9.99	5.00	0.208
	Daisy	12	ilma-aseet	ei	10	11.99	1.20	0.100
	Umarex	12	ilma-aseet	ei	5	11.90	2.38	0.198
Biltema	-	16	pyöräily	kyllä	2	8.90	4.45	0.278
	-	33	veneily	kyllä	1	24.90	24.90	0.755
	-	33	veneily	kyllä	1	25.90	25.90	0.785
Motonet	Gamo	12	ilma-aseet	ei	5	9.99	2.00	0.167
	Zefal	25	pyöräily	kyllä	2	7.99	4.00	0.160
	Marinepool	45	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.598
	Marinepool	33	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.815
	Marinepool	24	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	1.121
	Marinepool	38	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.708
	Marinepool	38	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.708
	Marinepool	60	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.448
	Halkey-Roberts	33	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.815
	Halkey-Roberts	38	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.708
Bauhaus	Baltic	33	veneily	kyllä	1	14.90	14.90	0.452
K-Rauta	Baltic	33	veneily	kyllä	1	24.90	24.90	0.755
Proairsoft	-	8	ilma-aseet	ei	10	10.00	1.00	0.125
	ASG	88	ilma-aseet	kyllä	1	12.90	12.90	0.147
	Swiss Arms	12	ilma-aseet	ei	10	9.95	1.00	0.083
Tokmanni	Swiss Arms	12	ilma-aseet	ei	10	9.99	1.00	0.083
Airsoftnet	ASG	12	ilma-aseet	ei	1	1.00	1.00	0.083
	Umarex	12	ilma-aseet	ei	10	9.00	0.90	0.075
	Walther	12	ilma-aseet	ei	10	13.00	1.30	0.108
Ase ja Erä	ASG	12	ilma-aseet	ei	50	35.00	0.70	0.058
	Borner	88	ilma-aseet	kyllä	10	85.00	8.50	0.097
	Umarex	88	ilma-aseet	kyllä	10	100.00	10.00	0.114
Puuilo	Swiss Arms	12	ilma-aseet	ei	10	7.99	0.80	0.067
Sissos	-	12	ilma-aseet	ei	20	15.00	0.75	0.063
	JT	90	ilma-aseet	kyllä	2	19.95	9.98	0.111
Kärkkäinen	Swiss Arms	12	ilma-aseet	ei	10	7.90	0.79	0.066
	Baltic	10	veneily	kyllä	1	17.90	17.90	1.790
	Baltic	16	veneily	kyllä	1	17.90	17.90	1.119
	Baltic	20	veneily	kyllä	1	17.90	17.90	0.895
	Baltic	38	veneily	kyllä	1	31.90	31.90	0.839
	Baltic	45	veneily	kyllä	1	31.90	31.90	0.709
	Baltic	60	veneily	kyllä	1	34.90	34.90	0.582
	Crewfit	33	veneily	kyllä	1	38.00	38.00	1.152
	Crewsaver	60	veneily	kyllä	1	69.00	69.00	1.150
	Ocean Vario	33	veneily	kyllä	1	59.00	59.00	1.788
	Marinepool	45	veneily	kyllä	1	37.90	37.90	0.842
	Crewsaver	23	veneily	kyllä	1	39.00	39.00	1.696
	Crewsaver	38	veneily	kyllä	1	42.00	42.00	1.105
	UML	38	veneily	kyllä	1	29.90	29.90	0.787
	Alpha&Euro	33	veneily	kyllä	1	26.50	26.50	0.803
	Marinepool	33	veneily	kyllä	1	26.90	26.90	0.815
Melkkobrew	Brewferm	16	elintarvikkeet	ei	10	13.90	1.39	0.087
	-	8	elintarvikkeet	ei	10	5.60	0.56	0.070
Cycli	Bontrager	25	pyöräily	kyllä	1	9.00	9.00	0.360
	Specialized	25	pyöräily	kyllä	1	9.00	9.00	0.360
Clas Ohlson	Baltic	20	veneily	kyllä	1	19.99	19.99	1.000
Mallaspuoti	Brewferm	16	elintarvikkeet	ei	10	10.00	1.00	0.063
	Kegland	16	elintarvikkeet	kyllä	10	20.90	2.09	0.131
Prisma	Zefal	16	pyöräily	kyllä	1	6.99	6.99	0.437