

**6. SUKUPOLVEN ILMATAISTELUKONE – TEKNOLOGISEN KEHITYKSEN VAIKUTUS ILMATAISTELUKONEEN KEHITYSSUUNTIIN VUOTEEN 2035 MENNESSÄ**

Pro gradu -tutkielma

Yliluutnantti  
Mika Joensuu

SMOHJ 10  
Ilmasotalinja

Huhtikuu 2016

## MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi SMOHJ10	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Mika Joensuu	
Tutkielman nimi <b>6. sukupolven ilmataistelukone – teknologisen kehityksen vaikutus ilmataistelukoneen kehityssuuntiin vuoteen 2035 mennessä</b>	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kirjasto
Aika Huhtikuu 2016	Tekstisivuja 64 Liitesivuja 2
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Tutkielmassa tarkastellaan vuoteen 2035 mennessä tapahtuvaa kehitystä ilmataistelukoneen rakenteessa ja osajärjestelmissä. Ilmataistelukoneen kehityssuuntien arviointi perustuu eri teknologian osa-alueilla tapahtuvaan kehitykseen. Tutkielmassa ilmataistelukone kuvaa monitoimihävittäjää, jonka yhtenä pääroolina on ilmamaaleja vastaan tapahtuva sodankäynti.</p> <p>Tutkielma on luonteeltaan kartoittava ja tulevaisuuteen sijoittuva laadullinen tutkimus. Siinä käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat kartoittava tutkimus ja skenaariotutkimus sekä niitä tukeva kirjallisuusselvitys.</p> <p>Tutkielman tehtävänä on selvittää, mitkä ovat ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä teknologisen kehityksen perusteella. Pääongelman tueksi on asetettu seuraavat alatutkimusongelmat: Kuinka ilmataistelukoneen teknologiaosa-alueet tulevat kehittymään vuoteen 2035 mennessä? Mitkä uudet tai jatkokehitetyt teknologiset ratkaisut ovat integroitavissa ilmataistelukoneeseen vuonna 2035? Kuinka uusien tai jatkokehitettyjen teknologioiden käyttöönotto vaikuttaa ilmataistelukoneen kehityssuuntiin?</p> <p>Teknologinen kehitys tulee mahdollistamaan seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen käytettävyyden, selviytymiskyvyn, kustannustehokkuuden sekä monitoimikyvyn merkittävän nostamisen. Eri teknologian osa-alueilla tapahtuvan kehityksen yhteisinä ajureina toimivat kaupallisten sovellusten laajempi hyödyntäminen sotilasjärjestelmissä sekä prosessorien laskentatehon kasvaminen.</p> <p>Uusia sovellusaloja ilmataistelukoneen kehitystyössä tulevat olemaan miehittämättömän ilma-alusteknologian käyttöönotto sekä suurteholaserin integroiminen ilmataistelukoneeseen.</p>	
<b>AVAINSANAT</b> <p>ilmataistelukone, seuraavan sukupolven ilmataistelukone, kuudennen sukupolven hävittäjä, hävittäjän kehitys, ilma-alusteknologia</p>	

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>TUTKIMUSASETELMA .....</b>	<b>3</b>
2.1	Ilmataistelukone sekä ilmataistelukoneen toimintaympäristö ja kehitystä ajavat tekijät .....	3
2.2	Tutkimusongelmat ja rajaus .....	6
2.3	Aiempi tutkimus ja lähdemateriaalin esittely .....	8
2.4	Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät .....	10
<b>3</b>	<b>ILMATAISTELUKONEEN TEKNOLOGIAOSA-ALUEIDEN KEHITYSNÄKYMÄT .....</b>	<b>14</b>
3.1	Ilma-aluksen rakenne ja järjestelmien integroiminen .....	14
3.2	Aerodynamiikka .....	18
3.3	Voimalaitetekniikka .....	20
3.4	Sensortechnologiat .....	23
3.5	Häivetekniikka ja havaittavuus .....	26
3.6	Miehittämätön ilma-alusteknologia .....	29
3.6.1	Miehittämätön ilma-alus .....	29
3.6.2	UCAV – kuudennen sukupolven operatiivinen ilmataistelukone? .....	31
3.7	Tiedonsiirto ja verkostokeskeisyys .....	35
3.8	Uudet teknologiat .....	38
3.8.1	Ilma-alukseen sijoitettava suurteholaser-järjestelmä .....	38
3.9	Yhteenveto .....	41
<b>4</b>	<b>ILMATAISTELUKONEEN KEHITYS VUOTEEN 2035 MENNESSÄ .....</b>	<b>44</b>
4.1	Hävittäjän kehitys 1940-luvulta nykypäivään .....	44
4.1.1	1.–4. hävittäjä sukupolvi .....	44
4.1.2	5. hävittäjä sukupolvi – Nykypäivän ilmasodankäynnin kärki .....	47
4.2	Vuoteen 2035 mennessä ilmataistelukoneeseen integroitavissa olevat uudet ja jatkokehitetyt teknologiat sekä niiden käyttöönoton vaikutukset ilmataistelukoneen kehityssuuntiin .....	49
4.3	Ilmataistelukoneen 6. sukupolvi – ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä .....	55
4.3.1	Kehityssuunta 1 – Nykyisten osajärjestelmien sekä niissä käytettävien teknologioiden jatkokehitys .....	56
4.3.2	Kehityssuunta 2 – Selviytymiskykyinen miehittämätön ilmataistelukone korkean riskin tehtäviin .....	57
4.3.3	Kehityssuunta 3 – Monitoimikone, jonka tehtäväkentässä ilmataistelun suhteellinen rooli on pienentynyt .....	58

4.3.4	Yhteenveto ilmataistelukoneen kehityssuunnista vuoteen 2035 mennessä..	59
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	60
5.1	Johtopäätökset ilmataistelukoneen kehityksestä .....	60
5.2	Tutkimusmenetelmä vs. tutkimuskysymykset.....	61
5.3	Tulosten merkitys ja luotettavuus.....	62
5.4	Miten tutkimusta voisi jatkaa?.....	64
	LÄHTEET .....	65
	LIITTEET.....	70

## **6. SUKUPOLVEN ILMATAISTELUKONE – TEKNOLOGISEN KEHITYKSEN VAIKUTUS ILMATAISTELUKONEEN KEHITYSSUUNTIIN VUOTEEN 2035 MENNESSÄ**

### **1 JOHDANTO**

Ilmataistelukone on yksi monimutkaisimmista yhdeksi fyysiseksi kokonaisuudeksi integroiduista taistelujärjestelmistä. Teknologisen kehityksen myötä ilmataistelukoneiden kehitystyö on ollut nopeaa, eikä kehitys ole hidastumassa nähtävissä olevassa tulevaisuudessa. Nykyaikaisimpien ilmataistelukoneiden, viidennen sukupolven hävittäjien ominaisuuksiksi voidaan lukea muun muassa kehittyneiden häivetekniikoiden käyttö, moottorien suihkuvirtauksen suuntaus, elektronisesti keilaava tutka sekä kehittynyt sensorifuusio ja kyky verkostokeskeiseen toimintaan. Ensimmäinen operatiivisessa käytössä oleva viidennen sukupolven hävittäjä, Yhdysvaltain F-22 Raptor, saavutti täysimääräisen operatiivisen valmiuden joulukuussa 2007 [7]. Muiden kehitteillä olevien viidennen sukupolven hävittäjien voidaan odottaa tulevan käyttöön seuraavien vuosikymmenten aikana. Viides hävittäjä sukupolvi on elinkaarsaan vasta käytön alkuvaiheessa, mutta seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen kehitystyö on jo ajankohtaista. Kuudennen sukupolven ilmataistelukoneen kehitysprojekteja on julkisten tietojen perusteella käynnissä ainakin Yhdysvalloilla. Oletettavaa on, että myös muut suurvaltat kehittävät seuraavan sukupolven ilmataistelukonetta vähintään osajärjestelmätasolla.

Tämän tutkimustyön tavoitteena on selvittää, mitkä ovat ilmataistelukoneen keskeiset kehityssunnat vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteeseen pääsemiseksi tutkimuksessa kartoitetaan, kuinka eri ilmataistelukoneen rakenteeseen ja järjestelmiin vaikuttavat teknologian osa-alueet tulevat kehittymään seuraavina vuosikymmeninä. Kuudennen sukupolven ilmataistelukoneet ovat vielä suunnitteluasteella, ja saatavilla oleva julkinen tieto niiden kehitysprojekteista on vähäistä. Tästä syystä 6. sukupolven ilmataistelukone ei tässä tutkimuksessa kuvaa yksittäistä kehitysprojektia tai konetyyppejä, vaan koostuu niistä teknologisista ratkaisuista, jotka arvion mukaan ovat integroitavissa ilmataistelukoneeseen vuoteen 2035 mennessä.

Nykyaikainen ilmataistelukone on pitkälle integroitu sensori-, ase-, navigointi-, kommunikointi- ja omasuojajärjestelmien muodostama kokonaisuus. Lisäksi se asettaa suuret haasteet lavetin voimalaiteratkaisuille sekä muotorakenteen suunnittelulle. Keskeisin ilmataistelukoneen suorituskykyyn vaikuttava kokonaisuus on sen kyky hyödyntää sähkömagneettista spektriä eri järjestelmissään. Perinteisesti hävittäjän selkeänä päätehtävänä on ollut ilmasota muita ilma-aluksia vastaan. Ilmataistelukoneen kehittyvä monitoimikyky on tuonut ilmatilan hallinnan ja torjuntatehtävien rinnalle myös muita tehtäviä, kuten pintamaaleja vastaan suunnatut rynnäköinti- ja pommitustehtävät. Tulevaisuudessa ilmataistelun suhteellinen rooli tulee edelleen heikkenemään ilmataistelukoneen tehtäväkentässä, joka laajenee erilaisiin tiedustelun ja elektronisen sodankäynnin tehtäviin.

Kuudenteen ilmataistelukonesukupolven liittyy useita mielenkiintoisia kehitysnäkymiä. Viime vuosituhanella esitetyistä arvioista poiketen tämän hetken moderneimmat hävittäjätyyppit ovat miehittyjä, eikä niistä olla lähitulevaisuudessa valmistamassa miehittämättömiä versioita. Laskentatehon sekä materiaali- ja tiedonsiirtoteknologioiden kehitys mahdollistaa keskeisten miehittämättömän ilmataistelukoneen käyttöönottoon liittyvien ongelmien ratkaisemisen 2030-luvulle mentäessä. Teknologisen kehityksen perusteella onkin mahdollista, että kuudennen sukupolven edustajissa tullaan näkemään autonomiseen toimintaan kykenevä miehittämätön ilmataistelukone. Miehittämättömän teknologian lisäksi myös muiden uusien sovellusten, kuten suurteholaserin, integroiminen ilmataistelukoneeseen on arvion mukaan mahdollista.

Tutkimuksen aihe on ajankohtainen myös Puolustusvoimien näkökulmasta. Ilmavoimilla on käynnissä ilmataistelukoneen hankintaprosessi, ja uusien koneiden on tarkoitus korvata F/A-18 Hornetit vuoteen 2030 mennessä. Esitettyjen vaihtoehtojen perusteella valinta kohdistuu 5. tai johonkin kehittyneimmistä 4. hävittäjä sukupolven edustajista. Vaikka 6. sukupolven ilmataistelukoneiden käyttöönotto ei todennäköisesti tule tapahtumaan Hornetin seuraajan hankintaprosessin aikana, on sen tutkiminen perusteltua Suomen hävittäjäkaluston uusimisen näkökulmasta. Ilmataistelukoneen järjestelmiin ja suorituskykyyn vaikuttavien teknologioiden tutkiminen antaa tietoa siitä, minkälaisia asejärjestelmiä ja suorituskykyjä kehitetään käytettäväksi tulevaisuuden ilmaoperaatioissa. Tämän lisäksi tutkimus antaa tietoa niistä uhkamalleista tai yhteistoimintavaatimuksista, joihin Hornetin seuraajan on kyettävä vastaamaan.

## 2 TUTKIMUSASETELMA

### 2.1 Ilmataistelukone sekä ilmataistelukoneen toimintaympäristö ja kehitystä ajavat tekijät

Hävittäjä on sotilasilma-alus, joka on ensisijaisesti suunniteltu käymään ilmataistelua muita ilma-aluksia vastaan. Hävittäjien käytön päätarkoituksena on saavuttaa ilmaherruus taistelualueella joko täysimittaisesti tai aikaan ja paikkaan sitoen. Hävittäjien kehitys on ollut niiden historian aikana hyvin nopeaa. Tämä on ollut seurausta erityisesti nopeasta teknologisesta kehityksestä, mutta kehitystä on jouduttanut myös hävittäjille arvioitu merkittävä rooli osana sodankäyntiä. Hävittäjiin on pyritty liittämään uusinta saatavilla olevaa teknologiaa. Ensimmäisten hävittäjä sukupolvien aikana kehitys kohdistui pääosin rakenteen, aerodynaamisten ominaisuuksien sekä voimalaitetekniikan ratkaisuiden parantamiseen. Myöhemmin sähkömagneettisen spektrin laajempi hyödyntäminen sekä digitalisoituminen ovat tarjonneet täysin uusia mahdollisuuksia hävittäjän ja sen järjestelmien kehittämiseen. Muun muassa suhteellisen pienestä koosta ja ilmasijoitteisuuden aiheuttamista rajoituksista johtuen kehitystyö on ollut erittäin haastavaa ja resursseja vievää. Lopputuloksena hävittäjät ovat kuitenkin edustaneet aikakautensa kärkeä niin sotateollisuuden kuin yleisesti teknologisen kehityksen näkökulmasta tarkasteltuna.

Yhtenä hävittäjän selkeänä kehitystrendinä on ollut multirole-kyky, eli valmius toimia ilmasta ilmaan -tehtävien (engl. Air to Air, A/A) lisäksi myös muissa tehtävissä. Kasvavien kustannuspaineiden ja järjestelmien kehittymisen myötä monitoimikyvyn merkitys tulee edelleen kasvamaan. Kun muiden ilma-alusten torjumisen suhteellinen merkitys hävittäjän tehtäväkentässä vähenee jatkuvasti, kuvaa hävittäjä terminä yhä sen roolia sodankäynnissä. Tässä tutkimuksessa seuraavasta hävittäjä sukupolvesta käytetäänkin käsitettä kuudennen sukupolven ilmataistelukone, jonka tarkempi määrittely ja rajaus tehdään alaluvussa *tutkimusongelmat ja rajaus*.

Nykymuotoiset ilmavoimat voidaan katsoa muodostuneen toisen maailmansodan aikana. Siihen saakka ilmavoimat toimivat maa- ja merivoimien osana ensisijaisesti tiedusteluvälineenä. Toisen maailmansodan loppuun mennessä sodankäynnin kehitys oli johtanut siihen, että ilmapuolustus saavutti tasa-arvoisen aseman maa- ja merivoimien kanssa, ja ilmavoiman merkitys sotateoimien menestykselle kasvoi elintärkeäksi. Uuden teknologian kehittämisen myötä lentokoneiden käyttömahdollisuuden laajenivat ilmaherruuden saavuttamiseen, maa- ja meri-

joukkojen tukemiseen, kaukotiedusteluun ja sukellusvenetorjuntaan sekä joukkojen kuljetukseen. Ilmavoimat osoittautuivat myös käytettäviksi itsenäisesti strategisiin tehtäviin [42, s. 291–292]. Ilma-aseen roolin voimakkaan kasvun myötä ilmatilan hallinta nousi merkittävään asemaan sotilasoperaatioiden suunnittelussa, mikä osaltaan lisäsi panostusta hävittäjien kehitystyöhön.

Ilmaylivoima mahdollistaa hyökkäyksellisten ilmaoperaatioiden suorittamisen mitä tahansa viholliskohdetta vastaan. Kääntäen, jos puolustajalla on ilmaherruus omalla alueellaan, ei hyökkääjä kykene toteuttamaan hyökkäyksiä tehokkaasti strategisia tai taktisia kohteita vastaan [42, s. 299]. Tästä syystä ilmaherruuden merkitystä sotilasoperaatioiden onnistumiselle on korostettu erityisesti länsimaisissa ilmasodan teorioissa ja doktriineissa. Muun muassa Yhdysvaltain ilmavoimien majuri William K. Lewis sanoo tutkimuksessaan *UCAV – The Next Generation Air-superiority Fighter* ilmaherruuden saavuttamisen olevan olennainen sotilaallinen tehtävä. Vaikka ilmatilan hallinta ei Lewisin mukaan itsessään johda vihollisjoukkojen tuhoamiseen tai lamauttamiseen, antaa se strategisen joustavuuden ja toiminnanvapauden muille joukoille toteuttaa kyseisen tehtävän. Ilmaherruus siten mahdollistaa muun muassa maalla ja merellä toimivien joukkojen voiman kohdentamisen, lähi-ilmatuen (CAS) ja maa-joukkojen liikkumisvapauden toteuttamisen [28].

Hävittäjillä on keskeinen rooli ilmaherruuden saavuttamisessa. Hävittäjien kehitystyö ja valmistaminen, sekä niiden käyttö ja ylläpitäminen ovat kuitenkin hyvin kalliita projekteja. Tästä syystä hävittäjien kustannustehokkuutta ja merkitystä tulevaisuuden sodankäynnissä on myös kritisoitu. Nykyaikainen ilmasota soveltuu hyvin aselavettien välisiin taisteluihin sekä tavanomaisesti organisoitua ja varustettua vihollista vastaan. Rekkedal nostaa teoksessaan *Nykyaikainen sotataito – sotilaallinen voima murroksessa* puolestaan esiin kysymyksen, onko uusilla ilmataisteluun kehitetyillä alustoilla selvää ja ilmeistä tehtävää sodankäynnin kahdessa äärimmäisyydessä, ydinsodassa ja matalan intensiteetin konflikteissa. Tästä seuraa myös kysymys, onko sotavoimilla varaa pitää äärimmäisen kalliista alustoista koostuvaa voimaa, jonka ensisijaisena tehtävänä on taistelu samantyyppisiä alustoja vastaan [42, s. 306]. Kysymyksenasettelu on yksinkertaistettu ja ääritilanteisiin perustuva, eikä luonnollisesti kykene kattamaan koko kenttää, jossa ilmataistelukone nyt ja tulevaisuudessa toimii. Se kuitenkin kuvaa hyvin sitä, kuinka sodankäynnissä tapahtuvat muutokset voivat merkittävästi vaikuttaa eri järjestelmien kehitykseen.



Sodankäynnin muutoksen lisäksi ilmataistelukoneen kehitykseen vaikuttavat resurssit, teknologinen kehitys ja siihen liittyvät innovaatiot, politiikka sekä visiot ja arvot. Tässä tutkimuksessa ilmataistelukoneen kehitystä arvioidaan ensisijaisesti teknologisen kehityksen kautta. Tällöin kehitys eri teknologiaosa-alueilla antaa viitteitä siitä, mihin suuntaan ilmataistelukoneen kehityksen voi odottaa suuntautuvan tulevaisuudessa. On kuitenkin huomattava, että teknologinen valmius jonkin uuden sovelluksen käyttämiseen ei välttämättä yksin johda kyseisen sovelluksen käyttöönottoon taistelujärjestelmässä. Matti Kamppisen ym. toimittaman *Tulevaisuudentutkimus*-teoksen mukaan teknologian monimutkaistuesssa ja siihen liittyvien riskien lisääntyessä teknologian kehittämiseen ja soveltamiseen liittyvät eettiset kysymykset nousevat tulevaisuudessa yhä keskeisemmälle sijalle [24, s. 463]. Huomio on aiheellinen tarkasteltaessa esimerkiksi miehittämätöntä teknologiaa ja herättää seuraavan kysymyksen: Voiko päätöksentekovastuuta siirtää ihmiseltä koneelle tilanteissa, jossa päätös (esimerkiksi aseiden laukaisemisesta) todennäköisin syin johtaa ihmishenkien menettämiseen?

Teknologisen kehityksen vaikutukset ilmataistelukoneen kehitykseen voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen. Ensimmäinen on ilmataistelukoneen rakenteeseen ja järjestelmiin vaikuttavien teknologiaosa-alueiden kehitys. Uudet innovaatiot sekä kehitystyö aikaisemmissa ratkaisuissa eri teknologian osa-alueilla vaikuttavat ilmataistelukoneen kokonaisuuden muodostumiseen. Siten tämän kehityksen tarkastelu mahdollistaa myös ilmataistelukoneen kokonaisratkaisun kehittymisen arvioinnin. Toisena teknologisen kehityksen osa-alueena ovat teknologian yleiset kehitystrendit. Kehitystrendien suoraa vaikutusta jonkin järjestelmän kehittymiselle on kuitenkin vaikea arvioida. Nämä kehitystrendit, kuten laskentatehon kehittyminen, nanoteknologia sekä digitalisaatio vaikuttavat teknologian eri osa-alueiden kehitykseen toimien siten ilmataistelukoneen tapauksessa ennemminkin kehityksen taustavoimana kuin yksittäisinä tekijöinä.

Tutkimuskentässä olevat heikot signaalit tuovat erityisen lisän tulevaisuuden tutkimukseen. Heikkojen signaalien tutkiminen käsittää sellaisten asioiden tunnistamisen, joilla ei lähtökohteisesti katsota tällä hetkellä olevan suurta vaikutusta mutta jotka saattavat toimia merkittävänä laukaisevana tekijänä tulevaisuuden kehitykselle [11]. Heikkona signaalina voisi toimia esimerkiksi läpimurto sellaisessa materiaali- tai tiedonsiirtoteknologiassa, josta ei tällä hetkellä ole saatavilla sovellutuksia. Mahdollisen jatkokehityksen myötä teknologian käyttöönotto kuitenkin mahdollistaisi ilmataistelukoneen suorituskyvyn merkittävän kasvun. Ennen merkittäväksi ja kasvavaksi kehityssuuntaukseksi muuttumista myös miehittämätöntä teknologiaa olisi voinut luonnehtia heikoksi signaaliksi. Toisaalta heikkona signaalina voisi toimia tapah-

tumasarja, joka yleisen asenneilmaston tai poliittisten ideologioiden muuttumisen kautta muuttaa sodankäynnin luonnetta vaikuttaen siten taistelujärjestelmien kehittymiseen. Ian Miles'in ym. toimittaman teoksen *Handbook of Technologies* mukaan heikkojen signaalien löytäminen on yksi tulevaisuuden tutkimuksen haastavimpia tehtäviä, ja heikkojen signaalien analysointi johtaa usein nk. ”villien korttien” tunnistamiseen. Nämä puolestaan tarkoittavat yllättäviä ja odottamattomia tapahtumia, joiden tapahtumisen todennäköisyys on pieni mutta vaikutus hyvin suuri [11].

## 2.2 Tutkimusongelmat ja rajaus

Tutkimuksen pääongelma:

- Mitkä ovat ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä teknologisen kehityksen perusteella?

Tutkimuksen alaongelmat:

- Kuinka ilmataistelukoneen teknologiaosa-alueet tulevat kehittymään vuoteen 2035 mennessä?
- Mitkä uudet tai jatkokehitetyt teknologiset ratkaisut ovat integroitavissa ilmataistelukoneeseen vuonna 2035?
- Kuinka uusien tai jatkokehitettyjen teknologioiden käyttöönotto vaikuttaa ilmataistelukoneen kehityssuuntiin?

Tutkimuksessa kartoitetaan ilmataistelukoneen rakenteeseen, osajärjestelmiin ja käyttöperiaatteisiin vaikuttavaa teknologista kehitystä. Käsiteltävät teknologiat jaetaan tutkimuksessa seuraaviin osa-alueisiin: ilma-aluksen rakenne ja järjestelmien integroiminen, voimalaitetekniikka, aerodynamiikka, sensoriteknologiat, miehittämätön ilma-alusteknologia, häivetekniikka ja havaittavuus, tiedonsiirto ja verkostokeskeisyys sekä uudet teknologiat. Asejärjestelmien osalta tutkimuksen tarkastelulähtökohta on se, millaisten asejärjestelmien käyttöä tulevaisuuden ilmataistelukoneen tekniset ratkaisut tukevat. Varsinaiset aseet sekä niiden kehitys rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Edellä mainittujen osa-alueiden käsittelyn laajuus ja tarkkuus vaihtelevat huomattavasti sen mukaan, kuinka voimakasta tekninen kehitys eri osa-alueilla tutkittavalla aikavälillä on. Myös tietyn osa-alueen kehityksen merkitys kokonaisuuden kannalta vaikuttaa eri osa-alueiden välisiin painotuksiin.

Tutkimuksen painopisteenä on ilmataistelukoneen kehitys nykypäivästä vuoteen 2035 asti. Kyseinen aikaväli mahdollistaa ilmataistelukoneen kehityksen tarkastelun niin pitkälle tulevaisuuteen, että arvioidun teknologisen kehityksen perusteella on edellytyksiä puhua seuraavan, kuudennen sukupolven ilmataistelukoneesta. Toisaalta tarkasteluaikavälin takaraja on riittävän lähellä tulevaisuudessa, jotta tutkimuksessa esitettävien arvioiden luotettavuus ja käytettävyys eivät heikkene kohtuuttomasti. Yksittäisten teknologiaosa-alueiden osalta tarkastelua ei sidota tiukan aikaperusteisesti, vaan tutkimuksessa voidaan käsitellä myös vuoden 2035 jälkeen tapahtuvaa kehitystä. Myöskään yksittäisen teknologian tarkan käyttöönottoajankohdan arviointi ei ole keskeistä tässä tutkimuksessa. Tärkeämpää on kyetä arvioimaan, mitkä rakenteelliset ja järjestelmiin liittyvät ratkaisut ovat vuoteen 2035 mennessä saavuttaneet teknologisesti riittävän kypsyyssasteen, jotta ne voitaisiin integroida ilmataistelukoneen kaltaiseen monimutkaiseen järjestelmäkokonaisuuteen. Tästä seurauksena tutkimuksessa kuudennen sukupolven edustaja ei kuvaa yksittäistä konetyyppiä, joka olisi valmis käyttöönotettavaksi vuonna 2035.

Teknologisen kehityksen ohella arvioidut muutokset sodankäynnissä voivat vaikuttavaa merkittävästi siihen, mihin suuntaan järjestelmien kehitystä halutaan viedä. Eri aikajänteille muodostetut uhka-arviot luovat painopisteitä sille, mitä suorituskykyjä ja käyttöön liittyviä ominaisuuksia tietyltä järjestelmältä odotetaan tulevaisuudessa. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan pyritä arvioimaan ilmataistelukoneen kehitystä sodankuvan ja toimintaympäristön muutosten kautta, vaan arvio tulevaisuuden kehityssuunnista tehdään teknologiavetoisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että ilmataistelukoneen kehitysskenaarioissa kehitystä ohjaavat vaikuttimet koostuvat eri teknologiaosa-alueiden kehityksestä, teknologian kehitystrendien vaikutuksesta ilmataistelukoneen järjestelmien kehitykseen sekä mahdollisista ilma-alusteknologian saralla tapahtuneista tai tapahtuvista innovaatioista. Ilmataistelukoneen tulevaisuuden toimintaympäristöä käsitellään siinä määrin, kuin se on linkittyneenä havaittavissa olevaan teknologiseen kehitykseen (esim. verkostokeskeinen sodankäynti vs. ilmataistelukoneen tiedonsiirtojärjestelmien kehitys).

Termiä hävittäjä (fighter aircraft) on yleisesti käytetty kuvaamaan pääsääntöisesti ilmamaaleja vastaan toimivaa sotilaslentokonetta. Erona muihin taistelulentokoneisiin hävittäjä on tyypillisesti nopea, suhteellisen pienikokoinen ja hyvin liikehtimiskykyinen. Hävittäjien ensisijainen tehtävä on ollut ilmasta ilmaan tapahtuvan sodankäynnin kautta saavuttaa ilmaherruus toiminta-alueella. Hävittäjä-sanaa käytetään myös osana taisteluilma-alusten alaluokkia, kuten rynn-

näköhävittäjä-käsitteessä. Tällöin viitataan koneeseen, jolla on useita hävittäjän tyyppiominaisuuksista mutta jonka ensisijaisena tehtävänä on jokin muu kuin taistelu ilmamaaleja vastaan.

Yleistyvä käsite monitoimihävittäjä (engl. multirole combat aircraft / multirole fighter) viittaa hävittäjään, jolla on ilmasta ilmaan -taistelun lisäksi myös muita rooleja sodankäynnissä. Hävittäjien kasvava multirole-kyky hämärtää perinteistä hävittäjä-käsitettä ja edelleen vaikeuttaa tämän tarkkaa määrittelyä. Haastetta kuvaa se, että Yhdysvaltain seuraavan (6.) sukupolven ilmataistelukoneen kehityshankkeiden nimissä ei käytetä fighter-termiä lainkaan, joskin hankkeita kuvattaessa puhutaan edelleen hävittäjästä yleiskäsitteenä. Navyn hanke F/A-18E/F-mallien korvaamisesta on nimeltään ”Next Generation Air Dominance (NGAD)”, joka mahdollisesti sisältäisi sekä miehitetyn että miehittämättömän mallin kehittämisen [13]. US Air Forcen (USAF) vastaava hanke, ”Next Generation Tactical Aircraft (Next Gen TACAIR)”, on suunniteltu korvaamaan F-22 -hävittäjät 2030-luvulta eteenpäin. Hanke tähtää koneeseen, jolle on ilmasta ilmaan ja ilmasta maahan (engl. Air to Ground, A/G) -suorituskykyjen lisäksi suunniteltu muun muassa kykyä suorittaa elektronisia hyökkäyksiä sekä tiedustelun ja valvonnan tehtäviä (engl. Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, ISR) [22].

Tässä tutkimuksessa käytetään seuraavan sukupolven hävittäjästä käsitettä kuudennen sukupolven ilmataistelukone. Asiayhteydestä riippuen voidaan käyttää myös termejä seuraava sukupolvi, kuudes sukupolvi tai kuudennen sukupolven edustaja, joilla viitataan samaan käsitteeseen. Ilmataistelukone käsitteenä antaa vapauden tarkastella erilaisia kehityssuuntia ja suunnitteluratkaisuja yhden generisen termin alla. Siten se poistaa tarpeen käyttää päällekkäin useita eri määritelmiä, jotka riippuisivat siitä, millaisia suorituskykyjä ja rooleja seuraavan sukupolven ilmataistelukoneella olisi. Samalla ilmataistelukone kuvaa hävittäjän luonnetta yhä enemmän ilmasijoitteisena taistelujärjestelmänä kuin perinteisenä suihkumoottorilla varustettuna lentokoneena. Tässä tutkimuksessa ilmataistelukone rajataan kiinteäsiipiseksi multirole-kyvyn omaavaksi ilma-alukseksi, jonka yhtenä keskeisenä tehtävänä on ilmamaaleja vastaan tapahtuva toiminta.

### 2.3 Aiempi tutkimus ja lähdemateriaalin esittely

Tutkimuksen lähdemateriaali koostuu ilmataistelukoneisiin sekä ilmataistelukoneen eri teknologia-alueisiin liittyvistä tutkimuksista ja kirjallisuudesta. Lisäksi tutkimuksessa käytetään

lähdeaineistona laajasti erilaisia internet-lähteitä, joita ovat esimerkiksi ilmali- ja sotilasteknologiaa edustavien aikakauslehtien artikkelit sekä valtiohallinnon, eri organisaatioiden ja teknologiayritysten edustajien julkaisut. Lähdeaineisto pitää sisällään luotettavuudeltaan ja käytettävyydeltään hyvin eritasoisia lähteitä, mikä vaatii tutkimuksen kartoittavassa vaiheessa erityistä lähteiden luotettavuuden arviointia.

Tutkimusmenetelmien ja niiden hallinnan kannalta yhtenä keskeisenä lähdeoksena on Matti Kamppisen, Osmo Kuusen ja Sari Söderlundin toimittama *Tulevaisuudentutkimus*. Teos kuvaa kattavasti tulevaisuuden tutkimuksen perusteita ja sovelluksia sekä sisältää laaja-alaisesti eri tulevaisuuden tutkimusaloja käsitteleviä kirjoituksia. Tutkimuksen kannalta teoksen keskeisin merkitys liittyy skenaarioihin sekä skenaarioiden käyttämiseen tulevaisuuden tutkimuksessa. Lisäksi *Tulevaisuudentutkimus* esittelee myös useita metodeja niiden vaikuttamien tunnistamiseen, jotka ohjaavat kehitystä eri aloilla. Toinen tutkimuksen menetelmällisesti merkittävä lähdeosa on tulevaisuuden tutkimukseen keskittyvä *The handbook of technology foresight*, joka avaa tulevaisuuden tutkimisen kenttään liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia.

Sotateknisen arvion ja ennusteen (STAE) osat 1 ja 2 käsittelevät useiden kolmannessa luvussa tarkasteltavien teknologia-alueiden nykytilaa. Tulevan kehityksen osalta niissä on arvioitu näiden osa-alueiden kehitystä vuoteen 2020–2025 asti, joten teosten tarkasteluajaväli päättyy huomattavasti ennen tässä tutkimuksessa tarkasteltavan ajanjakson loppua. STAE:issa esitetyt arviot eri teknologioiden tulevaisuuden ratkaisuksista ja erityisesti kehityssuunnista antavat kuitenkin suuntaviivoja myös 2020-luvun jälkeiseen aikaan. Tutkimuksessa käytetään myös muita Maanpuolustuskorkeakoulun sotatekniikanlaitoksen julkaisusarjoihin sisältyviä teoksia, jotka antavat tukea tässä tutkimustyössä esiteltävien teknologioiden tarkasteluun ja niiden vaikutusten arviointiin.

Ilmastaistelukoneeseen liittyviä teknologian osa-alueita ja niiden kehitystä on tarkasteltu useissa tutkimuksissa. Maanpuolustuskorkeakoulussa on tehty 2000-luvulla esiuupseeri- ja yleisesikuntaupseerikurssien tutkimustöitä, jotka käsittelevät muun muassa ilmastaistelukoneen sensori- ja datafuusiota, miehittämätöntä ilma-alusteknologiaa, häiveteknologiaa sekä tilannekuvan muodostamista nykyaikaisissa ilmastaistelukoneissa. Lisäksi aihepiiristä on tehty monia maisteritason tutkielmia. Tutkimukset käsittelevät pääosin nykytilannetta sekä viidennen sukupolven hävittäjissä käytettäviä ratkaisuita, mutta osassa niistä on tutkittu myös teknologian tulevaa kehitystä. Aihepiiristä on saatavilla myös ulkomailta tehtyjä julkisia tutkimuksia, joita on julkaistu esimerkiksi Yhdysvaltain Air War Collegen verkkosivuilla.

Verkkolähteet käsittävät merkittävän osan tässä tutkimuksessa käytettävistä lähteistä. Muun muassa eri tutkimuslaitosten, virallisten organisaatioiden ja aseellisuuden yritysten sivustot sekä ase- ja ilma-alusteknologioihin keskittyneiden aikakauslehtien verkkosivut tarjoavat hyvän kanavan lähdemateriaalin hankinnalle. Näiden lisäksi internetistä löytyy aihepiiriin liittyen lukuisia tieteellisiä julkaisuja ja tutkimuksia, analyyssejä sekä korkeakoulujen opetusmateriaalia. Verkkolähteitä käytettäessä lähdekritiikin merkitys korostuu, koska kenellä tahansa on mahdollisuus julkaista omiin mielipiteisiin tai tahallisiin/tahattomiin vääriin johtopäätöksiin perustuvaa materiaalia ilman ulkopuolista arviointia. Hirsjärvi ym. nostaa teoksessaan *Tutki ja kirjoita* esiin kolme tekijää lähdemateriaalin arvioimiseksi. Näitä ovat kirjoittajan tunnettavuus ja arvovalta, lähteen ikä sekä lähteen uskottavuus. Lähteen uskottavuuteen liittyvät myös julkaisijan arvovalta ja vastuu [18].

Kirjoittajan heikkoon tunnettavuuteen ja lähteen uskottavuuteen liittyvää riskiä pyritään tutkimuksessa vähentämään käyttämällä rinnakkain useita eri lähteitä. Esimerkiksi saman informaation esiintyminen usean eri kirjoittajan tai julkaisijan artikkelissa lisää lähteen laatua. Lähteen tuoreus ei verkkolähteissä nouse keskeiseksi ongelmaksi, koska samasta aihepiiristä löytyy yleensä useita eri ajankohtina julkaistua materiaalia. Tosin tuoreessa julkaisussa esiintyvän vanhan tiedon muuttumattomuus on kyettävä varmistamaan. Lähteiden luottavuuteen liittyvien haasteiden vastapainoksi internet tarjoaa merkittäviä etuja muuhun lähdeaineistoon nähden. Teknologinen kehitys on nopeaa, mistä syystä julkaistu tieto saattaa joko vanheta nopeasti, tai sen rinnalle tulee tuoreempaa tietoa. Internet tarjoaa tällöin nopeamman kanavan uusimman tiedon äärelle verrattuna painettuun kirjallisuuteen.

## 2.4 Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät

Tutkimustyö toteutetaan kvalitatiivisena tutkimuksena. Tutkimuksen tarkoitusta voisi luonnehtia Hirsjärven ym. jaottelun mukaan kartoittavaksi ja ennustavaksi tutkimukseksi [18]. Siinä käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat skenaariomenetelmä ja kartoittava tutkimus sekä näitä tukeva kirjallisuusselvitys. Menetelmistä kartoittavalla tutkimuksella on keskeinen merkitys tiedonhankinnassa sekä tarkasteltavan teknologisen kehityksen havaitsemisessa. Tutkimustyön keskeinen päämäärä on muodostaa kuvaus siitä, millainen kokonaisuus kuudennen sukupolven ilmataistelukone on ja millaisiin erilaisiin vaihtoehtoihin ilmataistelukoneen kehityksessä voidaan päätyä. Skenaariomenetelmä mahdollistaa tutkimuksessa yhden tai useamman tulevaisuuspolun kuvaamisen, eli skenaarion muodostamisen. Muodostetuilla skenaar-

rioilla pyritään osoittamaan, kuinka ilmataistelukoneen kehitys päättyy loogisen tapahtumasarjan kautta nykytilanteesta arvioituun tulevaisuuden tilanteeseen.

Tutkimusmenetelmien käyttö jakautuu tutkimustyössä karkeasti pää- ja alalukujen mukaan. Tutkimuksen päätutkimuskysymyksenä on selvittää 6. sukupolven ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä. Jotta seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen kehityssuuntien määrittäminen olisi mahdollista, on kyettävä ensin vastaamaan tutkimuksen alaongelmiin. Tutkimuksen kartoittava osuus painottuu kolmanteen päälukuun, jossa tutkitaan eri teknologia-alueiden nykytilaa ja kehitystä. Tämä vastaa tutkimuksen ensimmäiseen alaongelmaan eli siihen, kuinka ilmataistelukoneen suorituskykyyn vaikuttavat teknologian osa-alueet tulevat kehittymään vuoteen 2035 mennessä. Kolmannessa luvussa tehtävällä kartoituksella on keskeinen merkitys siihen, kuinka kattavasti tutkimuksessa kyetään vastaamaan muihin alaongelmiin sekä pääongelmaan. Kartoitus mahdollistaa myös kehitysskenaarioiden muodostamisen luoden siten perusteet analyysin suorittamiselle.

Ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat määritellään skenaariomenetelmää käyttäen. Luke Georghiou ym. kuvaavat *The Handbook of Technology Foresight* -teoksessa skenaarioiden olevan systemaattisia ja johdonmukaisia visioita asioiden todennäköisestä tilasta tulevaisuudessa. Ne sisältävät tyypillisesti useita tutkittavan kohteen ominaisuuksia sen sijaan, että tarkasteltaisiin vain yhtä tai kahta parametria. Kehitystä eteenpäin vievien trendien ja ajureiden tunnistaminen on yksi keskeisistä skenaarioiden muodostamisessa käytettävistä keinoista [11]. Tässä tutkimuksessa keskeiset ilmataistelukoneen kehitykseen vaikuttavat trendit ja ajurit muodostuvat eri osa-alueilla tapahtuvasta teknologisesta kehityksestä.

*Tulevaisuuden tutkimus* määrittelee skenaariolle erilaisia ominaisuuksia. Skenaario on yhden tulevaisuuspolun kuvaus, jolla on alkutilanne ja lopputilanne. Näiden välillä on tärkeäksi tunnistettuja välitilanteita, jotka ovat tyypillisesti kohtia, joissa tulevaisuuspolku haarautuu. Kukin haara johtaa vaihtoehtoisiin skenaarioihin, jotka voivat kuitenkin päättyä samaan lopputilanteeseen. Hyvin muotoillulle skenaariolle on ominaista, että se sisältää johdonmukaisesti etenevän kertomuksen tulevaisuuden tapahtumista sisältäen muun muassa välivaiheesta toiseen siirtymistä perustelevat kausaaliset kuvaukset [24]. Tutkimuksen skenaarioiden alkutilanne on viides hävittäjä sukupolvi, joka kuvaa ilmataistelukoneen kehityksen nykyhetkeä. Skenaarioiden lopputilanteet edustavat puolestaan kuudennen sukupolven ilmataistelukoneen mahdollisia kokonaisratkaisuita. Tällöin lopputilanteiden sisältämät ominaisuudet ja teknologiset ratkaisut kuvaavat niitä kehityssuuntia, jotka vaikuttavat ilmataistelukoneen kehitykseen

vuoteen 2035 mennessä. Skenaarioiden välitilanteita ovat muun muassa teknologiset innovaatiot, merkittävät parannukset nykyisiin ilmataistelukoneen ratkaisuihin sekä sellaisten olemassa olevien teknologioiden hyödyntäminen, joita ei aikaisemmin ole sovellettu ilmataistelukoneessa.

Tunnistettuja välitilanteita ilmataistelukoneen kehitysskenaarioissa ei voida automaattisesti tulkita kohdiksi, jotka johtavat uuteen kehityspolkuun. Ilmataistelukoneen kehitys jakautuu useaan eri teknologiaosa-alueeseen, jotka eivät ole suoraan riippuvaisia toisistaan. Tällöin yksittäisellä osa-alueella tapahtuva kehitys ei välttämättä johda kokonaiskehityksen suunnan selvään muuttumiseen, eikä siten muuta lopputilannetta niin merkittävästi, että uuden skenaarion muodostaminen olisi tarkoituksenmukaista. Kuvatussa tilanteessa ilmataistelukoneen uusi tai jatkokehitetty ominaisuus sulautuu osaksi muodostunutta skenaariota ja täydentää saavutettua lopputilannetta. On myös mahdollista, että jollain osa-alueella havaitaan niin merkittävää teknologista kehitystä, että ilmataistelukoneen rakenne, suorituskyky tai käyttömahdollisuudet muuttuvat oleellisesti, mikäli kehitys kyetään hyödyntämään. Tällainen kehitys voisi olla esimerkiksi miehittämättömän ilma-alusteknologian käyttöönotto kuudennen sukupolven ilmataistelukoneessa. Tällöin välitilanteena toimiva kehitys johtaa tulevaisuuspolun haarautumiseen ja uuteen skenaarioon.

Neljäs luku käsittelee ilmataistelukoneen kehityksen ensimmäisestä sukupolvesta kuudenteen sukupolveen. Luvun pääpaino on selkeästi ilmataistelukoneen tulevassa kehityksessä, ja ilmataistelukoneen kehityshistoria tähän päivään saakka käsitellään vain lyhyesti. 1.–4. sukupolven hävittäjien tarkastelu ei ole tutkimuksen kannalta itsessään tärkeää. Kyseisten sukupolvien lyhyt käsittely on kuitenkin perusteltua siksi, että sen avulla kyetään kuvaamaan ilmataistelukoneen kehityksen epälineaarinen luonne, johdattamaan lukija ilmataistelukoneen nykytilanteeseen sekä selventämään niitä tekijöitä, joihin sukupolvien jaottelu perustuu. Viidennen hävittäjä sukupolven käsittely puolestaan perustuu siihen, että kyseisen sukupolven edustajat sisältävät ne kehittyneimmät ratkaisut eri teknologiaosa-alueilta, jotka on tällä hetkellä mahdollista ja tarkoituksenmukaista integroida ilmataistelukoneeseen. Vaikka tutkimuksessa ei suoriteta erillistä vertailua 5. ja 6. sukupolven ilmataistelukoneiden välillä, on tulevan kehityksen arvioinnin kannalta keskeistä tarkastella myös ilmataistelukoneen nykytilaa.

Alaluvussa 4.2 tehdään arvio siitä, mitkä kolmannessa luvussa kartoitetuista uusista tai jatkokehitettyistä teknologisista ratkaisuista ovat integroitavissa ilmataistelukoneeseen vuonna 2035. Tämä vastaa tutkimuksen toiseen alatutkimuskysymykseen ja esittelee ne välitilanteet,



jotka vaikuttavat ilmataistelukoneen kehitysskenaarioiden muodostamiseen. Lisäksi alaluvussa 4.2 arvioidaan kyseisten teknologioiden käyttöönoton vaikutuksia ilmataistelukoneen kehityssuuntiin. Tämä vastaa tutkimuksen kolmanteen alatutkimuskysymykseen sekä mahdollistaa ilmataistelukoneen kehitysskenaarioiden muodostamisen. Alaluku 4.3 vastaa tutkimuksen päätutkimuskysymykseen. Siinä esitellään muodostettujen skenaarioiden lopputilanteet, jotka määrittävät ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä.

### 3 ILMATAISTELUKONEEN TEKNOLOGIAOSA-ALUEIDEN KEHITYSNÄKYMÄT

#### 3.1 Ilma-aluksen rakenne ja järjestelmien integroiminen

Ilma-aluksen rakennesuunnittelu luo pohjan kokonaisratkaisun toteutukselle. Lavetin muoto-suunnittelu vaikuttaa suoraan ilma-aluksen aerodynaamiseen käyttäytymiseen sekä siihen, kuinka osajärjestelmät kytetään liittämään osaksi kokonaisratkaisua. Ilma-aluksen runko toimiikin liityntäpintana kaikille ilma-aluksen järjestelmille. Muotoilun lisäksi käytettävät materiaalit ovat keskeisessä osassa rakenteen suunnittelua. Ilma-aluksessa käytettäviltä materiaaleilta vaaditaan muun muassa hyviä lujuusominaisuuksia, keveyttä sekä suuren lämpötilanvaihtelun sietoa. Lisäksi materiaalin ei saisi nostaa ilma-aluksen tuotantohintaa kohtuuttomasti. Ilma-aluksen rakenteen ja siinä käytettävien materiaalien keskeisinä tehtävinä on perinteisesti ollut ylläpitää ilma-aluksen muoto, ottaa vastaan kiihtyvyyksistä aiheutuvia voimia sekä mahdollistaa muiden järjestelmien kiinnittyminen ilma-aluksen runkoon. Kuitenkin esimerkiksi monitoimirakenteiden (engl. multifunctional structures), aktiivisen virtaushallinnan, simulointitekniikoiden, edullisten komposiittimateriaalien sekä suurta lämpökuormaa kestävien materiaalien kehittyminen avaavat uusia mahdollisuuksia rakenteen käytettävyydelle myös muihin tehtäviin.

Ilmataistelukoneen kokonaispainon muodostuminen voidaan jakaa kolmeen osaan: rakenne, polttoaine sekä hyötykuorma. Rakenteen paino on hyvin kriittinen ilmataistelukoneen suorituskyvylle, koska se vaikuttaa suoraan käytettävissä olevaan polttoaineen ja hyötykuorman yhteismäärään tietyllä maksimipainolla. Lisäksi rakenteen keventäminen parantaa koneen teho/paino-suhdetta kasvattaen siten tehoylijäämää. Tästä syystä rakenteen kokonaispainon laskeminen on ollut keskeinen materiaalien kehittämisen lähtökohta. STAE1:n mukaan rakenteen osuus sotilaskoneiden suurimmasta lentoonlähömässasta on laskenut vuodesta 1980 n. 35 %:sta 29 %:iin, mikä on mahdollistanut koneiden hyötykuorman, tai vaihtoehtoisesti kantaman ja toiminta-ajan merkittävän kasvun [45, s. 313]. Materiaalien kehittyminen ja erityisesti niiden hinnan aleneminen tulevat myös jatkossa alentamaan rakenteen osuutta ilma-alusten kokonaismassasta. Tämän ohella järjestelmien integroiminen rakenteeseen tulee myös osaltaan kasvattamaan hyötykuorman ja polttoaineen kapasiteettia.

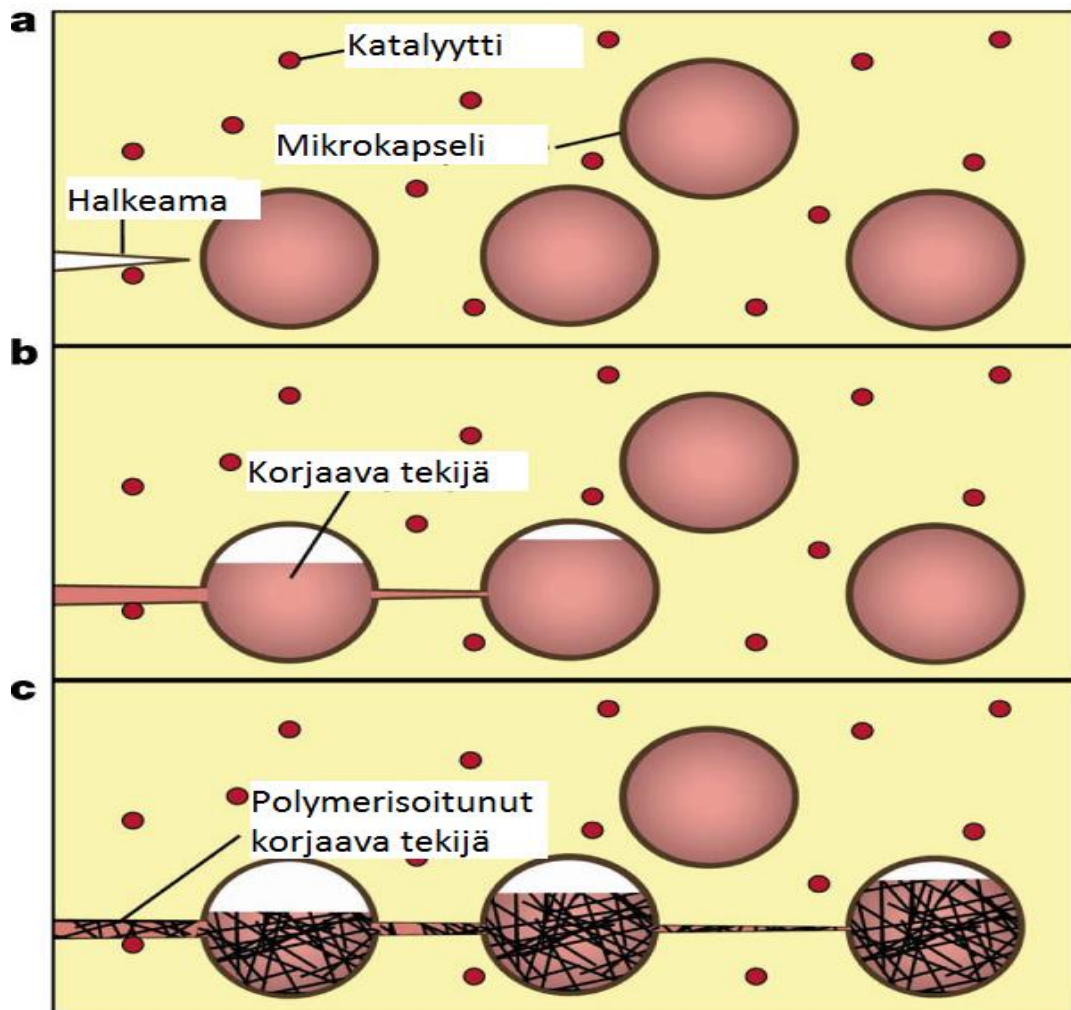
Yhdysvaltain Air Force Research Laboratoryn (AFRL) tilaama usean yliopiston yhteistutkimus *Survivability of affordable aircraft composite structures* käsittelee rakenteen ja käytettävien materiaalien kehitystyötä sekä näiden vaikutusta ilma-alusten suorituskykyyn ja kustannuksiin. Tutkimuksen kirjoittajien, tri. Mahesh V. Hoser ym., mukaan selviytymiskykyiset rakenteet ja edullisuus tulevat olemaan ilma-alusten kehityksen kriittisiä osa-alueita. Kehitys tulee mahdollistamaan ilma- ja avaruusaluksissa korkeamman suorituskyvyn, pidemmän käyttöiän sekä paremman kustannustehokkuuden. Arvioitu kehitys on hyvin linjassa useiden FATE-ohjelman määrittämien teknologioiden kanssa. FATE (Future Aircraft Technology Enhancement) on Yhdysvaltain puolustusministeriön alainen kehitysohjelma. Sen päämääränä on arvioida ja kehittää uusia teknologioita, jotka tulevat olemaan pohjana seuraavan sukupolven sotilasilma-aluksille. Näitä teknologioita ovat muun muassa kestävät ja vaurioita sietävät komposiittirakenteet sekä erittäin lujat komposiittiset kerrosrakenteet. Esimerkkinä rakennemateriaalien kehityksestä ovat edellä mainitussa tutkimuksessa tarkastellut kudotut hiili/epoksi -komposiittirakenteet, joiden kokemat vauriot ballistisissa testeissä olivat huomattavasti pienemmät kuin tällä hetkellä käytössä olevilla ilma-alusten rakennemateriaaleilla [19].

Joseph M. Manter ja Donald B. Paul ovat niin ikään AFRL:n tilaamana tehneet selvityksen *Airframe structures technology for future systems*, joka käsittelee tulevaisuuden järjestelmissä käytettäviä ilma-aluksen rakenneteknologioita. Selvityksen mukaan keskeisiä kehityskohteita ovat muun muassa monitoimirakenteet, edullisempien komposiittimateriaalien käyttöönotto sekä ääriolosuhteita, kuten erittäin korkeita lämpötiloja, kestävät rakenteet. Lisäksi elinkaarikustannukset tulevat olemaan entistä keskeisempi suunnitteluun vaikuttava tekijä. Monitoimirakenteiden käyttöönottoon liittyy useita potentiaalisia etuja liittyen kustannustehokkuuteen, huollettavuuteen, luotettavuuteen, korjattavuuteen, aerodynaamiseen tehokkuuteen sekä lämpöhyötysuhteeseen. Kantaviin rakenteisiin sijoitetut antennit vähentävät kiinnityskohtien tarvetta, mikä vähentää painoa ja valmistuskustannuksia. Suurempi antennien käytössä oleva alue voi puolestaan parantaa nykyisiä tai vaihtoehtoisesti mahdollistaa uusia ominaisuuksia. Lisäksi ulokkeiden poistaminen pienentää tutkapoikkipinta-alaa ja vastusta sekä vähentää antennien vaurioherkkyyttä [33]. Myös ohjausjärjestelmän käyttölaitteiden, sensorien ja voimalaiteratkaisun parempi sulauttaminen rakenteen kanssa mahdollistaisi kokonaispainon vähentämisen sekä kestävämmän ratkaisun toteuttamisen.

STAE:n mukaan rakenteiden selkeänä kehityskohteena ovat sensoreita ja aktuaattoreita sisältävät rakenteet (ns. älykkäät rakenteet). Älykkäiden rakenteiden kehittämisen tavoitteita ovat vaurioiden havainnointi (SMH, Structural Health Monitoring) ja kontrollointi, värähtelyjen

vaimennus ja rakenteen uudelleen konfiguroitava muoto. Älykkäät rakenteet luokitellaan STAE:ssa kahteen lajiin, joista ensimmäinen on rakenteen kunnan ja käytön monitorointijärjestelmät (HUMS, Health and Usage Monitoring Systems) ja toinen reaktiiviset rakenteet (engl. Reactive Skins and Structures). HUMS-järjestelmissä optisten kuitujen käyttö tulee olemaan merkittävässä asemassa, kun taas reaktiiviset rakenteet perustuvat usein pietsoelektristen tai pietso-keramisten materiaalien käyttöön. Toistaiseksi materiaalien kestävyys ei ole riittävä, eikä niillä ole kykyä tuottaa suuria voimia [45, s. 318].

Itsestään korjautuvat rakenteet ovat mielenkiintoinen kehitysalue materiaaliteknologian alalla. Itsekorjautuvat materiaalit lukeutuvat älykkäisiin materiaaleihin, ja niillä on sisään rakennettu kyky korjata rakenteeseen syntyneitä vaurioita. Yhtenä menetelmänä on autonominen, materiaalin sisällettyihin katalyytteihin ja korjaavaan tekijään perustuva materiaali, jonka toimintaperiaate on esitetty kuvassa 1. a) Vaurio aiheuttaa halkeaman rakenteeseen. b) Kun halkeama saavuttaa mikrokapselin, se vapauttaa korjaavan tekijän halkeamaan kapillaari-ilmion kautta. c) Kun korjaava tekijä pääsee kosketukseen katalyytin kanssa, se polymerisoituu ja liittää halkeaman puolet toisiinsa [3]. Itsekorjautuvien rakenteiden käytännön sovellusten määrä on vielä vähäinen, mutta Bristolin yliopiston professori Duncan Wass arvioi itsestään korjautuvan lentokoneen siipirakenteen olevan mahdollista valmistaa seuraavan 5–10 vuoden päästä [25]. Itsestään korjautuvia, kerrosrakenteisiin perustuvia rakenneratkaisuja on toteutettu myös viime vuosikymmenellä käyttöön otetuissa ilmataistelukoneissa parantamaan kriittisten järjestelmien taistelukestävyyttä. Kehitetyt materiaalit, joissa kyky korjata itseään on sisällytetty materiaalin mikrorakenteeseen, mahdollistavat vaikuttamisen vaurioihin, jotka syntyvät rakenteen sisälle. Tämä puolestaan parantaa niiden käytettävyyttä myös kantavissa rakenteissa.



Kuva 1. Itsekorjautuvan materiaalin toimintaperiaate [25]

Kokonaisuudessaan älykkäiden monitoimirakenteiden kehitystyö on vielä alkuvaiheessa. Kuitenkin esimerkiksi avioniikan integroiminen rakenteisiin, rakenteisiin sisältyvä oman kunnan seurantajärjestelmä sekä adaptiivisten materiaalien sovellukset ovat tällä hetkellä jo pitkälle kehitettyä teknologiaa [33]. Siinä missä kahta ensiksi mainittua teknologiaa on jo sovellettu rakennetuissa järjestelmissä, on adaptiivisten ja älykkäiden materiaalien sovellusten kehitysaikataulun arvioiminen haastavaa. STAE:ssä esitetyn arvion mukaan älykkäiden, esimerkiksi magneettikentän vaikutuksesta muotoaan muuttavien, materiaalien kehitys tulee mahdollistamaan aerodynaamisen ohjauksen ilman erillisiä liikkuvia ohjainpintoja 2020-luvulla [45, s. 310]. Arvion perusteella ei voi kuitenkaan tehdä johtopäätöksiä siitä, mahdollistaisiko kyseinen ratkaisu luotettavasti ilmataistelukoneen vaatiman liikehtimiskyvyn ja olisiko ratkaisun toteuttaminen kustannustehokasta vielä 2030-luvulla.

## 3.2 Aerodynamiikka

Hävittäjän lähes sadan vuoden kehityskaaren aikana aerodynaamisen suorituskyvyn kehittäminen on ollut yksi kehityksen painopisteistä. Lukemattomien prototyyppien, kehittämissankkeiden ja konetyyppien seurauksena perinteiset aerodynaamiset ratkaisut, kuten siipien muodon optimointi suunnitellulle käyttöalueelle, ovat tulleet pisteeseen, jossa niiden jatkokehittäminen on erittäin haastavaa. Perinteisten ratkaisuiden rinnalle on tullut myös uusia hävittäjän aerodynaamiseen suorituskykyyn vaikuttavia muotoratkaisuja tuoden samalla myös uusia haasteita ratkaistavaksi. Näitä ovat muun muassa pyrstöttömät konfiguraatiot, suunnattavan työntövoiman käyttö primääriseen ohjaukseen sekä häiveominaisuuksien ja multirolekyvyn tuomat vaatimukset. Mielenkiintoisen lisän aerodynaamiseen suunnitteluun tuovat myös älykkäät materiaalit, joiden käytön uskotaan tulevina vuosikymmeninä lisääntyvän myös ilma-alusten suurissa rakenneratkaisuissa.

Lentokoneen muotosuunnittelulle voidaan johtaa reunaehdot seuraavista perusvaatimuksista: Mitä sen täytyy pystyä kuljettamaan, mikä on sen haluttu toimintasäde ja käytettävä nopeusalue, mitkä ovat lasku- ja nousupaikan sille asettamat vaatimukset ja millainen liikehtimiskyky sen täytyy saavuttaa? Näiden lisäksi ratkaisun täytyy olla luotettava ja turvallinen, mikä tarkoittaa muun muassa ohjattavuuden säilymistä koko suunnitellulla lentoalueella kaikissa lentotiloissa. Ohjattavuuden säilyttämiseksi riittävän ohjausvoiman tuottaminen on elintärkeää. Ohjausvoiman tuottamisessa korostuu nokka ylös -momentin tuottaminen vakaaissa, nokka alas -momentti epävakaaissa lentokoneissa sekä nokan sivuttaismomentti (yaw) erityisesti lentävien siipien (flying wing) ja korkean kohtauskulman ilmataistelukoneissa [34].

Tietokoneiden laskentatehon kasvaminen on mahdollistanut laskennallisen virtausmekaniikan (Computational Fluid Dynamics, CFD) yhä laajemman käyttämisen aerodynamiikan tutkimuksessa ja kehittämisessä. Tällä hetkellä laskennallinen aerodynamiikka onkin avainroolissa aerodynaamisessa suunnittelussa. *Sotateknisen arvion ja ennusteen* mukaan aerodynamiikan tutkimusta ja kehitystä ovat vieneet eteenpäin laskennallisen virtausmekaniikan lisäksi siihen liittyvä turbulenssimallien kehittyminen yhdessä tietokoneiden laskentakapasiteetin kasvamisen kanssa. Hyvin monimutkaisiakin konfiguraatioita pystytään laskemaan tarkoilla menetelmillä, mikäli laajaa virtauksen irtoamista ei tapahdu, eikä virtaus ole ajasta riippuvaa. Yhdysvalloissa laskettiin jo vuonna 1998 kokonaista F/A-18E-konfiguraatiota, jonka laskentahilassa oli 11 miljoonaa laskentatilavuutta. Suomessa puolestaan on kehitetty F-18C:n virtauslaskentaa varten virtaussimulointihila, jossa on yli 15 miljoonaa laskentatilavuutta [45, s. 309].

Ilma-aluksen aerodynamiikassa ja muotosuunnittelussa on otettava huomioon käytännössä kaikki koneen muut järjestelmät. Vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa koko, käytettävä sisäinen ja ulkoinen kuorma, voimalaitteen ja ilmanoton vaatimukset, järjestelmien integroiminen sekä häiveominaisuudet. Seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen kehitystyössä yksi potentiaalinen ratkaisu olisi kuvan 2 mukainen pyrstötön toteutus, ns. flying wing, jolloin koneessa ei ole erillisiä sivu- ja korkeusvakaajia. Tällöin ohjaus toteutetaan jättöreunaan sijoitetuilla ohjainpinnoilla tai dynaamisesti siiven profilia muuttamalla, sekä käyttämällä ohjaukseen moottorin suihkuvirran suuntausta. Toteutus parantaa koneen häiveteknisiä ominaisuuksia erityisesti tutka-aallonpituusalueella sekä parantaa sen suorituskykyä pienentyneen painon ja vastuksen muodossa.



Kuva 2. Näkemys 6. sukupolven ilmataistelukoneen pyrstöttömästä konfiguraatiosta [14]

Tutkimuksen rajauksen mukaisesti käsiteltävän ilmataistelukoneen yhtenä päättehtävänä tulee olla ilmasta ilmaan tapahtuva sodankäynti. Seuraavan sukupolven ilmataistelukoneella tulisi tällöin säilyä kyky käydä ilmataistelua myös matalalla toimivia ilma-aluksia vastaan. Tästä

lähtökohdasta hypersonisen nopeusalueen mahdollistama rakenne ei vaikuta todennäköiseltä kehityskohteelta myöskään tulevaisuudessa, koska rakenne vaatisi huomattavia kompromisseja koneen liikehtimiskykyyn ja voimalaitteeseen. Lisäksi yli kaksinkertaisesta äänennopeudesta saatava taktinen hyöty ilmataistelussa on hyvin rajallinen. Sitä vastoin mahdollisuus lentää yliaäninopeudella ilman jälkipoltinta, eli supercruise-kyky, tulee myös jatkossa säilymään ilmataistelukoneen ominaisuutena.

### 3.3 Voimalaitetekniikka

Kuten kaikissa taistelujärjestelmissä, voimantuotto on yksi ilmataistelukoneen suorituskyvyn keskeisistä osa-alueista. Ilma-aluksen moottori tuottaa lavetin liikkeeseen tarvittavan työntövoiman lisäksi käyttövoiman muun muassa ilma-aluksen vuodatus-, hydraul- ja sähköjärjestelmälle. Voimalaitteella on paljon liitännöitä muihin järjestelmiin. Näistä keskeisinä mainittakoon liitännät polttoainejärjestelmään, ohjausjärjestelmään sekä moottorin käynnistysjärjestelmään. Näiden liitännöiden lisäksi ilma-aluksen voimalaitteen integroimisessa on otettava huomioon voimalaitteen massa, painopiste ja tilavuus sekä lukuisia asennukseen ja huoltoon liittyviä vaatimuksia [35]. Tämän hetken ilmataistelukoneissa käytetään propulsiovoimanlähteenä suihkumoottoreita, jotka lukeutuvat toimintaperiaatteeltaan kaasuturbiineihin. Nykyiset ilmataistelukoneen suihkumoottorit ovat ohivirtausmoottoreita, jotka ovat käytännössä kompromisseja suoran suihkumoottorin (engl. turbojet) ja suuren ohivirtaussuhteen omaavien suihkumoottorien (engl. turbofan) ominaisuuksista.

Ilma-aluksen voimalaiteratkaisuun vaikuttavat keskeisesti ilma-aluksen suunniteltu korkeus- ja nopeusalue sekä ilma-alukselle suunniteltujen käyttöperiaatteiden aiheuttamat vaatimukset. Kaupallisessa käytössä olevan matkustajalentokoneen suihkumoottorien rakenne ja toiminta voidaan optimoida melko tarkasti alisoniselle, suhteellisen pienelle nopeusalueelle. Tämä mahdollistaa moottorien valmistamisen hyvin taloudellisiksi muun muassa suuren ohivirtaussuhteen kautta, ja vaatimukset moottorin ilmanotolle ovat suhteellisen helposti ratkaistavissa. Nykyisten hävittäjäluokan ilma-alusten nopeusalue puolestaan ulottuu jopa yli kaksinkertaiseen äänennopeuteen ja korkeusalue yli 15 kilometriin. Lisäksi suunnittelulähtökohtana ovat erilaisten lentotilojen monimuotoisuus sekä lentotilan nopeat muutokset. Korkeaa tehontuottoa edellyttävien ominaisuuksien rinnalla ilmataistelukoneelta vaadittavia ominaisuuksia ovat tehtävien edellyttämät riittävän pitkä toiminta-aika ja toimintasäde. Ilmataistelukoneen voimalaitteen suunnittelussa onkin väistämättä tehtävä kompromisseja edellä mainittujen ominaisuuksien välillä, mikä tekee moottorin toiminnan optimoinnista erittäin haastavaa.



Moottoritekniologia on kehittynyt huomattavasti uusien materiaali- ja tuotantotekniikoiden myötä. Tämä on johtanut pienempien, kevyempien ja tehokkaampien moottorien valmistamiseen. Työntövoiman kasvun ohella myös moottorien saatavuus ja luotettavuus ovat kasvaneet huomattavasti [35]. Ilmataistelukoneen näkökulmasta moottorin luotettavuus on yksi keskeisistä tekijöistä erityisesti silloin, kun suunnitellaan yksimoottorista kokonaisratkaisua. Ilmataistelukoneen käyttöprofiilista johtuen moottoria käytetään suhteellisen suuren osan ajasta maksimiteholla, ja lisäksi tehoasetuksen muutostiheys on suuri. Tällöin vaatimukset moottorin rakenteelle ja käytetyille materiaaleille ovat korkeita. Vaatimuksia lisää moottorin koon sekä painon pienentäminen samalla, kun moottorista saatavaa tehoa pyritään nostamaan.

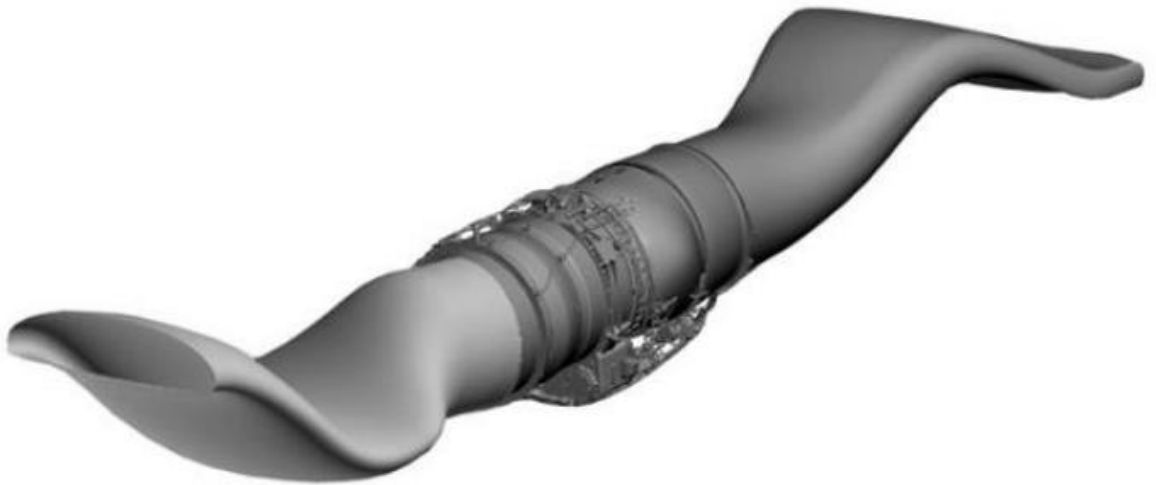
Ilmataistelukoneen voimalaitetekniikan kehittymistä tarkasteltaessa suihkumoottorin lisäksi muun muassa ramjet, scramjet ja PDE-moottoritekniologioiden kehitys on merkittävää. Ramjet (suom. patoputkimoottori) ja scramjet (suom. yliaänipatoputkimoottori) ovat reaktiomootoreita, jotka eivät yksinkertaisimmillaan vaadi lainkaan liikkuvia osia. Ahtimen sijaan ilmanotosta sisään virtaava ilma puristuu eteenpäin suuntautuvan liikkeen (dynaaminen paine) ja putken muotoilun vaikutuksesta. Rakenteen yksinkertaisuuden lisäksi kyseisten moottoritekniologioiden etuna on laaja nopeusalue, joka ulottuu hypersooniselle alueelle. Patoputkimoottoritekniologiaa ei kuitenkaan ole sovellettu hävittäjäluokan ilma-aluksissa, eikä nähtävissä ole myöskään lähitulevaisuuden sovelluksia. Syinä tähän ovat muun muassa moottoreiden toimimattomuus hyvin pienillä nopeuksilla sekä hypersoonisen nopeusalueen ja yläilma-kehän käyttämisestä saatavat rajalliset hyödyt ilmataistelussa.

Pulse Detonation Engine (PDE) on voimalaite, joka mahdollistaa jaksottaisen syttymisen, palotapahtuman etenemisen ja räjähdysaaltojen välittymisen räjähdysputkessa. Niihin liittyvien laajennus- ja tiivistysaaltojen heijastumien kanssa voimalaite kykenee toimimaan jaksottaisena ja tuottamaan työntövoimaa. PDE-tekniikka mahdollistaa korkean ominaistyöntövoiman moottorissa, joka vaatii joko hyvin vähän tai ei lainkaan liikkuvia osia [15]. PDE-voimalaitteet toisivat korkean ominaistyöntövoiman ja yksinkertaisen rakenteensa vuoksi selviä etuja ilmataistelukoneen voimalaiteratkaisuun. Ilmataistelukoneen käyttöalue on kuitenkin korkeuden, nopeuden ja lentotilan suhteen hyvin monimuotoinen, eikä PDE-voimalaitteita ole testattu näin dynaamisissa olosuhteissa. Muutoinkaan ei ole viitteitä siitä, että kyseistä tekniologiaa olisi suunniteltu käytettävän ilmataistelukoneessa lähitulevaisuudessa.

Käynnissä olevien kehitysprojektien perusteella on nähtävissä, että suihkumoottorit tulevat säilymään merkittävässä roolissa myös seuraavan sukupolven ilmataistelukoneissa [2; 32]. Kehityskohteina nykyisiin suihkumoottoreihin verrattuna on polttoainetaloudellisuus, työntövoiman lisääminen sekä moottorin kyky muuntautua lentotilan mukaan. Näiden seurannaisvaikutuksena haetaan muun muassa merkittävää toiminta-ajan ja -matkan kasvua. Merkittävänä kehitysasteena ilmataistelukoneen suihkumoottoreissa tulee olemaan kehitteillä oleva Variable Cycle Engine (VCE) -tekniikka. Nykyisistä kiinteistä voimalaiteratkaisuista poiketen sen myötä on mahdollista saavuttaa sekä korkea suorituskyky että hyvä polttoainetaloudellisuus [2].

US Air Forcen käynnistämä kehityshanke *Adaptive Versatile Engine Technology (ADVENT)* pyrkii kehittämään seuraavan sukupolven ilmataistelukoneeseen muuttuvavaiheista moottoria. Muuttuvavaiheisen moottorin toiminta perustuu sen kykyyn muuttaa ohivirtaussuhdetta. Tämä mahdollistaa suuren ohivirtaussuhteen sekä polttoainetaloudellisen moottorin käytön pienillä tehoasetuksilla ja vastaavasti suoravirtaustyyppisen, pienen ohivirtauksen suuren työntövoimatarpeen aikana. Uuden teknologian myötä tarve kompromisseille moottorin optimoinnissa vähenee, kun moottorin rakenne kykenee mukautumaan vallitsevaan työntövoiman tarpeeseen.

Rakenteellisesti muuttuvavaiheinen moottori on toteutettu lisäämällä ahtimen jälkeisen matalapaineisen ohivirtauskanavan ja korkeapaineisen polttokammioiden jälkeisen virtauskanavan lisäksi kolmas virtauskanava. Kun portti kolmanteen virtauskanavaan on auki, ohjautuu osa korkeapaineahtimelle ja polttokammioihin menevästä ilmasta kolmanteen, ”lisäohivirtauskanavaan”. Portin ollessa suljettu, suurempi osa kokonaisilmavirrasta ohjautuu moottorin korkeapaineosioon mahdollisten työntövoiman lisääntymisen. Moottorin muuntautumiskyvyn tuovat hyödyt ovat merkittävät. ADVENT-projektissa työntövoiman on mitattu kasvavan 5 % perusmoottorilla ja 10 % maksimitehoasetuksella samalla, kun kokonaispolttoaineenkulutus on pienentynyt 25 % [53]. Lukuarvojen vertailukohtana on käytetty F-35-hävittäjässä käytössä olevaa F135-moottoria, joka on mittasuhteiltaan vastaava testimoottoriin nähden. Kehitysprojektin tarkoituksena onkin seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen voimalaiteratkaisun lisäksi kehittää korvaavaa voimalaitetta F-35-hävittäjälle. Varsinaiseen voimalaitteen kehityksen lisäksi muun muassa ilmanottoon on myös suunniteltu uusia toteutustapoja. Kuvassa 3 esitellään kokonaisuutta, jossa P&W PW9000 -suihkumoottori on integroitu pitkiin ja kaareviin ilmanotto- ja pakokanaviin. Kanavien muotoilu mahdollistaa paremman yhteensopivuuden koneen rungon kanssa sekä paremmat häivetekniset ominaisuudet.



Kuva 3. Havaintokuva kuudennen sukupolven moottorin asennuksesta [40]

### 3.4 Sensoriteknologiat

Sähkömagneettisen spektrin hyödyntäminen on keskeinen osa ilmataistelukoneen suorituskykyä. Asejärjestelmän käyttäminen, tilannekuvan ylläpito, suojautuminen sekä muut ympäristön havainnointia vaativat tehtävät edellyttävät eri aallonpituusalueella toimivien sensorien käyttöä. Ilmataistelukoneen tyypillisiä sensoreita ovat tutkat ja tutkavaroitimet sekä erilaiset näkyvän valon ja infrapuna-alueen sensorit. Ilmataistelukoneen pääsensori on edelleen tutka, eikä sen asema ole uhattuna myöskään lähitulevaisuudessa. Tutkan mittauksen tarkkuus ja -etäisyys ovat hyviä, eikä se ole herkkä sääolosuhteille verrattuna infrapuna- ja näkyvänvalon aallonpituusalueilla toimiviin sensoreihin. Tämä mahdollistaa joka sään toimintakyvyn sekä tutkan käyttöön perustuvien asejärjestelmien laukaisemisen koko aseiden kantaman alueelle. Merkittävimmät haasteet tutkalle muodostavat häivetekniikan ja häirinnän kehittyminen.

Tutkien kehitys tulee muun muassa kasvattamaan havaintoetäisyyksiä ja erottelukykyä, parantamaan tutkien häirinnänsietoa sekä pienentämään havaittavuutta, kun pulssitehoa voidaan laskea paremman signaaliprosessoinnin seurauksena. Yksittäisten sensorien, kuten tutkan kehittäminen ei kuitenkaan pysty yksinään ratkaisemaan häiveteknologian kehittymiseen sekä kohteiden havaitsemiseen liittyviä haasteita. Yksittäisiin sensoreihin kohdistuvien vaatimusten ohella sensorijärjestelmien kehitys tulee painottumaan sensori- ja datafuusion, kehittyneisiin laskenta-algoritmeihin sekä passiivisten sensorijärjestelmien kehittämiseen. Lisäksi ilmataistelukoneen sensorijärjestelmien kehityskohteita ovat matalataajuustutkat sekä mahdollisena uutena teknologiana kvanttitutkat.

Tällä hetkellä hävittäjien uusinta tutkatekniikkaa edustavat aktiivielementtejä käyttävät, elektronisesti keilaavat tutkat. Elektronisesti keilaavaa antenni ei sisällä liikkuvia osia, ja keila suunnataan sähköisesti. Se voidaan tosin yhdistää myös mekaanisesti kääntyvään rakenteeseen, jolloin pääkeilan maksimaalista sivukulmaa voidaan kasvattaa. Elektroninen keilaus tuo huomattavaa etua erityisesti monimaalitalanteissa, joissa mekaanisesti keilaavan antennin hitaus rajoittaa keilan nopeaa suuntaamista suurella kulmaerolla oleviin kohteisiin. Keilan sähköinen suuntaus puolestaan mahdollistaa keilan kohdistamisen koko etsintäalueella käytännössä viiveettömästi eri kohteisiin, mikä nostaa kohteisiin lähetetyn kokonaisenergian suhdetta lähetettyyn kokonaistehoon. Yhdistettynä kehittyneeseen keilanhallintaan ja muunneltavaan aaltomuotoon elektronisella keilauksella voidaan myös muodostaa kuvaa ilmasta ja maan-/merenpinnasta samanaikaisesti.

STAE 2:ssa on esitelty aktiivielementtejä käyttävän, elektronisesti keilaavan tutkan etuja verrattuna aiempiin mekaanisesti keilaaviin tutkiin. Toteutus mahdollistaa keilausnopeuden moninkertaistumisen sekä havaintoetäisyyksien merkittävän kasvamisen. AESA-tutkan luotettavuus ja vikasetokyky ovat myös hyvin korkeita, sillä jopa 10 prosenttia elementeistä voi olla vikaantuneita, ennen kuin tutkan toiminta heikkenee oleellisesti. Lisäksi elektronisesti keilaavan tutkan ominaisuuksia ovat tutkapoikkipinta-alan hallinta, keilan muodon hallinnan kautta saatavat parantuneet häirinnänsieto-ominaisuudet sekä lähetystehon muuntelumahdollisuus. Haittapuolena AESA-tutkilla on muun muassa korkea hinta, heikohko hyötysuhde sekä suuri jäähdetyksen tarve. Lisäksi niiden toiminta vaatii runsaasti laskentakapasiteettia [46]. Mainituista haitoista huolimatta AESA-tutkilla saavutettava suorituskyky mekaanisesti keilaaviin tutkiin nähden on niin merkittävä, että elektronisesti keilaavia tutkia pyritään myös jälkiasentamaan vanhempiin hävittäjämalleihin. Lisäksi uuteen tutkatekniikkaan liittyvät haasteet tulevat vähenemään laskentatehon kasvamisen, COTS-tuotteiden lisääntyvän käytön sekä käytettävän rakenteen jatkokehityksen myötä.

AESA-tutkan kehitys kohdistuu sen suorituskyvyn, monikäyttöisyyden sekä kustannustehokkuuden lisäämiseen. DARPA:n kehitysohjelma *Arrays on Commercial Timescales (ATC)* pyrkii kehittämään edullista seuraavan sukupolven AESA-tutkaa, jonka kehitys perustuu kaupallisen puolijohdemikropiiriteknologiaan sekä monikäyttöisen digitaalisen yhteismoduulin käyttöönottoon. Yhteismoduulin on tarkoitus tukea useiden eri taajuusalueiden ja aaltomuotojen käyttöä, mikä mahdollistaisi tutkan toiminnan mukauttamisen tehtävän edellyttämiin vaatimuksiin. Tämä tapahtuu vaihtamalla moduuliin liitettäviä antennin lähetin-

vastaanotinyksiköitä sisältäviä paneeleita. Kehitysohjelman tavoitteena on myös mahdollistaa tutkan antennielementtien itsenäisen ohjaamisen, mikä lisää tutkan joustavuutta ja kapasiteettia. Tuleva kehitys johtaa siihen, että seuraavan sukupolven tutka on luonteeltaan enemmänkin radiotaajuussensori, joka perinteisten tutkan tehtävien lisäksi kykenee muun muassa suorittamaan elektronisen sodankäynnin ja kommunikoinnin toimintoja [8].

Matalan taajuusalueen tutkajärjestelmät ovat yksi kehityskohde vastahäivetekniseksi sensoriksi. Järjestelmä on muun muassa toteutettu hävittäjäluokan koneisiin sijoittamalla antennielementtejä siipien etureunasiivekkeisiin. Tällöin AESA-antennin pienistä moduuleista on mahdollista muodostaa matalien taajuuksien vaatimat suuret antennielementtikokonaisuudet [44]. Toisena kehityskohteenä on sensori-integraatioon ja datafuusioon perustuva havaintokyky. Sensori-integraatio mahdollistaa koneen sensoreiden yhdistämisen samaan tilannekuvaan. Datafuusio puolestaan mahdollistaa sensoreiden tuottaman raakatiedon kokoamisen ja tämän jälkeisen käsittelyn. Datafuusio vaatii nopean ja kattavan tiedonsiirtoverkoston, mihin liittyvää problematiikkaa käsitellään tarkemmin alaluvussa 3.7 *Verkostokeskeisyys ja tiedonsiirto*.

Optisen alueen sensoreiden sekä infrapuna-alueen etsintä- ja seurantajärjestelmien (engl. Infra-Red Search and Track,IRST) kehitys mahdollistaa osaltaan ilmataistelukoneen passiivisen havaintokyvyn kasvun. Järjestelmien kehitys muodostuu sensorin herkkyyden ja tarkkuuden lisääntymisestä sekä prosessointikyvyn kasvusta. Järjestelmien etuna tutkiin verrattuna on se, etteivät ne itse säteile, vaan ainoastaan vastaanottaa tietyn aallonpituusalueen säteilyä. Tällöin sensorien käyttäminen ei johda käyttäjän mahdolliseen paljastumiseen. Passiivisiin havaintomenetelmiin kuuluu myös ESM-sensorijärjestelmät (Electronic Support Measures), jotka ovat käytössä uusimmissa hävittäjämalleissa. Niiden tehtävänä on muun muassa havaita, tunnistaa ja seurata elektronisia kohteita. ESM-järjestelmien suorituskyky on käytettävien sensorien lisäksi riippuvainen sensoreilta tulevan datan prosessointikyvystä. Tällöin laskentakapasiteetin ja järjestelmän käyttämien algoritmien kehitys tulee johtamaan ESM-järjestelmien parempaan havaintokykyyn ja tarkkuuteen.

Kvanttitutka on yksi hypoteettinen mahdollisuus uudeksi sensoriteknologian osa-alueeksi. Sen toiminta perustuu kvanttilomittamiseen, joka on tunnettu ja testattu fysikaalinen ilmiö. Kvanttitutkan tekemään havainnointia varten tarvitaan signaalilähde, joka tuottaa lomittuneita lähetteitä. Nämä lähetteet hajotetaan pareiksi, joista toinen osapuoli menee suoraan sensorille ja toinen lähetetään kohti havainnoitavaa kohdetta. Kun toinen osapuoli osuu kohteeseen, sen ominaisuudet muuttuvat, jolloin sensoriin ohjattu pari kokee saman muutoksen kvanttimekaa-

nisten lakien mukaisesti. Sensori välittää havaitut muutokset prosessorille, joka muodostaa kuvan havaintoalueesta [26].

Kvanttitutka avasi toteutuessaan paljon uusia mahdollisuuksia. Koska lähetetyn säteen ei tarvitse heijastua takaisin kvanttitutkaa käytettäessä, paranisi häivemaalien havaitsemiskyky huomattavasti, ja lähetystehoa voitaisiin pienentää havainnon saamiseksi. Lisäksi kvanttitutkan häirintä olisi myös erittäin haastavaa. Kuvantamiseen liittyvien kvanttitekniikoiden kehitys on kuitenkin vasta alkuvaiheessa, eikä luotettavia arvioita mahdollisten sovellusten kehitysaikataulusta ole esitetty. Siten kvanttitutkan käyttö 6. sukupolven ilmataistelukoneessa vaikuttaa epätodennäköiseltä, eikä sitä oteta huomioon ilmataistelukoneen kehityssuuntaa arvioitaessa.

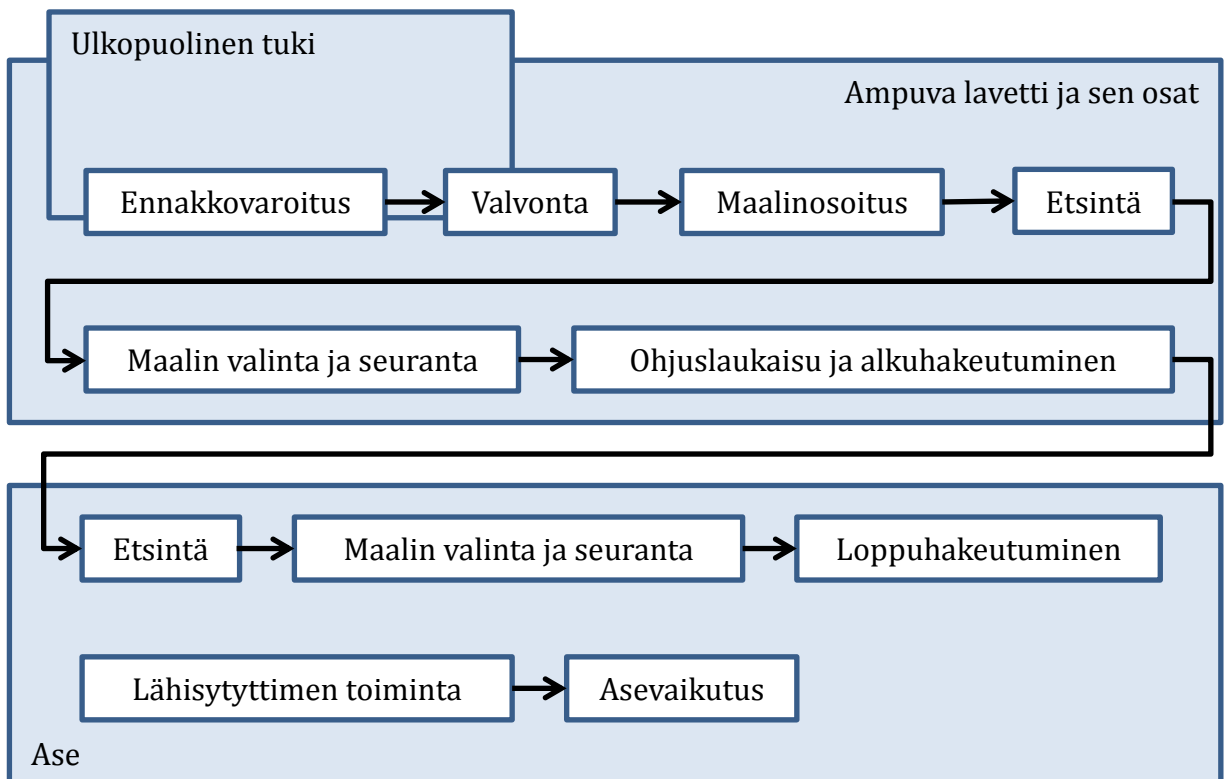
### 3.5 Häivetekniikka ja havaittavuus

Häiveominaisuudet ovat merkittävä nykyaikaisen ilmataistelukoneen muotosuunnitteluun sekä rakenne- ja materiaaliratkaisuihin vaikuttava tekijä. Lockheed Martin'in Secretive Skunk Works -osaston johtaja Rob Weiss uskoo häiveominaisuuksien säilyvän ilmataistelukoneiden suunnittelulähtökohtana myös tulevaisuudessa. Hänen mukaansa analyysit osoittavat selvästi, että stealth-kyky on keskeinen tekijä selviytymiskyvyn ja tehokkuuden näkökulmasta [27]. Weissin näkemys häiveteknologian korostuneesta roolista ovat linjassa useiden muiden Yhdysvaltain asevoimien edustajien kanssa. Esimerkiksi Yhdysvaltain F-22- ja F-35-hävittäjien määrittely ainoiksi käytössä oleviksi viidennen sukupolven hävittäjiksi perustuu muun muassa niiden kehittyneempiin häiveominaisuuksiin verrattuna muihin nykyaikaisiin hävittäjiin. Euroopassa ja Venäjällä stealth-kyky puolestaan nähdään ennemminkin yhtenä elektronisen sodankäynnin osana kuin erillisenä kokonaisuutena [48].

Häivemenetelmiin voidaan laskea kaikki ne menetelmät, joilla kohde pyritään tekemään vaikeasti havaittavaksi, tunnistettavaksi, yksilöitäväksi ja paikannettavaksi. Varsinainen häivetekniikka (Stealth) on kohteen herätteen hallintaa, joka tapahtuu hallitsemalla emissioita sekä heijastuksia. Sen pyrkimyksenä on sovittaa kohteesta heijastuva ja kohteen itsensä emittoiva heräte kohteen taustan herätteeseen koko spektrin alueella. Koko spektrin alueella tapahtuva tehokas häivyttäminen on tosin haasteellista, joten häivetekniikat on pyrittävä optimoimaan tietyille uhka-arvion perusteella uhanalaisimmille aallonpituusalueille. Aallonpituusalue vaikuttaa myös siihen, millä tavoin häivemenetelmillä pyritään suojaamaan kohdetta, tässä tapauksessa ilmataistelukonetta. Esimerkiksi tutka-alueella pyritään minimoimaan heijastuvan ja

siroavan tutkasäteilyn määrää kohteesta, infrapuna-alueella minimoimaan kohteen itsensä säteilemä lämpösäteily ja lähi-infrapuna-alueella sekä näkyvän valon alueella sovittamaan kohteen heijastusominaisuuksia kohteen taustaan [6].

Ilmataistelu- tai ilmatorjuntaohjuksen osuminen vaatii usean osatekijän onnistumisen. Muun muassa vastahäivetekniikoita käsittelevässä tutkimuksessaan Rusanen havainnollistaa osumaan johtavaa tapahtumaketjua ns. Kill Chainin avulla, joka on esitetty kuvassa 4. Kill Chain sisältää ketjutettuna osumaan tarvittavat osatekijät ennakkovaroituksesta asevaikutukseen, ja osuminen vaatii jokaisen osatekijän onnistumista. Häivetekniologia oikein suunniteltuna ja toteutettuna vaikuttaa useaan Kill Chain:in vaiheeseen [44]. Tästä seurauksena häivetekniikoiden käytöllä kyetään parhaimmillaan saavuttamaan merkittävää suojauksen ja selviytymiskyvyn kasvua.



Kuva 4. Kill Chain ohjustorjunnassa [44]

Tutkataajuuksilla käytettäviä häivemenetelminä ovat tutkasäteilyn absorboiminen sekä heijastusten ja sironnan suunnan hallinta. Absorboinnilla pyritään vaimentamaan sähkömagneettista säteilyä ennen sen heijastumista sekä heijastumisen jälkeen kohteen pinnassa olevilla absorptiomateriaaleilla. Sironnan suunnan hallinnalla pyritään minimoimaan kohteen tutkapinta-ala merkittävimpiin uhkasuuntiin. Tutkapoikkipinta-alan minimoimisella saavutetaan seuraavallaisia hyötyjä. Havainto-, tunnistus- ja yksilöintietäisyydet lyhenevät, ja vihollisen on käytet-

tävä suurempia lähetystehoja, jolloin se paljastuu esimerkiksi tutkavaroittimelle. Lisäksi omasuojajärjestelmillä toteutettavassa maalin peittämisessä tarvittava häirintäteho ja tarvittavan tutkasilpun määrä pienenee [6].

Tutkasäteilyä absorboivat materiaalit (engl. Radar Absorbent Material, RAM) pyrkivät estämään tutkasäteilyn heijastumisen materiaalin pinnasta ja vaimentamaan sekä ulkoa tulevaa että kohteen varsinaisesta pinnasta heijastuvaa säteilyä [6]. Tutkasäteilyn absorbointiin ja hallintaan voidaan käyttää myös absorboivia rakenteita (engl. Radar Absorbing Structures, RAS), älykkäitä tutkavaimennusmateriaaleja, metamateriaaleja sekä plasmasovelluksia. Älykkäiden eli dynaamisten RAM-materiaalien toiminta perustuu siihen, että ne muuttavat sähköisiä ominaisuuksiaan kohdetta valaisevan tutkan taajuudelle sopivaksi. Täten niillä on mahdollista toteuttaa esimerkiksi tutkan taajuudelle itsestään säätyviä vaimennusmateriaaleja [45].

Infrapuna-alueen merkitys tulee kasvamaan ilmataistelukoneen häivetekniikoiden ja havaittavuuden osalta. Tämä on seurausta maa- ja ilmasijoitteisten infrapuna-alueen sensoreiden kehittämisestä sekä ilmataistelukoneen lämmönhallintaan liittyvien haasteiden lisääntymisestä. Termisen alueen häivetekniikan tavoitteena on minimoida kohteen ja toimintaympäristön lämpöherätteiden kontrasti. Ilmataistelukoneen suunnittelussa tämä on otettava huomioon niin, että sen termiset herätteet minimoidaan ja ohjataan pois päin ensisijaisista uhkasuunnista. Tähän keinoja ovat lämpölähteiden eristäminen ja ohjaaminen haluttuun suuntaan, jäädyttäminen sekä erilaisten rakenteiden, pinnoitteiden ja materiaalien käyttö. Matalaemissiivisillä pinnoilla on mahdollista sovittaa lämpöherätteet ympäristöön. Menetelmässä pinnan ominaisuudet muuttuvat niin, että pinnan säteilemän termisen herätteen intensiteetti on pienentynyt. Tällöin muodostetussa kuvassa pinnan näennäislämpötila on todellista pintalämpötilaa alhaisempi, kun muokattua pintaa kuvataan lämpökameralla.

Termisiä herätteitä voidaan hallita myös adaptiivisilla pinnoilla. Adaptiivisille pinnoille on ominaista, että niiden ominaisuudet muuttuvat tietyssä lämpötilassa. Tällöin pinta muuttuu matalaemissiiviseksi esimerkiksi lämpötilan noustessa tietyn rajan yli. Adaptiivisten pintojen etuna matalaemissiivisiin pintoihin on se, että ne toimivat matalaemissiivisesti ainoastaan lämpöisenä, eli vain silloin, kun on tarvetta [45]. Mahdollisuudet havaittavuuden pienentämiseen erilaisten häivetekniikoiden avulla ovat kuitenkin rajallisia, koska pelkkä ilma-aluksen ”häivyttäminen” taustaansa vasten ei riitä. Ilma-aluksen jättämä lämpöjälki on edelleen havaittavissa ilmassa, johon tuotettu lämpökuorma siirtyy. Ilmataistelukoneen järjestelmien



tuottama lämpökuorma tulee lisäksi kasvamaan tulevaisuudessa muun muassa suurteholaser-järjestelmien myötä, jotka saattavat nostaa ilmataistelukoneen hetkellisen jäähdytystarpeen megawattiluokkaan.

U.S. Air Force Research Laboratory on käynnistänyt ohjelman, jonka tavoitteena on lisätä energiatehokkuutta, minimoida lämmönhallintaan liittyviä haasteita sekä tarjota ratkaisuja järjestelmien käyttösyklin vaatimaan tilanteen mukaiseen jäähdytys- ja energiatarpeeseen. Integrated Vehicle Energy Technology (INVENT) -kehitysohjelma tähtää nykyistä elektroniempaan seuraavan sukupolven ilmataistelukoneeseen, jossa energian tuotanto- ja jäähdytysjärjestelmä kykenevät mukautumaan hetkellisiin korkean tehon vaatimukseen. Tämä mahdollistaa huomattavan säästön kokonaisenergiankulutuksessa, koska nykyiset järjestelmät on suunniteltu toimimaan jatkuvasti maksimikuormituksen edellyttämällä tasolla [1].

Kehitysohjelman suunnittelema adaptiivisen tehon ja lämmönhallinnan järjestelmän tehtävänä on toimia lämpökuorman siirtäjänä ja talteenottajana sekä taata riittävä jäähdytys järjestelmille, joiden jäähdytystehon tarve on suuri mutta yhtäjaksoinen käyttöaika lyhyt. Sen toiminta perustuu 3.3 luvussa esitellyn muuttuvavaiheisen moottorin kolmanteen virtauskanavaan, patoilmaan sekä polttoaineen käyttämiseen lämmön vastaanottajana. Lämpöjäljen pienentämiseksi esimerkiksi laseria käytettäessä maksimaalinen lämpökuorma voitaisiin ohjata lämpökuihin, jotka väliaikaisesti varastoivat lämpöenergian. Elektroniikan jäähdytystarpeen vähentämiseksi yhtenä keinona kehitysohjelmassa esitetään komponentteja, jotka pystyvät toimimaan aiempaa korkeammassa lämpötilassa. Sähköjärjestelmän optimointi perustuisi puolestaan siihen, että jatkuva sähköntuotanto mitoitettaisiin ainoastaan jatkuvaa ja matalampaa tehoa tarvitseville järjestelmille, kun taas lyhytkestoiset tehopiikit katettaisiin akuilla [1].

## 3.6 Miehittämätön ilma-alusteknologia

### 3.6.1 Miehittämätön ilma-alus

Miehittämättömät ilma-alukset (engl. Unmanned Aerial Vehicle, UAV) ovat voimakkaan kehityksen alla oleva ilma-alusluokka. Sotilasilmailussa miehittämättömiä ilma-aluksia käytetään jo tällä hetkellä laajasti erilaisissa tiedustelu-, harhautus- ja valvontatehtävissä. Myös niiden käytön taistelutehtävissä sekä ilmasta ilmaan että ilmasta maahan arvioidaan kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa [28]. Miehittämättömien ilma-alusten rooliksi on kaavailtu

muun muassa miehitettyjen koneiden täydentäminen voimakkaasti puolustettujen alueiden ilmapuolustuksen lamauttamistehtävissä sekä rynnäkkötehtävissä toimiminen miehitettyjen hävittäjien suojaamina. Miehitettyihin ilma-aluksiin verrattuna ne sopivat paremmin mm. vaarallisiin ja pitkäkestoisiin tehtäviin (USA 3D = Dirty, Dull, Dangerous) [41]. Miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien kasvavaa roolia kuvaa hyvin se, että pelkästään niihin liittyvään tutkimus- ja kehitystyöhön kohdennettiin Yhdysvaltain valtiollisessa budjetissa yli 1600 miljoonaa dollaria vuosille 2005–2009 [52].

Yhdysvaltain puolustusministeriö (engl. Department of Defence, DoD) määrittelee UAV:n olevan moottoroitu lentokone, joka ei kuljeta ohjaajaa ja jonka nostovoima tuotetaan aerodynaamisin keinoin. Se pystyy lentämään joko täysin itsenäisesti tai ihmisen kauko-ohjaamana, on uhrattavissa oleva tai uudelleenkäytettävä ja voi kantaa mukanaan joko tappavaa tai eitappavaa kuormaa. Täten ballistiset ilma-alukset, ammukset, ohjukset ym. eivät ole miehittämättömiä lentoaluksia DoD:n määritelmän mukaan [12]. UAV:t voidaan perinteisten ilma-alusten tapaan jakaa lentotavan mukaan kiinteäsiipisiin, pyöriväsiipisiin ja ilmaa kevyempiin aluksiin sekä näiden yhdistelmiin. Käyttötarkoitukseltaan UAV:t voidaan jakaa seuraaviin luokkiin: maalina oleminen ja harhautus, tiedustelu, taistelu, tutkimus- ja kehittäminen sekä siviili- ja kaupallinen käyttö [49]. Tässä tutkimuksessa keskitytään ensisijaisesti miehittämättömiin taisteluilma-aluksiin (Unmanned Combat Aerial Vehicle,UCAV). Osa miehittämättömiltä ilma-aluksilta vaadittavista ominaisuuksista tosin koskettaa kaikkia miehittämättömien ilma-alusten alaluokkia.

UAV:t muistuttavat monilta ominaisuuksiltaan ja järjestelmiltään vastaavia miehitettyjä ilma-aluksia, ja niiltä vaaditaankin samoja teknisiä ominaisuuksia kuin miehitetyiltä ilma-aluksilta. Niiden lisäksi oleellisimmat UAV:ilta vaadittavat tekniset ominaisuudet ovat automaattinen tai etäohjauksen mahdollistava ohjausjärjestelmä, mahdollinen maalaukaisualusta sekä UAV:n käyttäytymistä ja sen järjestelmien käyttöä säätelevä ohjelmisto. Ohjaajan korvaamiseen liittyvät haasteet korostuvat UCAV-koneissa, jotka ovat suunniteltu osallistumaan ilma-taisteluun sekä toimimaan vihamielisessä ympäristössä, jossa ne kohtaavat kehittyneitä maa- ja ilmauhkia [28].

UAS-järjestelmä (Unmanned Aerial System) koostuu kolmesta ensisijaisesta osajärjestelmästä: ilma-aluksesta (Platform), maa-asemasta (Ground Control System/Station) sekä hyötykuormasta (Payload). Ilma-alus lentää ja siirtää hyötykuorman haluttuun paikkaan, maa-asema johtaa tehtävän suorittamisen ja hyötykuorma käsittää UAV:in kyvyn toteuttaa tehtävä.

Hyötykuormaan lukeutuu elektro-optiset havaintojärjestelmät ja infrapunajärjestelmät, tutkat, heitettävä tai tiputettava kuorma (ammukset/pommit, omasuoja, luotaimet ect.) sekä ympäristön havaitsemiseen käytettävät sensorit. Maa-asema koostuu lennonhallintanäytöstä, navigointijärjestelmistä, järjestelmän kunnon seuraamis- ja ennustamisjärjestelmästä, paikkatietojärjestelmästä, varmennetuista yhteysjärjestelmistä sekä tietojenkäsittelylaitteistosta. Lavetti itsessään jakautuu viiteen osajärjestelmään, joita ovat koneen runko, voimantuotto, ohjausjärjestelmä, tarkkuusnavigointijärjestelmä sekä Sense & Avoid -järjestelmä [51].

### 3.6.2 UCAV – kuudennen sukupolven operatiivinen ilmataistelukone?

JANE's Defence Weeklyn artikkelin *USAF contemplates unmanned jet option* mukaan Yhdysvaltain ilmavoimien esikuntapäällikkö kenraali Michael Moseley sanoo miehittämättömän stealth-koneen olevan yksi vaihtoehto seuraavan sukupolven ilmataistelukoneeksi. Samassa artikkelissa puolustusanalyttikko Steve Zaloga arvioi miehittämättömien järjestelmien kehitystyöhön käytettävien rahamäärien perusteella USAF:en olevan täysimittaisesti viemässä kehitystyötä eteenpäin. Zaloga kuitenkin huomauttaa, että miehittämättömän hävittäjän toteuttamiseen liittyy vielä teknisiä haasteita. Esimerkkinä hän mainitsee sellaisten integroitujen sensorien puuttumisen, joiden avulla voisi tehdä vastaavanlaisia arvioita ilmataistelussa kuin ohjaaja tekee. Hän näkee kuitenkin teoriassa olevan mahdollista, että ohjaajan veroinen visuaalisten sensorien kokonaisuus voisi olla saatavilla 2020-luvun loppupuolella [13].

Miehittämättömällä ilmataistelukoneella on monia etuja miehitettyyn ilmataistelukoneeseen verrattuna. Ohjaajan poistamisesta saatava painon säästö mahdollistaa suuremman hyötykuorman ja polttoainekapasiteetin tai vaihtoehtoisesti koneen koon pienentämisen. Nämä puolestaan mahdollistavat suuremman toiminta-ajan ja -matkan, paremman liikehtimiskyvyn sekä pienemmän tutkapoikkipinta-alan. Lisäksi ohjaajan fyysiset rajoitteet sekä ohjaajaan kohdistuva uhka poistuvat miehittämättömän toteutuksen myötä. Miehittämättömän ilmataistelukoneen yksi keskeinen haaste liittyy sen toimintavarmuuteen sekä sen kykyyn toimia odottamattomissa tilanteissa. Lentäjä kykenee omaan havainnointiin ja harkintaansa perustuen muun muassa navigoimaan myös järjestelmien vikaantuessa, mihin miehittämätön ilma-alus ei kykene. Toinen tärkeä kysymys on miehittämättömän ilmataistelukoneen autonomisuuden taso. Esimerkiksi aseiden käyttöön liittyvä päätöksenteko voidaan edelleen säilyttää ihmisellä, joka etäohjaa konetta tilannekuvan perusteella. Etäohjaus vaatii kuitenkin jatkuvaa, luotettavaa ja reaaliaikaista kaksisuuntaista tiedonsiirtoa.

UCAS-järjestelmien rooli ilmasodankäynnissä tulee kasvamaan edelleen. Puolestaan näkemykset ja arviot siitä, kuinka laajasti niillä voisi korvata miehitettyjä ilma-aluksia, vaihtelevat suuresti. Prosessointitehon ja keinoälyn kehittymisen myötä miehittämättömien ilma-alusten kyky tehdä itsenäisiä päätöksiä omaan tilannearvioon perustuen kasvaa. On kuitenkin oletettavaa, että esimerkiksi päätöksenteko aseiden laukaisemisesta halutaan pitää ihmisellä. Tästä seurauksena on mahdollista, että tulevaisuudessa päätöksentekovastuuseen ja käyttöperiaatteisiin liittyvät tekijät rajoittavat miehittämättömien taisteluilma-alusten käyttöä enemmän kuin käytettävissä olevat teknologiset ratkaisut.

Yhdysvaltain puolustusministeriön alaisuudessa tuotetussa selvityksessä *Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap 2005–2030* arvioidaan miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien tarpeellisuutta, järjestelmiin liittyviä operatiivisia ja teknologisia vaatimuksia sekä näiden osa-alueiden tulevaisuuden kehitystä. Selvityksessä keskeiset teknologian osa-alueet jaetaan prosessori-, kommunikaatio-, lavetti- ja hyötykuormaan liittyviin teknologioihin. Näiden osa-alueiden pohjalta selvityksessä esitetään arvioita siitä, millä aikataululla erilaisia suorituskykyjä voidaan ottaa käyttöön miehittämättömissä ilma-alusjärjestelmissä. Taulukossa 1, joka on *Roadmapissa* olevan taulukon suomennettu versio, esitetään arvioita siitä, milloin miehittämättömillä taisteluilma-aluksilla olisi mahdollista suorittaa erilaisia aseiden käyttöä sisältäviä tehtäviä. Taulukossa miehittämätöntä taisteluilma-alusta edustaa J-UCAS (Joint Unmanned Combat Air System). Varsinainen J-UCAS-kehitysprojekti on lopetettu vuonna 2006, ja muutoinkin taulukossa esitettävät ajankohdat ovat teknologian kehitykseen pohjautuvia suuntaa antavia arvioita. Taulukosta on kuitenkin nähtävissä, että teknologisen kehityksen arvioidaan mahdollistavan miehittämättömän taisteluilma-aluksen käyttämisen laajasti erilaisissa ilmasodankäynnin tehtävissä 2030-luvulle mentäessä.

Taulukko 1. Arvio miehittämättömien taisteluilma-alusjärjestelmien käytettävyydestä erilaisiin tehtäviin [52]

Rooli		2005	2010	2015	2020	2025	2030
SEAD	EA-6B	J-UCAS					
Rynnäköinti	F-117		J-UCAS				
Yhdistetty rynnäköinti/SEAD	EA-6B, F16, F-117			J-UCAS			
Vastailmatoiminta	F-14, F-15, F-16				J-UCAS		
Yhdistetty rynnäköinti/SEAD/ vastailmatoiminta	F/A-18						J-UCAS

Ihmisen aivojen prosessointinopeuden arvioidaan olevan luokkaa 100 miljoonaa MIPS:iä (million-instruction-per-second, suom. miljoonaa käskyä sekunnissa) ja muistikapasiteetin 100 miljoonaa megatavua. Prosessorien kehitysnopeuden perusteella supertietokoneiden arvioidaan saavuttavan ihmisen nopeuden ja kapasiteetin jo ennen vuotta 2020, mutta hinta ja käytettävyys rajoittavat näin tehokkaiden prosessorien laajamittaista käyttöä ilma-aluksissa. Selvityksen arvion mukaan prosessori, jonka nopeus saavuttaa tason 100 miljoonaa MIPS:iä, maksaa vuonna 2030 arviolta 10000\$ [52]. Tämä mahdollistaisi 2030-luvulla miehittämättömän ilma-aluksen tiedonkäsittelyn nopeuden nostamisen ihmisistä korkeammalle tasolle kustannustehokkaasti.

Miehittämättömien ilma-alusten pitkän tähtäimen kehitystyössä autonomisuus on keskeinen kehitysosa-alue. Vaikka prosessorien muistikapasiteetti ja laskentateho tulevat jo lähitulevaisuudessa olemaan moninkertaisia ihmisen aivoihin verrattuna, ei se automaattisesti johda järjestelmien älykkyyden ja autonomisuuden kehittymiseen samassa suhteessa. Colin Wills käsittelee teoksessaan *Unmanned Combat Air Systems In Future Warfare* miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien autonomisuutta (engl. autonomy) ja automatisointia (engl. automation) sekä niihin liittyvää määrittelyä. Teoksessa esiteltävien määrittelyiden mukaan automatisoitu järjestelmä tarkoittaa järjestelmää, joka toimii yhdeltä tai useammilta sensoreilta saatavien syötteiden perusteella loogisesti noudattaen ennalta määritettyjä sääntöjä. Automaattinen toi-

minta on luonteeltaan mekaanista ja tapahtuu ilman ajattelua tai tietoisuutta. Se on kuitenkin itsenäistä ja tapahtuu ilman ihmisen osallistumista toimintaan. Autonomiset järjestelmät on puolestaan määritetty yleisellä tasolla järjestelmiksi, jotka tekevät päätöksiä, jotka eivät pohjautu ennalta ohjelmoituihin käskyihin perustuvaan ohjaukseen. Päätökset ovat luonteeltaan enemmän satunnaisia ja perustuvat järjestelmän omaan tulkintaan päätökseen johtaneista vaikutteista [54].

*HPCR Manual on International Law Applicable to Air and Missile Warfare* määrittelee autonomisen UCACin olevan miehittämätön ilma-alus, jolla on sensoreihin ja omaan prosessointiin perustuva kyky tehdä hyökkäyspäätöksiä tietokoneohjelman mukaisesti. Autonomisuuden yleiseen määrittelyyn verrattuna UCACin autonomisuuden määritelmässä on Willsin mukaan kyse ennemminkin korkeasta automaation tasosta kuin täydestä autonomisuudesta. Muun muassa vaatimus UCACin hyökkäyspäätösten ennustettavuudesta tukee niiden kehittämistä ennemmin erittäin automatisoiduiksi kuin täysin autonomisiksi. Wills pitää todennäköisenä, että miehittämättömät taisteluilma-alusjärjestelmät tulevat toimimaan autonomisesti ainoastaan silloin, kun kommunikaatioyhteys on menetetty, eikä ihminen osallistu päätöksentekoon. Silloinkin UCACin päätöksenteko pohjautuu ennalta toteutettuun ohjelmointiin [54].

Kehittyneimmät miehittämättömät ilma-alukset selviytyvät jo nykypäivänä hyvin ennalta ohjelmoitavista lentosuorituksista. Tehtäviin voi sisältyä myös suurta tarkkuutta vaativia toimintoja, kuten tukialusnousuja ja -laskuja tai kuvan 5 mukaista ilmatankkausta. Prosessorien suorituskyvyn ja keinoälyn kehittymisen myötä miehittämättömän taisteluilma-aluksen kyky itsenäiseen toimintaan kasvaa, ja sen tehtäväkenttää voidaan laajentaa huomattavasti nykyisestä. Teknologinen kehitys tulee mahdollistamaan seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen miehittämättömän toteutuksen. Miehittämättömän teknologian käyttöönoton vaikutuksia ilmataistelukoneen kehitykseen arvioidaan tarkemmin luvussa 4.2.



Kuva 5. Northrop Grumman X-47B suorittamassa ilmatankkausta [37]

### 3.7 Tiedonsiirto ja verkostokeskeisyys

Verkostokeskeisyyden ja tiedonsiirtokyvyn kehittäminen on tällä hetkellä yksi merkittävimmistä ilmataistelujärjestelmien kehityskohteista. Verkostoituminen mahdollistaa järjestelmäkokonaisuuksien suorituskyvyn huomattavan nostamisen jo olemassa olevilla järjestelmillä sekä uusien järjestelmien liittämisen yhteensopivaksi aiempiin järjestelmiin. The US Defence Advanced Research Projects Agency (DARPA) johtajan, Arati Prabhakaranin, mukaan seuraavan sukupolven ilmatilan hallintaan liittyvät parannukset tulevat ennemminkin useiden järjestelmien ja suorituskykyjen kehittämisen myötä kuin yksittäisestä läpimurtoteknologiasta. Hänen näkemyksensä mukaan ei ole näkyvissä esimerkiksi teknologiaa, joka yksinään jatkaisi Yhdysvaltojen ilmaylivoimaa seuraavaksi kolmeksi tai neljäksi vuosikymmeneksi [20]. Prabhakaranin näkemys tukee tarvetta kehittää järjestelmien suorituskykyjen tehokkaampaa hyödyntämistä. Verkostokeskeisen toiminnan kehittäminen on yksi keskeisistä tekijöistä tähän tavoitteeseen pääsemiseksi.

Tilannetietoisuus on tärkeä osa päätöksentekoa. Ilmasodankäynnissä tilannetietoisuuden ja oikean tilannekuvan merkitys korostuu johtuen ilmasodan dynaamisesta luonteesta. Ennen ilmavalvontaan käytettävien tutkien tuloa tilannetietoisuus perustui lähes yksinomaan ohjajan näköhavaintoihin. Myöhemmin ilmavalvontatutkat mahdollistivat hävittäjien johtamisen torjuttavien kohteiden lähelle, mutta varsinainen taistelukosketus tapahtui edelleen näköetäi-

syyden sisäpuolella. Riittävän kehittyneen tutkan integroiminen hävittäjään 1960-luvulta eteenpäin mahdollisti maalihavainnon ja torjunnan ulottamisen myös näköetäisyyden ulkopuolelle. Tutkien suorituskyvyn kasvu lisäsi jatkuvasti ohjaajan tilannetietoisuutta ympäröivästä ilmatilasta. Tosin maalitiedon välittäminen muille koneille tai maa-asemalla muutoin kuin radion välityksellä tuli mahdolliseksi vasta datalinkkien käyttöönoton jälkeen 1900-luvun loppupuolella. Datalinkki mahdollisti tilannekuvan saamisen muilta koneilta sekä tiedustelu-, johtamis- ja valvontajärjestelmiltä, mikä tuotti ohjaajalle huomattavasti paremman tilannekuvan, kuin mitä koneen omat sensorit pystyivät tuottamaan.

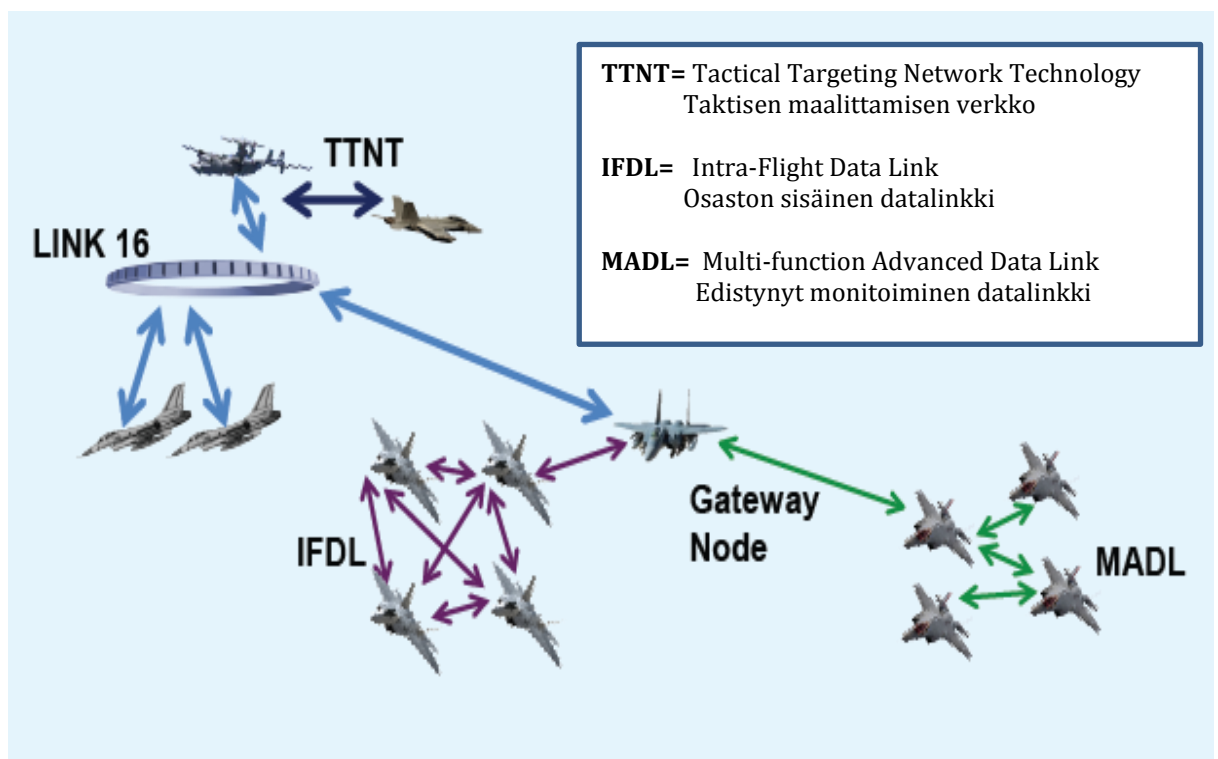
Verkostoitumisen tehokas hyödyntäminen vaatii nopean ja häiriönkestävän tiedonsiirtoyhteyden eri toimijoiden välillä. Kalle Passoja on tutkinut esiupseerikurssi-tutkielmassaan tilannekuvan muodostamista viidennen sukupolven hävittäjissä sekä tiedonsiirtoteknologioiden kehitystä. Passoja nostaa tutkimuksessaan esille useita tekijöitä, joihin kasvanut tiedonsiirtonopeus tuo etuja. Kvantavan sensorin, esimerkiksi SAR-tutkan tai optronisen sensorin, kuva voidaan lähettää hyväksyttävällä viiveellä maahan tai toiseen koneeseen ja hyödyntää sitä maalinosoitusprosessissa. Lähetinpaikannuksessa ja -tunnistuksessa suuri tiedonsiirtonopeus puolestaan mahdollistaa ESM-vastaanottimien vastaanottamien signaalien prosessoinnin kootusti. Tällöin saavutetaan parempi tarkkuus kuin yksittäisen hävittäjän ESM-vastaanottimella tai tutkavaroitimmella [39].

Nykyistä nopeampi tiedonsiirto mahdollistaa myös datalinkkien siirtämän tiedon tehokkaamman ja nopeamman jakamisen sekä ns. ”collaborative targeting” eli yhteisen maalinsoittamisen, mikäli tiedon fuusiointi on toteutettu hyvin. Tämä parantaa yksittäiseen sensoriin nähden havaintoetäisyyttä, tunnistuskykyä sekä tarkkuutta. Parantunut tiedonsiirtonopeus vaikuttaa myös sekä itse toteutettuun että vastustajan toteuttamaan häirintään. Monikäyttötutkien myötä ilmataistelukoneilla on kyky elektroniseen vaikuttamiseen, jolloin hyvien yhteyksien avulla samanaikainen häirintä useasta koneesta voidaan toteuttaa koordinoitusti. Vastustajan häirintän vaikutusta voidaan puolestaan heikentää hyödyntämällä koneiden tutka- ja ESM-tietojen välitystä. Edellä mainittujen hyötyjen lisäksi hyvä viiveetön yhteys mahdollistaa monipaikka-tutkan toiminnan [39].

Datalinkkien ja erilaisilla salaustekniikoilla suojattujen muiden yhteyksien kehitys sekä järjestelmien määrän lisääntyminen on aiheuttanut ilma-alusten tiedonsiirtokyvylle ja -kapasiteetille kasvavia vaatimuksia. Nykyaikainen ilmasodankäynti muuttuu koko ajan kompleksisemmaksi, ja sekä miehitettyjen että miehittämättömien järjestelmien täytyy kyetä



nopeasti jakamaan informaatiota dynaamisessa ympäristössä. Kommunikointiin liittyvää haastetta lisää se, että monet käytössä olevat radioverkot eivät ole yhteensopivia keskenään johtuen muun muassa salauksen ja aaltomuotojen eroista eri ilma-alustyyppien käyttämien järjestelmien välillä. Ongelmaa voidaan kiertää käyttämällä datalinkkiportteja (data-link gateway), jotka toimivat muuntimena ja reitittimenä eri verkkojen välillä. Menetelmän käytettyä heikentää kuitenkin näiden porttien rajallinen tiedonsiirtokyky, jolloin suuren datanopeuden vapaa ja saumaton tiedonsiirto erilaisia tiedonsiirtoverkkoja käyttävien ilma-alusten välillä ei ole mahdollista [5]. Kuvassa 6 on havainnollistettu erilaisten tiedonsiirtoverkkojen liittämistä yhteen käyttäen apuna datalinkkiporttia, jonka solmukohtana (engl. Gateway Node) toimii ilma-alus. Solmukohta liittää perinteisempää lento-osaston sisäistä datalinkki-verkkoa (engl. Intra-Flight Data Link, IFDL) sekä kehittyneempää, tarkkaa suuntausta hyödyntävää monitoimista datalinkkiä (engl. Multi-functional Data Link, MADL), käyttävät osastot LINK 16 -verkkoon.



Kuva 6. Eri datalinkkiverkoissa olevien käyttäjien liittyminen toisiinsa [5]

Verkkokeskeiseen sodankäyntiin liittyvien haasteiden ratkaisemiseksi DARPA ilmoitti lokakuussa 2015 aloittaneensa DyNAMO-kehitysohjelman, joka tulee sanoista ”Dynamic Network Adaptation for Mission Optimization”. Ohjelma pyrkii löytämään uusia teknologioita, jotka mahdollistavat olemassa olevien staattisten verkkojen ja tulevaisuuden mukautuvien verkkojen yhdistämisen. Näin se varmistaisi näiden toiminnan haastavassa radioympäristössä

ja häirinnän alla. Näiden teknologioiden avulla DyNAMOn tavoitteena on mahdollistaa vapaa ja välitön tiedonkulku kaikkien ilmassa olevien järjestelmien välillä tarvittavalla salaustasolla ja häiriönsietokyvyllä [5].

DyNAMO-hanketta demonstroidaan Communications in Contested Environments (C2E) -ohjelmassa. C2E suunnittelee uutta joustavaa arkkitehtuuria, jossa kommunikointi ei rajoitu käytettävään radioon tai aaltomuotoon. Ohjelmassa on tarkoitus vauhdittaa kehitystyötä käyttämällä kaupallisia älypuhelimien arkkitehtuurimalleja, joissa sovellusprosessointi, reaaliaikainen prosessointi sekä ohjelmiston määrittämät laitteistotoiminnot on erikseen validoitu, suoritettu ja päivitetty. Tämä mahdollistaa uusien kykyjen nopean käyttöönoton [5]. Kehitystavoite on merkittävä, sillä jatkossakin erilaisissa järjestelmissä on tarkoituksenmukaista käyttää erilaisia radioita, aallonpituusalueita, aaltomuotoja ja tiedonsiirtolaitteita riippuen toimintaympäristöstä, käyttötarkoituksesta ja laitteisiin kohdistuvista suorituskykyvaatimuksista. Lisäksi COTS-tuotteiden lisääntyvä käyttö on huomattavan taloudellista verrattuna ainoastaan sotilaskäyttöön suunniteltujen ratkaisuiden kehittämistyöhön.

### 3.8 Uudet teknologiat

Tutkimuksessa suoritettavan kartoituksen yhtenä tehtävänä on tunnistaa myös uusia teknologioita, joita seuraavan sukupolven ilmataistelukoneessa voitaisiin hyödyntää. Suurteholaser osoittautui ainoaksi uudeksi sovellukseksi, ja se esitellään omana kokonaisuutenaan tässä luvussa. Muut uudet teknologiat tai järjestelmien ominaisuudet liittyvät niin kiinteästi edellä käsiteltyihin teknologian osa-alueisiin, ettei niitä ole tarkoituksenmukaista erottaa omaksi kokonaisuudeksi.

#### 3.8.1 Ilma-alueeseen sijoitettava suurteholaser-järjestelmä

Ilma-alueessa käytettävällä suurteholaser-järjestelmällä olisi huomattavia etuja verrattuna tällä hetkellä käytössä oleviin ilmataistelukoneen asejärjestelmiin. Sen vaikutus välittyy laukaisun jälkeen valonnopeudella kohteeseen, mikä paitsi mahdollistaa asevaikutuksen saamisen ilman viivettä laukaisun jälkeen, myös evää kohteen mahdollisuuden suorittaa laukauksen jälkeisiä omasuojatoimenpiteitä. Maakohteita vastaan toimiessa se myös vähentäisi oleellisesti sivullisiin kohdistuvia vahinkoja verrattuna perinteisiin räjähdewaikutukseen perustuviin aseisiin, sekä kasvattaisi mahdollisten tehtävän aikana suoritettavien iskujen määrää.

Omasuojakäytössä suurteholaser olisi puolestaan ainoa järjestelmä, joka kykenee tuhoamaan lähestyvän ohjuksen sen sijaan, että se pyrkii vain häiritsemään tämän toimintaa. Laserin käyttöön omasuojana ei siten tarvitsisi yhdistää myöskään yhtä voimakasta lavetin samanaikaista liikehdintää. Lavettiin tai mukana kannettavaan podiin integroitu matalatehoinen laser on jo laajassa käytössä osana hävittäjän asejärjestelmiä.

Yhdysvaltain ilmavoimat on julkaissut pyynnön sellaisen suurteholaserin kehittämiseen, jonka voisi sijoittaa kuudennen sukupolven ilmaherruushävittäjään 2030-luvulta eteenpäin. Ilmavoimien tahtotila on, että kehitystyö saavuttaisi valmiustason 5 (technology readiness level – TRL5) vuoteen 2022 mennessä. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmän komponentit pystytetään integroimaan ”tarkoituksenmukaisen realistisiin tukijärjestelmiin”, jotta niitä voisi testata simuloitussa ympäristössä. Air Force Research Laboratoryn mukaan laseria ja säteenhallintajärjestelmää on tutkittu lavetista riippumattomana korkeus- ja nopeusalueilla 0–65000 ft ja Mach 0.6–2.5. USAF:n mielenkiinto kohdistuu kolmen eri kategorian lasereihin. Matalatehoinen luokan käyttökohteita ovat seuranta, maalintaminen sekä vihollisen sensorien lamauttaminen ja tuhoaminen. Keskittehoiset laserit muodostaisivat suojaavan laser-asejärjestelmän, jonka tarkoituksena on tuhota kohti tulevat ohjukset. Suurteholaserit on puolestaan tarkoitettu hyökkäyksellisiin tehtäviin ilma-aluksia ja pintamaaleja vastaan [31].

Suunnatun energian asejärjestelmien kehitys on muutoinkin ollut kasvava trendi Yhdysvaltain puolustusministeriön alaisissa projekteissa. Muun muassa U.S. Navy on kehittänyt pieniä aluksia vastaan tarkoitettua laivasijoitteista puolijohdelaseria. Myös ilmasijoitteista laseria on testattu kahdella eri lavetilla, Boeing 747:llä ja Lockheed C-130H:lla [31]. Missile Defence Agency ja USAF testasivat suurta Boeing 747:än (projektinimeltään YAL-1), integroitua kemiallista laseria, joka oli suunniteltu kiihdytysvaiheessa olevien ballististen ohjusten torjuntaan. Sen toiminta perustui ruumaan sijoitettuun Chemical Oxygen Iodine Laseriin (COIL) sekä koneen nokkaan sijoitettavaan suuntaavaan optiikkaan. Miljardeja maksanut kehitystyö kohtasi kuitenkin merkittäviä haasteita, eikä järjestelmä koskaan saavuttanut sille suunniteltua suorituskykyä. Koneen ruumaan sijoitettava laserjärjestelmä oli massiivinen ja kompleksinen, ja sillä suoritettavien laukausten määrä rajoittui noin 20 johtuen rajallisesta mukana kuljetettavan kemikaalin määrästä. Kemiallisen laserin tehon olisi myös oltava moninkertainen testi-versioon verrattuna, jotta käytännöllinen laukaisuetäisyys olisi saavutettu [43].

Asekäyttöön soveltuvan laserin tulisi Lockheed Martinin mukaan olla teholtaan vähintään 100 kW, mitä pidetään myös yleisesti tehorajana puhuttaessa laserista aseena. Karkeasti arvioituna

100 kW lasersäteiden tuottaminen vaatii sähköenergiaa yhden megawatin teholla, mikä johtaa siihen, että jäähdytystehon tulisi olla 900 kW [36]. Jäähdytys onkin yksi merkittävä haaste laserjärjestelmän integroimisessa hävittäjä-kokoluokan ilma-alukseen, vaikka edellä mainittujen lukujen suhde muuttuu edullisempaan suuntaan lasertekniikan kehittyessä. Tällä hetkellä hävittäjän normaali jäähdytysteho on vain kymmenien kilowattien luokkaa. Laserin tuottamaa lämpökuormaa voi tiettyyn rajaan asti siirtää lavetin rakenteisiin ja polttoaineeseen, mikä puolestaan heikentää häiveominaisuuksia infrapuna-alueella. Jäähdytyksen ja termisen alueen havaittavuuteen liittyvää problematiikkaa käsitellään laajemmin alaluvussa häivetekniikka ja havaittavuus.

Toinen keskeinen laserjärjestelmän integroimiseen liittyvä haaste on järjestelmän paino. YAL-1:n laserjärjestelmän pelkkä ydinosa, COIL, painoi n. 18000 kg, mikä vastaa suuruusluokaltaan koko hävittäjän painoa. Laseraseiden kehitystyö onkin siirtynyt kemiallisista lasereista puolijohde- ja kuitulaserien suuntaan. Vuonna 2009 Northrop Grumman saavutti Joint High Power Solid State Laser (JHPSSL) -ohjelman alaisuudessa 105 kW sädetehon yhdistettynä viiden minuutin yhtäjaksoiseen käyttöön. Toteutuksessa käytettiin seitsemää 15 kW:n yksikköä, jotka oli yhdistetty tuottamaan yhtenäinen säde [37]. Järjestelmä kykeni muuttamaan 19,3 prosenttia tulovirrasta säteen fotoneiksi. DARPA:n oma kehittämisohjelma High Energy Liquid Laser Area Defense System (HELLADS) tavoittelee puolestaan 150 kW:n laseria, joka painaisi ainoastaan 750 kg. Tämä tarkoittaa tehopainosuhdetta 5 kg/kW, mikä tekisi siitä ulostulotehoo suhteitettuna 60 prosenttia kevyemmän kuin Grummanin vastaava järjestelmä [16]. Helmikuussa 2011 DARPA ilmoitti ylittäneensä 34 kW:n ulostulotehon yksittäisillä moduuleilla, mikä mahdollistaisi niiden myöhemmän yhdistämisen tavoitelluksi 150 kW:n järjestelmäksi [17].

Viimeisen kymmenen vuoden aikana tapahtunut kehitys kuitenkin osoittaa, että asetetut teho- ja säteenlaatuvaatimukset täyttävän järjestelmän toteuttaminen ja integroiminen hävittäjäkokuokan ilma-alukseen on mahdollista seuraavan sukupolven ilmataistelukoneessa. Esimerkiksi HELLADS-ohjelman tavoittelema alle 750 kg:n paino ja 2 - 3 kuutiometrin tilavuus eivät olisi enää rajoittavia tekijöitä ilmataistelukoneen suunnittelussa. Suurteholaserjärjestelmän integroiminen ilmataistelukoneeseen aiheuttaa kuitenkin kompromisseja koneen muiden ominaisuuksien kanssa, sillä varsinaisen laserjärjestelmän lisäksi vaadittavat muutokset koneen jäähdytys- ja sähköntuottojärjestelmiin tulevat oletettavasti lisäämään painoa ja lavetin sisäistä tilantarvetta.

### 3.9 Yhteenveto

Teknologinen kehitys tulee jatkumaan kaikilla tutkimuksessa määritetyillä ilmataistelukoneen kokonaisratkaisuun vaikuttavilla osa-alueilla. Uusien innovaatioiden osalta kehityksen nopeutta ja mahdollisen käyttöönoton ajankohtaa on haastava arvioida, koska teknologisen kehityksen lisäksi niihin tulevat vaikuttamaan voimakkaasti muun muassa suurvaltojen poliittinen ja sotilaallinen tahtotila sekä käytettävissä olevat resurssit. Seuraavien vuosikymmenien aikana tapahtuvan kehityksen suuntaviivoista pystyy sen sijaan esittämään suhteellisen luotettavia arvioita. Eri teknologiaosa-alueiden merkittäviä yhteisiä ajureita ovat pyrkimys kustannustehokkuuden, käytettävyyden, kestävyuden ja selviytymiskyvyn nostamiseen sekä kaupallisten tuotteiden ja ratkaisujen laajempi hyödyntäminen osana sotilasjärjestelmiä. Osa-alueiden kehitys esitellään tässä yhteenvedossa vain lyhyesti, ja tarkempi analysointi tehdään alaluvussa 4.2.

Ilmataistelukoneen rakenteiden kehitys kohdistuu käytettävien materiaalien kehitykseen sekä rakenteiden käytettävyyden ja järjestelmien integroimiseen liittyvään kehitykseen. Materiaalien kehityksen tavoitteena on edullisempien, kestävämpien sekä paremmin vaurioita sietävien komposiittimateriaalien, kuten kudottujen hiili-epoksi-komposiittirakenteiden kehittäminen. Rakennerratkaisuissa kehitys tulee kohdistumaan monitoimirakenteiden ja niihin liittyvien älykkäiden materiaalien käyttöön. Tämä tulee mahdollistamaan itse korjautuvan rakenteen toteuttamisen, kattavan rakenteisiin integroidun oman kunnon ja käytön seurantajärjestelmän sekä avioniikan ja sensorien integroimisen rakenteisiin.

Aerodynamiikan potentiaalisena kehitysalueena on suunnattavan suihkuvirtauksen käyttäminen primääriseen ohjaukseen sekä ohjattavuuden säilyttäminen tilanteissa, jossa ohjaaminen ei perustu aerodynaamisesti tuotettuihin voimiin. Laskennallisen virtausmekaniikan tutkimustyö ja simulointitekniikoiden kehittyminen tietokoneiden laskentatehon kasvun myötä mahdollistavat pyrstöttömän konfiguraation toteuttamisen. Voimalaitteen osalta merkittävänä kehitysaskeleena on muuttuvavaiheisen suihkumoottorin käyttöönotto, mikä vähentää kompromissitarvetta polttoainetaloudellisuuden ja moottorista saatavilla olevan työntövoiman välillä. Voimalaitteiden kehitystyö jatkuu myös yli- ja hypersooniselle nopeusalueille suunnitelluissa ratkaisuisissa. Näistä keskeisiä ovat PDE sekä ramjet ja scramjet -teknologiat.

Sähkömagneettinen spektrin hyödyntäminen säilyy merkittävimpänä ilmataistelukoneen suorituskyvyn osa-alueena. Havaittavuuden pienentämiseen tähtäävien teknologioiden sekä sen-

soriteknologioiden välinen kilpailu vaikuttaa tulevaan kehitykseen. Merkittävimmät sensorien kehitysosa-alueet ovat vastahäivetekniset ratkaisut sekä tutkan monitoimikyvyn parantaminen. Kehitys kohdistuu herkempien ja tarkempien infrapuna- ja optisen aallonpituusalueen sensoreihin, matalan aallonpituusalueen tutkiin sekä passiivisiin järjestelmiin. Elektronisesti keilaava tutka säilyy ilmataistelukoneen pääsensorina. Sen kehitystä ajaa kaupallisen tekniikan hyödyntäminen ja arkkitehtuurin yksinkertaistaminen. Tutkan käytettävyyttä tulee lisäämään sen käytön laajentuminen elektroniseen sodankäyntiin ja kommunikointiin sekä antennin vaihdettavien moduulien mahdollistama mukautuminen erilaisiin tehtäväprofiileihin. Häiveteknologian kehitys painottuu aiempaa voimakkaammin termisen alueen häivetekniikoihin, mikä on seurausta erityisesti ilmataistelukoneen järjestelmien kasvavasta lämpökuormasta sekä passiivisten havaitsemismenetelmien kehittymisestä.

Miehittämättömien ilma-alusjärjestelmien kehitys tulee mahdollistamaan niiden käytön laajasti aseiden käyttöä sisältäviin tehtäviin 2030-luvulle mentäessä. Järjestelmissä käytettävien prosessorien muistikapasiteetti ja laskentateho tulevat nousemaan selvästi ihmisen aivoja korkeammalle tasolle. Tämä ei kuitenkaan johda järjestelmien älykkyyden ja autonomisuuden kasvuun samassa suhteessa, mikä rajoittaa järjestelmien autonomisuusastetta. Seuraavan sukupolven miehittämätön ilmataistelukone tulee todennäköisesti olemaan luonteeltaan ennemminkin erittäin automaattinen kuin täysin autonominen taistelujärjestelmä. Ihmisen rooli tulee säilymään merkittävänä erityisesti päätöksenteon osalta miehittämättömissä taisteluilma-alusjärjestelmissä.

Sodankäynnin verkostokeskeisyyden ja tiedonsiirtokyvyn kehitys mahdollistavat kattavamman ja tarkemman tilannekuvan muodostamisen. Tämä johtaa yksittäisen toimijoiden parempaan tilannetietoisuuteen ja sitä kautta järjestelmäkokonaisuuksien suorituskyvyn nousuun. Verkostokeskeinen sodankäynti ja siihen liittyvä datafuusio vaativat suurta tiedonsiirtokapasiteettia. Keskeiset ongelmat tiedonsiirrossa ovat tiedonsiirtonopeus sekä erilaisten järjestelmien yhteensopivuusongelmat salauksen ja aaltomuotojen osalta. Ongelmia pyritään vähentämään käyttämällä joustavaa arkkitehtuuria, jossa kommunikointi ei rajoitu käytettävään radioon tai aaltomuotoon. Kehitystyön ajureina toimivat kaupalliset arkkitehtuurimallit, joissa sovellusprosessointi, reaaliaikainen prosessointi ja ohjelmistojen määrittämät laitteistotoiminnot voidaan erikseen suorittaa ja päivittää.

Laserjärjestelmien kehitystyö tulee mahdollistamaan seuraavan sukupolven ilmataistelukoneeseen integroitavan suureteholaserin toteuttamisen. Laboratorio-olosuhteissa järjestelmillä

on saavuttu yli 100 kW ulostuloteho, mitä pidetään asejärjestelmän vaatimana tehorajana. Järjestelmien painoa ja kokoa on myös saatu pienennettyä riittävästä, jotta integroiminen hävittäjäkokoluokan koneeseen olisi mahdollista. Lisääntynyt paino ja lavetin sisäinen tilantarve aiheuttavat silti kompromissitarpeita koneen muihin ominaisuuksiin. Lisäksi haasteita tuovat vaadittavat muutokset jäähdytys- ja sähköntuottojärjestelmille, sillä laserjärjestelmän vaatima teho- ja jäähdytystarve nousevat megawattiluokkaan. Potentiaalisia käyttökohteita suurteho-laserille olisivat muun muassa omasuoja ohjuksia vastaan, ilma- ja pintakohteiden tuhoaminen lähietäisyydeltä sekä kohteiden lamauttaminen ja häirintä suuremmilta etäisyyksiltä. Rajoittuneen tehon, olosuhteiden vaikutuksen ja säteenhallinnan haasteiden johdosta laserjärjestelmä ei tule korvaamaan ilmataisteluoohjuksia BVR-ilmataistelussa seuraavan kahdenkymmenen vuoden aikana.

## 4 ILMATAISTELUKONEEN KEHITYS VUOTEEN 2035 MENNESSÄ

### 4.1 Hävittäjän kehitys 1940-luvulta nykypäivään

Suihkumoottorilla varustettujen hävittäjien aikakausi alkoi 1940-luvulla. Hävittäjien kehitys on ollut nopeaa viimeiset seitsemänkymmentä vuotta, eikä kehitys näytä hidastuvan nähtävissä olevassa tulevaisuudessa. Kehitys ei kuitenkaan ole ollut lineaarista, vaan siinä on nähtävissä selviä harppauksia eri aikakausina johtuen muun muassa uusien teknologisten innovaatioiden ja kehitystyötä tukevien apuvälineiden parantumisesta. Merkittävimmät muutokset hävittäjien rakenteessa, järjestelmissä ja suorituskyvyssä ovat olleet niin suuria, ettei niitä ole voitu saavuttaa pelkästään parantelemalla aiempia konemalleja. Tästä johtuen hävittäjän kehityskaaresta voidaan tunnistaa selviä eri aikakausiin sijoittuvia luokkia, joiden edustajien ominaisuudet eroavat huomattavasti aiemmista hävittäjämalleista. Näitä luokkia on alettu kutsua hävittäjien sukupolviksi.

Termiä hävittäjä sukupolvi alettiin käyttää yleisesti 1990-luvulla, jotta suurimmat ilma-aluksen suunnittelu, avioniikka ja asejärjestelmiä koskevat kehitysaskleet voitaisiin tunnistaa. Varsinkin uudempien hävittäjämallien kohdalla on ollut kiistanalaista, millä perusteilla sukupolvenvaihdon voidaan katsoa tapahtuneen. Myös tietyn sukupolven tyypillisten ominaisuuksien määrittäminen on aiheuttanut erimielisyyttä muun muassa eri valmistajien välillä. Historiallisesti sukupolvenvaihdon on kuitenkin katsottu tapahtuneen silloin, kun suorituskykyyn merkittävästi vaikuttavan teknologisen innovaation liittäminen olemassa oleviin konemalleihin ei ole mahdollista päivityksen tai jälkikäteen tehtävän varustelun avulla [9]. Jäljempänä esitetyt vuosiluvut kuvaavat tietyn sukupolven tyypillisten edustajien käyttöönottoajankohtaa, ja osa malleista on ollut käytössä myös esitetyn aikavälin jälkeen.

#### 4.1.1 1.–4. hävittäjä sukupolvi

Hävittäjien sukupolvijaottelussa ei oteta huomioon suihkumoottoriaikaa edeltäviä malleja, vaikka mäntämoottorisia lentokoneita käytettiin torjuntatehtäviin laajasti jo toisen maailmansodan aikana. Ensimmäisen sukupolven hävittäjien aikakauden katsotaan siten ajoittuvan aikavälille n. 1945–1955, kestäen toisen maailmansodan loppuvaiheesta Korean sotaan asti. Sukupolven edustajat olivat ensimmäisiä suihkumoottorilla varustettuja hävittäjiä, mutta vastasivat muutoin rakenteeltaan pitkälti korvaamiaan mäntämoottorikoneita [55]. Ensimmäisen



sukupolven hävittäjät, kuten F-86, MiG-15 ja MiG-17, oli varustettu analogisella avioniikka-järjestelmillä, eikä niissä ollut tutkaa tai omasuojajärjestelmiä. Aseistus koostui konekivääristä tai tykistä sekä ”tyhmistä pommeista” ja raketeista. Koneiden moottoreissa ei ollut jälkipoltinta, ja käytännön nopeusalue rajoittui lähisooniseen alueeseen [9].

Hävittäjän toinen sukupolvi ajoittuu aikavälille 1955–1960. Ase- ja omasuojajärjestelmien osalta merkittävän kehityksen muodostivat ilmasta-ilmaan -tutka, infrapuna- ja puoliaktiivinen ohjus (näköetäisyyden sisäpuolella käytettävä) sekä tutkavaroitin. Ensimmäiseen sukupolveen nähden selvää kehitystä tapahtui myös moottorin, ilma-alusten rakenteiden ja aerodynamiikan osalta, mikä mahdollisti ylisoonisen nopeuden saavuttamisen ja ylläpitämisen vaakalennossa. Toisen sukupolven aikana ilmataistelu tapahtui edelleen näköetäisyyden sisäpuolella, mutta ohjusten ja erityisesti tutkaohjusten kehitys alkoi kasvattaa mahdollista torjuntäetäisyyttä. Toisen sukupolven edustajia olivat muun muassa F-104, F-5 sekä MiG-21 [9].

Kolmas hävittäjä sukupolvi ajoittuu 1960-luvun alusta 1970-luvun alkuun, ja moni sukupolven edustaja oli käytössä Vietnamin sodassa. Kolmanteen hävittäjä sukupolveen kuuluvat pelkääntään ilmasta-ilmaan -roolilla toimivien hävittäjien lisäksi ensimmäiset multi-role -hävittäjät, kuten MiG-23 ja F-4, jotka kykenivät suorittamaan myös ilmasta maahan tapahtuvia hyökkäyksiä [55]. Aerodynamiikan ja rakennesuunnittelun kehitys johti muun muassa aiempaan huomattavasti parempaan liikehtimiskykyyn. Merkittävin kehitys edelliseen sukupolveen kohdistui avioniikkaan ja asejärjestelmiin. Siinä missä toisen sukupolven hävittäjien tutka oli kykenevä ainoastaan valaisemaan maalia lähietäisyydeltä, mahdollisti kolmannen sukupolven edustajilla käytössä oleva doppler-tutka ns. ”look down/shoot down” -toiminnan sekä lentolinjasta sivuun tapahtuvan maalinosoituksen (engl. off-bore-sight targeting). Tutkan kehittyneet suorituskyky yhdistettynä nopeasti kehittyneisiin puoliaktiivisiin tutkaohjuksiin, kuten AIM-7 Sparrow ja AA-7 Apex, mahdollisti ilmataistelun siirtymisen myös näköetäisyyden ulkopuolelle. Sukupolven selvin kehityshyppäys olikin siinä, että viholliskoneisiin vaikuttaminen ei vaatinut enää visuaalista havaintoa [9].

Neljännän sukupolven hävittäjien kehitys ja käyttöönotto ajoittuvat 1970-luvulta 1980-luvun loppupuolelle, mutta useat neljännän sukupolven konetyypit ovat edelleen laajasti käytössä. Näitä ovat muun muassa F/A-18, F-15, F-16, MiG-29, Su-27 ja Mirage 2000 -hävittäjät. Koneiden rakenteissa ja muotosuunnittelussa keskityttiin saamaan etua ilmataistelussa ennemminkin liikehtimiskyvyn paranemisen kuin nopeuden kasvamisen kautta [55]. Koneet kykenevät saavuttamaan yli 7 G:n kiihtyvyysoimia suhteellisen pienellä nopeudella, ja nopeus-

alue rajoittuu tyypillisesti noin kaksinkertaiseen äänennopeuteen. Tyypillinen maksiminopeus on siten itse asiassa pienempi kuin joillain kolmannen sukupolven hävittäjillä. Aerodynamiikan kehittyminen yhdistyi neljännessä sukupolvessa ”fly-by-wire” -ohjausjärjestelmään, mikä mahdollisti aerodynaamisten ratkaisuiden ja ohjainpintojen optimoidumman hyödyntämisen sekä aerodynaamisen stabiiliuden pienentämisen. Koneiden rakenteiden painoa pienennettiin käyttämällä komposiittimateriaaleja. Tämä paransi osaltaan koneiden suorituskykyä kasvattamalla tehopainosuhdetta ja hyötykuorman määrää.

Suorituskyvyn kannalta merkittävin kehitysalue edelliseen sukupolveen verrattuna oli edelleen avioniikassa sekä sensoreissa ja asejärjestelmissä. Merkittäviä parannuksia avioniikan osalta olivat muun muassa head-up-display (HUD), joka mahdollistaa ohjaajan seuraamaan lentoarvoja ja pitämään katseen ohjaamon ulkopuolella samanaikaisesti sekä ”hands on throttle-and-stick” (HOTAS) -järjestelmä ja digitaaliset monitoiminäytöt (multi-function display, MDF). Teknologisen kehityksen myötä tutkien (pulssi-doppler) suorituskyky kasvoi merkittävästi, mikä mahdollisti kohteen havaitsemisen, seurannan ja ohjuksen laukaisemisen yhä kauempaa. Tämä johti ilmataistelun painottumisen entistä vahvemmin näköetäisyyden ulkopuolella tapahtuvaksi sodankäynniksi. Ohjusten osalta suorituskykyä lisäsi ensimmäisten aktiivisten tutkaohjusten käyttöönotto sekä infrapunaohjusten kehittyminen niin, että torjunta oli mahdollista suorittaa riippumatta vihollisen asennosta ampujaan nähden.

Neljäs sukupolvi on ensimmäinen varsinainen multi-role -hävittäjien sukupolvi. Neljännen sukupolven edustajista valtaosa on joko alun perin suunniteltu tai myöhemmin päivitetty multi-role -kykyisiksi. Esimerkiksi F/A-18 Hornetissa tämä näkyy niin avioniikan, ohjelmiston, sensorien ja asejärjestelmien kuin koneen rakenteenkin alkuperäisessä suunnittelussa. Myös stealth-kyvyn kehitys oli voimakasta neljännen sukupolven aikakautena. Lockheed F-117 Nighthawk ja Northrop Grumman B-2 Spirit -häivepommikoneet lensivät molemmat ensilentonsa 1980-luvulla. Ilmeisesti laajamittainen häiveteknologian hyödyntäminen hävittäjissä olisi tuona aikana kuitenkin ollut saavutettuun hyötyyn nähden liian kallista ja heikentänyt koneiden muita ominaisuuksia niin paljon, että sitä ei nähty järkeväksi. Joidenkin neljännen sukupolven hävittäjien häiveteknisiä ominaisuuksia on tosin elinjaksopäivitysten yhteydessä parannettu rakenteellisesti sekä heikosti havaittavien (engl. Low Observable, LO) materiaalien avulla, jolloin koneiden tutkapoikkipinta-alaa kriittisiin uhkasuuntiin on pienennetty.

Aikaväli 1980-luvun loppupuolelta 2000-luvulle on hävittäjien sukupolvijaottelun kannalta mielenkiintoinen kausi. Mitä lähemmäksi nykypäivää hävittäjän kehityskaaressa tullaan, sitä

vaikeampaa on tehdä rajanvetoa sukupolvien välille. Tämä johtuu siitä, että uusimmissa edellisen sukupolven konetyypeissä on jo useita seuraavan sukupolven tyyppiominaisuuksia. Kun viidennen sukupolven ensimmäisenä käyttöön otettuna hävittäjänä pidetään yleisesti F-22 Raptoria, jää väliin joukko 1990-luvulla ja 2000-luvun alkupuolella käyttöön otettuja hävittäjiä, jotka ovat huomattavasti kehittyneempiä kuin neljännen sukupolven vanhemmat konetyypit. Lisäksi näillä on joko osittaisia tai täysimittaisia viidennen sukupolven hävittäjän ominaisuuksista. Tätä ryhmää on alettu kutsumaan 4.5 sukupolven hävittäjiksi, mikä käsittää kaikkein kehittyneimmät neljännen sukupolven hävittäjät.

4.5 sukupolvi on omana ryhmänä perusteltu, sillä siihen kuuluvat hävittäjät, kuten F/A-18E/F Super Hornet, Eurofighter Typhoon, Gripen ja Dassault Rafale, ovat edeltäjiään merkittävästi suorituskykyisempiä muun muassa AESA-tutkan ja parannettujen häiveominaisuuksien johdosta. 4.5 sukupolven hävittäjille on ominaista, että niiden muotoratkaisut ovat melko samankaltaisia aikaisempien neljännen sukupolven hävittäjien kanssa. Lisäksi esimerkiksi stealth-kyvyn prioriteetti on ollut muotosuunnittelussa selvästi alempana verrattuna viidennen sukupolven hävittäjiin. Sen sijaan niihin on liitetty useita muita suorituskykyä lisääviä elementtejä. Näitä ovat tutkasäteily, absorboivien materiaalien käyttö, moottorien varustaminen suunnattavilla suihkusuuttimilla, suurempi asekuorman kapasiteetti, pidempi toimintamatka ja -aika sekä jo aiemmin mainittu AESA-tutka [9]. Lisääntyneen laskentatehon ja kehittyneempien datalinkkien ansiosta 4.5 sukupolven hävittäjien kyky verkostokeskeiseen sodankäyntiin ja kattavan tilannekuvan muodostamiseen on parantunut huomattavasti verrattuna vanhempiin neljännen sukupolven hävittäjiin.

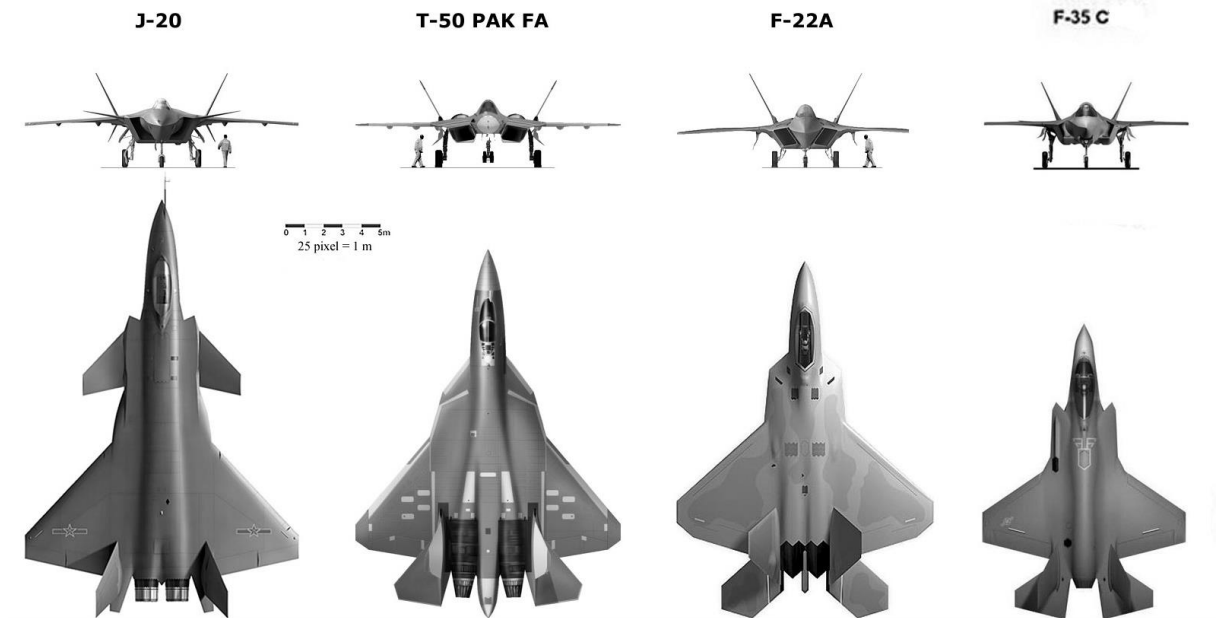
#### 4.1.2 5. hävittäjä sukupolvi – Nykypäivän ilmasodankäynnin kärki

Viides hävittäjä sukupolvi on yleisesti hyväksytty käsittämään ryhmää, joka koostuu käytössä ja kehitteillä olevista taktisista stealth-hävittäjistä. Vaikka kokonaisvaltainen stealth on ehkä selvin kehitysaskel aikaisemmista sukupolvista, kuuluvat viidennen sukupolven hävittäjien ominaisuuksiin myös mahdollisuudet supercruiseen, aiempaa moninaisempaan multi-role-toimintaan sekä sensorifuusioon [21]. Lisäksi kyseisen sukupolven tyyppillisiksi ominaisuuksiksi on mainittu aiempaa kehittyneempi avioniikka, verkostokeskeisyys sekä suorituskykyisemmät tietojärjestelmät, jotka mahdollistavat paremman tilannetietoisuuden. Viidennen hävittäjä sukupolven tarkka määrittely on vaikeaa, koska määrittelyissä esiintyy eroja sekä eri valmistajien että eri maiden välillä. Tässä tutkimustyössä viidennen hävittäjä sukupolven

edustajina käsitellään tämän hetken kehittyneimpiä hävittäjäkoneita sekä niiden sisältämiä merkittävimpiä aikaisemmista hävittäjätyypeistä poikkeavia teknologisia ratkaisuja. Nämä ratkaisut toimivat alkutilanteena kuudennen sukupolven ilmataistelukoneen kehitykselle. Viidennen hävittäjä sukupolven määrittely ei itsessään tuo lisäarvoa tulevaisuuden muutosten arvioinnille, eikä sitä tässä tutkimustyössä ole siten tarpeellista tehdä edellä kuvattua tarkemmin.

Yhdysvaltain F-22 Raptor on ensimmäinen ja tällä hetkellä ainut operatiivisessa käytössä oleva viidennen sukupolven hävittäjä. Se saavutti täysimääräisen operatiivisen valmiuden joulukuussa 2007 [7]. Toinen palveluskäytössä käytössä oleva viidennen sukupolven hävittäjä on Yhdysvaltain ja Iso-Britannian yhdessä suunnitteleman F-35 Lightning II -monitoimihävittäjän B-malli, joskaan se ei vielä ole saavuttanut operatiivista valmiutta. Muita pitkälle edenneitä kehitysprojekteja ovat Venäjän Sukhoi PAK FA, Kiinan J-20 ja J-31, Intian HAL AMCA, Intian ja Venäjän yhteinen projekti Sukhoi/HAL FGFA, Japanin Mitsubishi ATD-X, Turkin TAI TFX sekä Iranin Qaher F-313. Näistä kolme ensimmäistä on edennyt koelentovaiheeseen. Sukhoi PAK FA lensi ensimmäistä kertaa 29.1.2010, ja vuoden 2013 lokakuuhun mennessä sillä oli lennetty 450 lentoa neljällä eri prototyypeillä [47]. Kiinan ensimmäisen stealth-hävittäjän, J-20:n ensimmäinen prototyyppi, suoritti ensilentonsa 11.1.2011 [23]. J-20 on kaksimoottorinen delta-siipikone ja muistuttaa mittasuhteiltaan hyvin paljon Yhdysvaltain F-22 Raptoria. Sen arvioidaankin olevan kiinan vastine F-22 -hävittäjälle. Puolestaan F-35:n kokoinen ja tämän vastineeksi arvioitu J-31 (Project 310 Shen Fei) lensi ensilentonsa 31.10.2012 [10].

F-22 Raptor on ominaisuuksiensa puolesta hyvä esimerkki viidennen sukupolven hävittäjästä. Se on ensimmäinen ilmataistelukone, jossa yhdistyy kyky supercruiseen, kehittynyt sensorifuusio, häivemenetelmien hyödyntäminen koko rakenteen osalta sekä mahdollisuus säilyttää ohjattavuus liikkeissä, jotka eivät perustu puhtaasti aerodynaamisiin mekanismeihin. Raptorin siipiprofiili on ns. leikattu deltasiipi, joka mahdollistaa suuren siipipinta-alan sekä rungon tehokkaan hyödyntämisen nostovoiman tuottamisessa. Koneen ohjaustehon lisäämiseksi siinä on kaksi siivistä erillistä korkeusvakaajaa sekä kaksi sivuperäsintä [29]. Kuvasta 7 näkee, että kyseisen siipiprofiilin eri variaatioiden käyttö on yleistä viidennen sukupolven hävittäjissä.



Kuva 7. Havainnekuva eri viidennen sukupolven hävittäjistä. Kuvan mittakaava suuntaa antava [4]

Monitoimikyky on yksi viidennen sukupolven ilmataistelukoneiden suunnittelulähtökohdista. F-35 Lightning II -hävittäjä on monikäyttöisen AESA-tutkan lisäksi varustettu muun muassa sisäänrakennetuilla elektro-optisella sensorijärjestelmällä (engl. Electro-Optical Sensor System, EOSS) sekä elektro-optisella maalinsoitusjärjestelmällä (engl. Electro-Optical Targeting System, EOTS). Järjestelmät mahdollistavat kyvyn kohteen etsintää, seurantaan, etäisyysmittaukseen sekä maalinsoitukseen laajasti erilaisia ilma- ja pintamaaleja vastaan [30]. Viidennen sukupolven hävittäjien sensorijärjestelmissä käyttöönotetun tekniikan kehityksen myötä on oletettavaa, että ilmataistelukoneen käytettävyys erilaisiin elektronisen sodankäynnin sekä tiedustelun ja valvonnan tehtäviin tulee kasvamaan.

#### 4.2 Vuoteen 2035 mennessä ilmataistelukoneeseen integroitavissa olevat uudet ja jatkokehityt teknologiat sekä niiden käyttöönoton vaikutukset ilmataistelukoneen kehityssuuntiin

Tässä aluvussa arvioidaan kolmannessa luvussa tehdyn kartoituksen perusteella havaittua teknologista kehitystä eri ilmataistelukoneeseen vaikuttavilla teknologian osa-alueilla. Kehityksen tarkastelu jakaantuu kahteen kokonaisuuteen. Ensimmäisenä tehtävänä on arvioida, mitkä kartoituksessa löydettyistä teknologioista ovat vuoteen 2035 mennessä saavuttaneet riittävän kehitysasteen, jotta ne voitaisiin integroida ilmataistelukoneeseen. Toisena tehtävänä on arvioida näiden teknologioiden käyttöönoton vaikutuksia ilmataistelukoneen kehityssuuntiin,

mikä mahdollistaa luvussa 4.3 esiteltävien kehitysskenaarioiden muodostamisen. Joidenkin teknologioiden osalta kehitysaikataulun arviointia on toteutettu jo kolmannessa luvussa, joten tämä alaluvun pääpaino on teknologioiden käyttöönoton vaikutusten arvioinnissa.

Ilmataistelukoneen rakenteiden kehityksen voi jakaa rakenteissa käytettävien materiaalien kehitykseen sekä rakenteiden käytettävyyden ja järjestelmien integroimiseen liittyvään kehitykseen. Materiaalien osalta kehitys kohdistuu edullisempien, kevyempien, kestävämpien sekä paremmin vaurioita sietävien komposiittimateriaalien kehittämiseen. Esimerkkinä toimivat kudotut hiili-epoksi -komposiittirakenteet, joiden kärsimät vauriot ballistisissa testeissä ovat huomattavasti pienemmät nykyisin käytössä oleviin materiaaleihin verrattuna. Rakennusratkaisuissa kehitys tulee kohdistumaan monitoimirakenteiden ja niihin liittyvien älykkäiden materiaalien käyttöön. Monitoimirakenteiden kehitystyö tulee tutkimuksen tarkastelujakson aikana mahdollistamaan kattavan rakenteisiin integroidun oman kunnon ja käytön seurantajärjestelmän sekä avioniikan ja sensorien integroimisen rakenteisiin. Lisäksi itsekorjautuvien rakenteiden käyttö tulee laajenemaan rakenteiden suuriin kokonaisuuksiin ja kantaviin rakenteisiin. Kokonaisuudessaan rakenteen ja materiaalien kehitystyö johtaa seuraavan sukupolven ilmataistelukoneessa korkeampaan suorituskykyyn ja selviytymiskykyyn, pidempään käyttöikään sekä parempaan kustannustehokkuuteen.

Ilmataistelukoneen kehitysmahdollisuudet nk. perinteisen aerodynamiikan osalta ovat rajallisia. Seuraavina vuosikymmeninä ilmataistelukoneen suorituskykyä voidaan nostaa suunnattavan suihkuvirtauksen käyttämisellä primääriseen ohjaukseen sekä kehittämällä ohjattavuutta tilanteissa, joissa ohjaaminen ei perustu aerodynaamisesti tuotettuihin voimiin. Kehitys kohdistuu myös ilmataistelukoneen muotoratkaisuihin, jotka mahdollistavat muiden suorituskykyyn vaikuttavien osa-alueiden, kuten stealth-kyvyn, kehittymisen ilman aerodynaamisen suorituskyvyn merkittävää laskua. Laskennallisen virtausmekaniikan tutkimustyö ja simulointitekniikoiden kehittyminen tietokoneiden laskentatehon kasvun myötä mahdollistavat pyrstöttömän konfiguraation toteuttamisen ilman merkittävää liikehtimiskyvyn laskua kuudennen sukupolven ilmataistelukoneessa. Ratkaisu heikentää koneen vakausominaisuuksia erityisesti sivuttaisvakavuuden osalta, mutta puolestaan keventää rakenteen kokonaispainoa, pienentää vastusta sekä parantaa koneen stealth-ominaisuuksia tutka-aallonpituusalueella.

Voimalaitteen osalta merkittävänä kehitysaskelena vuoteen 2035 mennessä on muuttuvavaiheisen suihkumoottorin käyttöönotto. Se vähentää kompromissitarvetta polttoainetaloudellisuuden sekä moottorista saatavan työntövoiman välillä. Laboratoriomittauksissa tehdyissä

simulaatioissa muuttuvavaiheisella moottorilla on saavutettu yli 20 % lasku kokonaispolttoaineenkulutuksessa verrattuna samankokoiseen kiinteävaiheiseen moottoriin. Samalla maksimiteho nousi 5 % perusmoottoria ja 10 % maksimitehoasetusta käytettäessä. Tosin valmistajien ilmoittamien lukuarvojen luotettavuuteen on syytä suhtautua kriittisesti. Voimalaitteen arvioitu kehitys tulee kuitenkin osaltaan parantamaan huomattavasti ilmataistelukoneen toiminta-aikaa ja -matkaa tai vaihtoehtoisesti hyötykuorman määrää suhteessa kokonaispainoon.

Voimalaitteiden kehitystyö jatkuu myös yli- ja hypersooniselle nopeusalueille suunnitelluissa ratkaisuisissa. Näistä keskeisiä ovat PDE- sekä ramjet- ja scramjet-teknologiat. Suuri nopeusalue vaatii kuitenkin merkittäviä muutoksia koneen aerodynaamiseen suunnitteluun, mikä heikentäisi muun muassa koneen liikehtimisominaisuuksia. Lisäksi suuri nopeus kasvattaa koneen lämpöjälkeä merkittävästi. Myös taktisesta näkökulmasta yli kaksinkertaisesta äänennopeudesta saatava hyöty on kyseenalainen ilma-aluksessa, jonka yhtenä pääroolina on ilmaan tapahtuva sodankäynti. Kyseisiin teknologioihin perustuvien moottorien toiminta myös heikkenee merkittävästi alisoonisella nopeusalueella, mikä osaltaan rajoittaa niiden käytettävyyttä ilmataistelukoneen voimalaiteratkaisuna. Tutkimuksen rajauksen mukaiseen ilmaistelukoneeseen ei arvion mukaan tulla integroimaan hypersoonisen nopeusalueen mahdollistamaa voimalaiteratkaisua.

Sähkömagneettisen spektrin hallinta tulee säilymään keskeisessä roolissa ilmataistelukoneen kehityksessä. Havaitsemiskyvyn ja havaittavuuden osalta sensori- ja häiveteknologioiden kehitystä ajaa näiden keskinäinen kilpajuoksu ase-vastaan-ase -periaatteen mukaisesti. Muotoilulla sekä RAM- ja RAS-tekniikoiden avulla ilma-alusten tutkapaikkipinta-ala on saatu laskettua hyvin alhaiseksi erityisesti millimetriaallonpituusalueella. Havaintokyvyn näkökulmasta tätä ongelmaa ei täysinmittaisesti kyetä ratkaisemaan tutkien tehoa ja erottelukykyä nostamalla. Lisäksi tehokkaammat aktiiviset sensorit tekevät käyttäjän helpommin havaittavaksi passiivisia menetelmiä käyttävälle vastustajalle. Selkeinä trendeinä sensorien ja havaintojärjestelmien kehitystyössä on järjestelmien passiivisuus, jolla pyritään parantamaan emissioiden hallintaa. Tästä seurauksena infrapuna-aallonpituusalueen merkitys tulee korostumaan seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen häivetekniikoiden sekä sensorien kehitystyössä.

Elektronisesti keilaava aktiivielementtejä käyttävä tutka (AESA) tulee olemaan kuudennen sukupolven ilmataistelukoneen pääsensori. Herätteiden ja energian käytön hallinnan näkökulmasta voisi olettaa, että tutkan havaintokykyä pyritään nostamaan ennemmin laskentakapasiteetin nousun sekä paremman signaaliprosessoinnin ja keilan hallinnan kautta kuin ulostu-

lotehoa kasvattamalla. Havaintoetäisyyksien ja erottelukyvyn kasvun lisäksi tutkan kehitys-alueita ovat hinnan alentaminen sekä käytettävyyden lisääminen. Vuonna 2035 ilmataistelukoneen tutka on luonteeltaan ennemminkin radiotaajuussensori, joka perinteisten tutkan tehtävien lisäksi kykenee muun muassa suorittamaan elektronisen sodankäynnin ja kommunikoinnin toimintoja. Kaupallisen puolijohdemikropiiriteknologian laajempi käyttö sekä monikäyttöinen digitaalinen yhteismoduuli mahdollistavat kehitys- ja valmistuskustannusten laskun. Yhteismoduulin käyttö myös mahdollistaa seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen pääsensorin ominaisuuksien muuttamisen vastaamaan erilaisten tehtävien vaatimuksia.

Proessorien laskentanopeuden ja muistikapasiteetin kasvu sekä tiedonsiirtoteknologioiden kehittyminen tulevat vuoteen 2035 mennessä mahdollistamaan miehittämättömän taisteluilma-aluksen käyttämisen huomattavasti nykyistä laajemmin erilaisiin tehtäviin. Lisäksi miehittämättömien ilma-alusten autonomisuusastetta voidaan arvioitun teknologisen kehityksen valossa nostaa selvästi. Tutkimuksen tarkastelujaksolla miehittämättömien taisteluilma-alusten monitoimikyky tulee kasvamaan, ja niiden tehtäväkentän voi odottaa laajentuvan myös ilmasta ilmaan tapahtuvaan sodankäyntiin. Ei ole kuitenkaan nähtävissä, että miehittämättömän ilmataistelukoneen autonomisuus saavuttaisi vuoteen 2035 mennessä riittävän korkeaa tasoa, jotta se kykenisi itsenäisesti toteuttamaan kaikki ilmataistelukoneelle määritettävät tehtävät.

2030-luvulla miehittämättömän ilmataistelukoneen autonomisuuden taso mahdollistaa ennalta ohjelmoidun suunnitelman toteuttamisen. Kyky arvioida tilanteen muutoksia tai itsenäisesti päättää suoritustapa tehtävän toteuttamiseksi on kuitenkin rajallinen, ja arvioitu autonomisuuden taso aiheuttaa rajoitteita miehittämättömän ilmataistelukoneen itsenäiselle toiminnalle erittäin komplekseissa tehtävissä, kuten ilmataistelussa. On myös hyvin epätodennäköistä, että päätöksentekovastuuta aseiden tilannekohtaisesta käytöstä siirrettäisiin ihmiseltä koneelle tulevien vuosikymmenten aikana. Tästä seurauksena miehittämätön ilmataistelukone tulee olemaan luonteeltaan erittäin automaattinen, eikä täysin autonominen järjestelmä. Ihminen rooli tulee säilymään merkittävänä erityisesti tehtävän kannalta kriittisissä päätöksissä, joten luotettava ja reaaliaikainen yhteys koneen ja operaattorin välillä tulee olemaan keskeinen käytettävyyteen vaikuttava tekijä. Miehittämättömän ilma-alusteknologian käyttöönotto mahdollistaa ilmataistelukoneen käytettävyyden ja suorituskyvyn nostamisen 2030-luvulle mentäessä. Tämä on seurausta painonsäästöistä, ohjaajan fyysisten rajoitteiden poistumisesta, omasuojajärjestelmien- ja toimenpiteiden automatisoinnista sekä mahdollisuudesta nostaa tehtävien riskitaso.



Tiedonsiirtonopeuden kasvaminen sekä yhteensopivuusongelmien väheneminen erilaisia radioverkkoja käyttävien toimijoiden välillä mahdollistaa ilmataistelukoneiden tehokkaamman verkottumisen. Tämä puolestaan johtaa parempaan tilannetietoisuuteen ja kykyyn toimia passiivisesti uhkatilanteen niin vaatiessa. Pitkän aikavälin kehitys voisi jopa mahdollistaa ilmataistelukoneen, jolla ei ole lainkaan omia sensorijärjestelmiä, ja tilannetietoisuus perustuu datalinkin kautta saatuun tilannekuvaan. Kaupallisten laitesovellusten ja arkkitehtuurimallien hyödyntäminen puolestaan mahdollistaa radiojärjestelmien nopeamman päivityssyklin sekä kehitys- ja valmistuskustannusten pienentämisen, mikä lisää radiojärjestelmien kustannustehokkuutta.

Laser ei tule syrjäyttämään ilmataisteluohjuksia näköetäisyyden ulkopuolella (BVR) tapahtuvassa ilmataistelussa tulevina vuosikymmeninä. Kyky vaikuttaa ilmataisteluohjusten kantan ulkopuolelle tai edes Rne (Range no-escape) -etäisyyksille vaatisi laseraseen ulostulotehon lisäämisen megawatti-luokkaan. Lisäksi ilmakehän tuomat haasteet säteen kohdistamiselle ja etenemiselle kasvavat merkittävästi etäisyyden kasvaessa. 2030-luvulla mahdollisia suurteholaserin käyttökohteita voisivat siis olla ilmataistelukoneen omasuoja ohjuksia vastaan, järjestelmien lamauttaminen ja häiritseminen sekä lyhyen etäisyyden hyökkäyksellinen, tuhoamiseen tähtäävä toiminta ilma- ja pintamaaleja vastaan. Laser mahdollistaa ilmataistelukoneen vaikuttamisen aiempaa useampiin kohteisiin yhden lentosuorituksen aikana. Kehitys on merkittävä, koska mukana kannettavan aseistuksen määrä rajoittaa selvästi nykyisten ilmataistelukoneiden vaikutusmahdollisuuksia.

Ilmataistelukoneen kehityksessä on havaittavissa selkeitä kehityssuuntia, joihin vaikuttaa usealla eri teknologian osa-alueella tapahtuva kehitys. Tutkimuksessa tehdyn kartoituksen perusteella teknologinen kehitys tulee mahdollistamaan ilmataistelukoneessa huomattavasti paremman energiatehokkuuden ja energian käytön optimoinnin, selviytymis- ja monitoimikyvyn sekä kustannustehokkuuden. Tutkan moduulipohjainen toteutus myös parantaa ilmataistelukoneen mukautumiskykyä erilaisten tehtävien vaatimuksiin. Teknologian osa-alueilla tapahtuva kehitys myös osoittaa, että viidennen sukupolven ilmataistelukoneissa olevien järjestelmien jatkokehitys mahdollistaa ilmataistelukoneen suorituskyvyn nostamisen. Miehittämättömän toteutuksen mahdollistuminen on merkittävin kokonaisuus ilmataistelukoneen kehityksessä tarkasteluaikavälillä ja liittyy vahvasti ilmataistelukoneen järjestelmien automaatiotason nousemiseen. Järjestelmien automatisointia ei tutkimuksessa kuitenkaan määritetä omaksi kehityssuunnaksi. Järjestelmien automaattisuuden lisääntyminen on osa järjestelmien jatko-

hitystä, joka seuraa muun muassa laskentatehon lisääntymisestä. Miehittämättömän ilmalusteknologian käyttöönotto puolestaan on kokonaisuus, joka toimii edellä mainittujen kehityssuuntien vahvistajana.

Energiatehokkuuden lisääntyminen sekä parempi energian käytön hallinta muodostuvat useasta osatekijästä. Polttoaineen kulutus, lämpökuorman aiheuttamat rajoitteet sekä jäähdytystarve ovat keskeisiä ilmataistelukoneen energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Edullisempien ja kevyempien komposiittimateriaalien kehitys mahdollistaa kevyemmän rakenteen toteuttamisen. Tämä johtaa hyötykuorman kapasiteetin lisääntymiseen sekä pienempään polttoaineen kulutukseen. Muita polttoaineen kulutusta laskevia tekijöitä ovat muuttuvavaiheisen suihkumoottorin käyttöönotto, miehittämättömän toteutuksen tuoma painonsäästö sekä muototarkaisun virtaviivaistuminen. Kehityssuuntaa tukee myös sähköntuotto- ja jäähdytysjärjestelmien optimointi niin, että jatkuvaan matalatehoiseen ja hetkelliseen korkeatehoiseen tarpeeseen tarvittava teho tuotetaan eri järjestelmillä.

Ilmataistelukoneen selviytymiskyvyn kehittyminen on seurausta sen havaittavuuden pienemisestä, uhkan analysointikyvyn ja tilannetietoisuuden paranemisesta, itsekorjautuvien materiaalien lisääntyvästä käytöstä, kestävien ja vaurioita sietävien komposiittimateriaalien kehittämisestä sekä omasuojan paranemisesta. Passiivisten havaintojärjestelmien, kuten infrapuna-alueen ja optisen aallonpituusalueen sensorijärjestelmien kehitys sekä verkostoituminen mahdollistavat tilannekuvan muodostamisen aiempaa passiivisemmin. Tämä johtaa säteilyhallinnan kehittymiseen. Lämpökuorman hallinta ja adaptiivisten matalaemissiivisten pinnoitteiden käyttö puolestaan mahdollistavat ilmataistelukoneen termisen alueen häiveominaisuuksien kehittymisen. Säteilyhallinta ja laajemmalle sähkömagneettisen spektrin alueelle ulottuvat häiveominaisuudet pienentävät yhdessä ilmataistelukoneen havaittavuutta vihamielisessä ympäristössä. Suurteholaserin käyttöönotto johtaa ilmataistelukoneen omasuojan paranemiseen. Kyky tuhota lähestyvä ohjus pelkän häirinnän sijaan lisää omasuojan vaikutuksen todennäköisyyttä huomattavasti.

Seuraavan sukupolven ilmataistelukoneen monitoimikyky laajenee A/A- ja A/G-tehtävien suorittamisesta kykyyn toteuttaa erilaisia ISR- sekä elektronisen sodankäynnin tehtäviä. Monitoimikyvyn kehittäminen on jatkumoa jo kolmannesta hävittäjä sukupolvesta alkaneesta kehityssuunnasta. Monitoimikyvyn kehitystä tukee tutkan kehittyminen monikäyttöisemmäksi ja moduulipohjaiseksi, jolloin muunnettavuus erilaisten tehtävien vaatimuksiin paranee. Lisäksi suurteholaserin käyttöönotto laajentaa ilmataistelukoneen mahdollisia vaikuttamisen kohteita.

Alaluvussa 4.3.3 kuvataan tarkemmin kuudennen sukupolven ilmataistelukoneen monitoimikykyä.

Kustannustehokkuus tulee olemaan keskeinen suunnittelulähtökohta ilmataistelukoneen kehitysprojekteissa. COTS-tuotteiden lisääntyvä käyttö erityisesti ilmataistelukoneen elektronissa järjestelmissä alentaa kehitys- ja valmistuskustannuksia. Elinkaarikustannusten vähentämiseksi ilmataistelukoneet tullaan suunnittelemaan kestävämmiksi, mikä näkyy muun muassa materiaaleihin kohdistetuissa vaatimuksissa. Lisäksi ilmataistelukoneen järjestelmien päivitysmahdollisuuksia parannetaan, mikä mahdollistaa suorituskyvyn ja yhteensopivuuden kehittämisen elinkaaren aikana.

### 4.3 Ilmataistelukoneen 6. sukupolvi – ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä

Ilmataistelukoneen suorituskykyyn on tulevana vuosikymmeninä tulossa huomattavaa kehitystä useilla eri teknologian osa-alueilla tapahtuvan kehityksen seurauksena. Merkittävänä haasteena tulee kuitenkin olemaan järjestelmien integroiminen samaan kokonaisuuteen, mikä tulee väistämättä johtamaan kompromisseihin. Asiaa voi tarkastella suurteholaserjärjestelmän ja pitkän toimintamatkan kyvyn liittämällä pyrstöttömään, korkean huippunopeuden ja liikehtimiskyvyn omaavaan ilmataistelukoneeseen. Kokonaisuus olisi mahdollisesti toteutettavissa, mutta sen suunnitteluprosessi ja rakentamisen tulisivat hyvin kalliiksi. Lisäksi ratkaisuun liittyisi epävarmuustekijöitä, jotka saattaisivat muun muassa heikentää ratkaisun käytettävyyttä ja huollettavuutta. Sitä vastoin osittainen luopuminen korkeasta liikehtimiskyvystä ja suuresta huippunopeudesta paremman stealth-kyvyn, suuremman polttoaine- ja asekapasiteetin sekä laserin integroimisen mahdollistamiseksi toisi edelleen merkittävän suorituskykyllisän huomattavasti pienemmillä kustannuksilla. F-22 on hyvä esimerkki projektista, jossa on pyritty liittämään suuri määrä kehityksen kärjessä olevia teknologioita yhdeksi kokonaisuudeksi. Lopputulos edustaa kiistatta aseellisuuden kärkeä, mutta muun muassa korkeiden kustannusten takia kyseistä hävittäjämallia valmistettiin vain 187 koneyksilöä [50].

Edellisessä alaluvussa (4.2) esiteltiin ne uudet ja jatkokehitetty teknologiset ratkaisut, jotka ovat arvion mukaan integroitavissa ilmataistelukoneeseen vuoteen 2035 mennessä. Lisäksi alaluvussa arvioitiin näiden teknologioiden käyttöönoton vaikutuksia ilmataistelukoneen kehityssuuntiin. Tähän arvioon pohjautuen tutkimuksessa valikoitui kolme keskeistä ilmataistelukoneen kehityssuuntaa. Näiden kehityssuuntien kuvaamiseksi tutkimuksessa esitellään kunkin

kehityssuunnan osalta ilmataistelukoneen kokonaisratkaisu, jossa kehityssuunnan mukaiset ominaisuudet korostuvat. Merkittävä osa tutkimuksessa kartoitetuista teknologisen kehityksen mahdollistamista ratkaisuista sisältyy vähintään kahteen esiteltävistä kehityssuunnista. Toiston vähentämiseksi eri osa-alueiden teknologiset ratkaisut käsitellään laajemmin vain sen kokonaisratkaisun kohdalla, jonka edustamalle kehityssuunnalle kyseinen ominaisuus on merkittävin. Tästä seurauksena seuraavien alalukujen sisältämät kuvaukset ilmataistelukoneiden kokonaisratkaisuista ovat vaillinaisia muiden teknologian osa-alueiden osalta. Todellinen ilmataistelukoneen kehitysprojekti olisi todennäköisesti yhdistelmä näiden kolmen kuvauksen eri ominaisuuksista.

#### 4.3.1 Kehityssuunta 1 – Nykyisten osajärjestelmien sekä niissä käytettävien teknologioiden jatkokehitys

Ensimmäinen kehityssuunta muodostuu skenaariosta, jossa ilmataistelukoneeseen ei integroida merkittäviä rakenteeseen tai osajärjestelmien suorituskykyyn vaikuttavia uusia innovaatioita. Tällöin ilmataistelukoneen kehitys jatkuu nykyisissä osajärjestelmissä. Ilmataistelukoneen ominaisuuksien kehittyminen ja suorituskyvyn kasvu muodostuvat käytössä olevien teknologioiden jatkokehityksestä, kehittyneemmästä osajärjestelmien keskinäisestä integraatiosta sekä verkostokeskeisen sodankäynnin tuomista mahdollisuuksista. Energiatehokkuus ja energian käytön optimointi lisäävät ilmataistelukoneen toimintamatkaa, toiminta-aikaa ja hyötykuorman määrää sekä vähentää lämpökuorman aiheuttamia rajoituksia.

Teknologisille innovaatioille ja uusille järjestelmäratkaisuille on ominaista, että niiden kehitystyö jatkuu vielä sen jälkeen, kun ne ensimmäistä kertaa otetaan käyttöön taistelujärjestelmissä. Viidennen sukupolven ilmataistelukoneiden järjestelmissä ja rakenteissa on hyödynnetty useita teknologisia ratkaisuita, joita ei ole sovellettu aiemman sukupolven ilmataistelukoneissa. Tällöin esimerkiksi käyttöönotettujen häiveominaisuuksien, prosessointikapasiteetin ja sensorijärjestelmien jatkokehitys tulee viemään ilmataistelukoneen kehitystyötä eteenpäin.

Ensimmäisen kehityssuunnan mukaisen ilmataistelukoneen toimintamatkaa ja -aikaa tai vaihtoehtoisesti hyötykuorman määrää voidaan nostaa selvästi tällä hetkellä käytössä oleviin ilmataistelukoneisiin verrattuna. Tämä on seurausta usealla eri teknologiaosa-alueella tapahtuvasta kehityksestä, jonka merkittävimpinä osa-alueina ovat muuttuvavaiheisen suihkumoottorin käyttöönotto, koneen rakenteen keventyminen suhteessa kokonaispainoon sekä muotoratkai-

sun virtaviivaistuminen. Miehittämätön versio mahdollistaisi myös ohjaamoavioniikan, heittoastuimen, ohjaamon paineistusjärjestelmän ja ohjaajan käyttämien hallintalaitteiden poistamisen, mikä osaltaan pienentäisi kokonaispainoa. Skenaarion ilmataistelukone on yksi- tai kaksimoottorinen, ja sen voimalaitteena on muuttuvavaiheinen suihkumoottori. Tehtäväprofiilista riippuen muuttuvavaiheinen suihkumoottori mahdollistaa jopa usean kymmenen prosentin alenemisen polttoaineen kokonaiskulutuksessa. Samalla moottorista saatava maksimiväntövoima kasvaa sekä perusmoottoria että jälkipoltinta käytettäessä verrattuna vastaavan kokoiseen kiinteävaiheiseen moottoriin.

Tämän kehityssuunnan keskeisiä ajureita ovat prosessorien laskentatehon lisääntyminen sekä kustannustehokkuus. Suurempi laskentakapasiteetti mahdollistaa osajärjestelmien suorituskyvyn sekä automaatiotason nostamisen. Kaupallisten tuotteiden laajempi hyödyntäminen puolestaan sekä nopeuttaa kehitystyötä että laskee kehitys- ja valmistuskustannuksia. Uusien teknologioiden kehitystyö on hyvin resursseja vievää ja sisältää usein kokonaisratkaisun toimivuuteen liittyviä epävarmuustekijöitä. Tämä tukee järjestelmien jatkokehitystä uusien teknologioiden käyttöön ottamisen sijaan.

#### 4.3.2 Kehityssuunta 2 – Selviytymiskykyinen miehittämätön ilmataistelukone korkean riskin tehtäviin

Kehityssuunta 2 muodostuu kehityskulusta, jonka lopputilanne on erittäin selviytymiskykyinen miehittämätön ilmataistelukone. Selviytymiskyvyn kasvu on seurausta koneen heikosta havaittavuudesta, omasuojan kehittymisestä, paremmasta tilannetietoisuudesta sekä rakenteiden kestävyuden ja vaurionsiedon lisääntymisestä. Havaittavuuden ja emissiivisyyden pienentäminen perustuu muotoratkaisuihin, suhteellisesti pienempään kokoon sekä häiveominaisuuksien laajentumiseen nykyistä laajemmalle sähkömagneettisen spektrin alueelle. Lisäksi tilannekuvan muodostaminen toteutetaan verkostokeskeisesti data- ja sensorifuusion sekä koneen omien passiivisten järjestelmien avulla, jolloin koneen lähettämän säteilyn määrä voidaan minimoida. Selviytymiskyvyn kehitys pohjautuu heikon havaittavuuden lisäksi hyvin vaurioita kestäviin ja sietäviin rakenne- ja pintamateriaaleihin sekä suurteholaserin käyttöön osana koneen omasuojaa. Miehittämättömän toteutuksen ja hyvän selviytymiskyvyn ansiosta skenaarion ilmataistelukone soveltuu erityisesti vihamielisillä alueilla toteutettaviin korkean riskin tehtäviin.

Ilmataistelukoneen muotoratkaisussa koneen sivuperäsimet ja korkeusvakaajat ovat poistettu, ja suihkuvirtauksen suuntausta käytetään koneen primäärisessä ohjauksessa. Ratkaisu parantaa koneen häiveominaisuuksia sekä pienentää rakenteen painoa ja vastusta. Toisaalta vauksominaisuuksien heikkeneminen vaikuttaa negatiivisesti koneen liikehtimiskykyyn WVR-ilmataistelussa, jossa suoritetaan suuren kuormituskertoimen ja kohtauskulman kolmiulotteista liikehdintää. Kaartotaistelun mukaisen liikehtimiskyvyn tarvetta vähentää laserin kyky vaikuttaa myös takasektoriin ilman rajoitteita vastustajan liikesuunnasta tai minimietäisyydestä. Lisäksi todennäköisyyttä joutua lähitaistelutilanteisiin voi pitää pienenä.

Hyvin vaurioita sietävät komposiittimateriaalit sekä itsekorjautuvat materiaalit nostavat ilmataistelukoneen mahdollisuuksia selviytyä takaisin kotitukikohtaan, vaikka se olisi joutunut asevaikutuksen kohteeksi. Materiaalit hidastavat vaurioiden laajentumista asevaikutuksen jälkeen ja kykenevät korjaamaan rakenteisiin syntyneitä halkeamia. Itsekorjautuvat materiaalien kyky rikkoutuneiden komponenttien korjautumiseen tai suurempien vaurioiden korjaamiseen on kuitenkin rajoittunut.

#### 4.3.3 Kehityssuunta 3 – Monitoimikone, jonka tehtäväkentässä ilmataistelun suhteellinen rooli on pienentynyt

Kehityssuunta 3 muodostuu skenaariosta, jossa ilmataistelukoneen monitoimikyvyn kehittäminen toimii keskeisenä ajurina ilmataistelukoneen kehitystyössä. Ilmataistelun vaatima suorituskyky tulee säilymään, ja vastailmatoiminta on edelleen yksi ilmataistelukoneen päärooleista. Ilmataistelun suhteellinen rooli ilmataistelukoneen tehtäväkentässä tulee kuitenkin pienemään. Kehitys monitoimikyvyn lisääntymisestä on ollut nähtävissä jo kolmannesta hävittäjä sukupolvesta alkaen, ja usealla neljännen sukupolven hävittäjistä monitoimikyky oli jo yksi tärkeimmistä suunnittelulähtökohdista. Viidennen sukupolven hävittäjien monitoimikyky käsittää monipuolisten ilmasta ilmaan ja ilmasta maahan -suorituskykyjen lisäksi rajoitetusti myös tiedustelun ja elektronisen sodankäynnin tehtäviä. Teknologisen kehityksen perusteella monitoimikyvyn kehitys jatkuu myös tulevan kahdenkymmenen vuoden aikana.

Ilmataistelukoneen hyötykuorman kapasiteetin kasvu, sensorien ja antennien integroiminen koneen rakenteisiin, sensoreiden ja tehokkaiden prosessorien koon pieneneminen sekä osittainen luopuminen korkeasta liikehtimiskyvystä mahdollistavat ilmataistelukoneen varustamisen entistä tehokkaammilla ja monipuolisemmilla sensori- ja elektronisen sodankäynnin järjes-

telmillä. Tämä puolestaan mahdollistaa ilmataistelukoneen suorituskyvyn ja käytettävyyden nostamisen ISR- sekä elektronisen sodankäynnin tehtävissä. Suurteholaserin integroiminen ilmataistelukoneeseen laajentaa ilmataistelukoneen kapasiteettia iskeä useampia pintakohteita vastaan yhden lentosuorituksen aikana. Kuudennen sukupolven ilmataistelukoneeseen integroitavan suurteholaserin ulostuloteho on arviolta satojen kilowattien luokkaa, mikä rajoittaa sen tehokasta käyttöetäisyyttä ja potentiaalisia kohteita. Toisaalta laser mahdollistaa asevaikutuksen tarkan kohdentamisen ja välittymisen valonnopeudella kohteeseen. Koska sen toiminta ei perustu räjähdewaikutukseen, ovat sen sivullisille aiheuttamat vahingot vähäisiä.

#### 4.3.4 Yhteenveto ilmataistelukoneen kehityssuunnista vuoteen 2035 mennessä

Teknologisen kehityksen perusteella ilmataistelukoneen keskeiset kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä ovat selviytymiskyvyn kasvu, kustannustehokkuus, monitoimikyvyn kehittyminen sekä suorituskyvyn ja käytettävyyden nostaminen nykyisiä osajärjestelmiä kehittämällä. Lisääntyneen prosessointitehon mahdollistama automaatiotason nousu vaikuttaa useimpien ilmataistelukoneen osajärjestelmien kehitykseen. Tärkeimmät selviytymiskyvyn kehittymiseen vaikuttavat tekijät ovat havaittavuuden pieneneminen, materiaalien kehittyminen sekä omasuojan parantuminen. Kustannustehokkuus on seurausta COTS-tuotteiden lisääntyvästä käytöstä ilmataistelukoneen osajärjestelmissä sekä arvioidun kehityksen mahdollistamasta elinkaarikustannusten laskusta. Monitoimikyvyn kehittyminen on puolestaan jatkumoa jo aikaisemmissa ilmataistelukonesukupolvissa alkaneelle kehityssuunnalle. Kehitykseen vaikuttavat erityisesti tutkan suorituskyvyn ja monikäyttöisyyden lisääntyminen sekä suurteholaserin integroiminen ilmataistelukoneeseen.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

### 5.1 Johtopäätökset ilmataistelukoneen kehityksestä

Teknologinen kehitys tulee jatkumaan kaikilla tutkimuksessa määritetyillä ilmataistelukoneen kokonaisratkaisuun vaikuttavilla osa-alueilla. Uusien innovaatioiden osalta kehityksen nopeutta ja mahdollisen käyttöönoton ajankohtaa on haastava arvioida, koska teknologisen kehityksen lisäksi niihin tulevat vaikuttamaan voimakkaasta muun muassa suurvaltojen poliittinen ja sotilaallinen tahtotila sekä käytettävissä olevat resurssit. Seuraavien vuosikymmenien aikana tapahtuvan kehityksen suuntaviivoista pystyy kuitenkin esittämään suhteellisen luotettavia arvioita.

Eri teknologiaosa-alueilla tapahtuva kehitys osoittaa, että ilmataistelukoneen käytettävyyttä, kustannustehokkuutta ja suorituskykyä on mahdollista nostaa seuraavien vuosikymmenien aikana merkittävästi myös ilman uusia läpimurtoteknologioita. Tämän mahdollistavat ilmataistelukoneen osajärjestelmien kehitys, osajärjestelmien kehittyneempi keskinäistoiminta sekä ilmataistelukoneen syvempi integroituminen ympäröivään järjestelmäkokonaisuuteen. Eri teknologiaosa-alueiden merkittäviä yhteisiä ajureita ovat kustannustehokkuus ja kestävyys sekä kaupallisten tuotteiden ja ratkaisujen laajempi hyödyntäminen osana sotilasjärjestelmiä.

Ilmataistelukoneessa käytettävän sotilasteknologian kehitys tulee aiempaa riippuvaisemmaksi yleisestä teknologian kehityksestä sekä kaupallisista sovelluksista. Tutkimuksessa tehdyssä kartoituksessa tämä oli havaittavissa lähes jokaisen teknologian osa-alueen kohdalla. Kehitys on seurausta erityisesti lisääntyneistä kustannuspaineista, sillä kaupallisten sovellusten laajempi hyödyntäminen laskee tutkimus-, kehitys- ja valmistuskustannuksia. Kaupallisten sovellusten käyttäminen lisäksi nopeuttaa kehitys- ja tuotantoprosesseja sekä parantaa ilmataistelukoneen järjestelmien päivittämismahdollisuuksia ilmataistelukoneen elinkaaren aikana.

Miehittämättömän ilma-alusteknologian käyttöönottoaminen on kuudennen sukupolven ilmataistelukoneen merkittävin kehitysaskel viidenteen sukupolven verrattuna. Se mahdollistaa ilmataistelukoneen suorituskyvyn nostamisen painonsäästön sekä ihmisen fysiologisten rajoitusten poistumisen myötä. Miehittämätön toteutus mahdollistaa myös tehtävien riskitason nostamisen sekä ilmataistelukoneen elinkaarikustannusten laskun. Osa miehittämättömän ilmataistelukoneen käytettävyyteen ja autonomiaan liittyvistä haasteista on ratkaistavissa vasta vuoden 2035 jälkeisenä aikana. Seuraavan sukupolven miehittämätön ilmataistelukone on



todennäköisemmin erittäin automaattinen kuin täysin autonominen järjestelmä, ja haastavimpien tehtäväkokonaisuuksien toteuttaminen perustuu etäohjaukseen. Ihmisen rooli erityisesti päätöksentekijänä tulee säilymään merkittävänä seuraavina vuosikymmeninä.

Ilmataistelukoneen osajärjestelmien kehitystyö ei näytä hidastuvan lähitulevaisuudessa, ja muun muassa Yhdysvalloissa siihen kohdennetaan edelleen mittavia resursseja. Tämän perusteella ei ole odotettavissa, että ilmataistelukoneen suorituskykyä pyrittäisiin laajamittaisesti korvaamaan muilla järjestelmillä seuraavien vuosikymmenten aikana. Ilmataistelukoneen suorituskykyyn ja käyttömahdollisuuksiin liittyvät vaatimukset ovat kuitenkin kasvaneet yhdessä kustannuspaineiden kanssa, mihin monitoimikyvyn kehittäminen on ollut yhtenä vastauksena jo usean ilmataistelukonesukupolven ajan. Monitoimikyvyn laajeneminen tulee myös seuraavan sukupolven osalta lisäämään ilmataistelukoneen tuottamaa suorituskykyä suhteessa kustannuksiin ja vähentämään siten painetta ilmataistelukoneiden korvaamiseen muilla järjestelmillä. Toisaalta lisääntyneen monitoimikyvyn voi odottaa pienentävän lavettien kokonaisuusmäärää erityisesti niiden asevoimien osalta, joissa on käytössä useita eri rooleihin suunniteltuja konetyyppejä.

## 5.2 Tutkimusmenetelmä vs. tutkimuskysymykset

Tutkimus on luonteeltaan kartoittava ja tulevaisuuteen sijoittuva. Siinä käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat kartoittava tutkimus ja skenaariotutkimus sekä näitä tukeva kirjallisuusselvitys. Tutkimuksen pääongelmana oli selvittää, mitkä ovat ilmataistelukoneen merkittävimmät kehityssuunnat vuoteen 2035 mennessä teknologisen kehityksen perusteella. Tutkimusongelman asettelussa ilmataistelukoneen tulevaisuuden kehityksessä on selkeästi määritettävissä alkutilanne, joka kuvaa tämän hetken kehittyneimmät ilmataistelukoneet, viides hävittäjäskupolvi. Lopputilannetta kuvaa puolestaan arvio kuudennen sukupolven ilmataistelukoneesta, joka koostuu niistä uusista tai jatkokehitetystä teknologioista, jotka olisivat integroitavissa ilmataistelukoneeseen vuonna 2035. Skenaariomenetelmä soveltui hyvin tutkimustehtävän suorittamiseen. Se mahdollisti kehitysskenaarioiden muodostamisen niin, että ilmataistelukoneen arvioitu kehitys voidaan esittää johdonmukaisina ja perusteltuihin lopputilanteeseen päättyvinä kehityskulkuina.

Tulevaisuuden tutkimuksen yhtenä ominaispiirteenä on se, että arvioiden tarkkuus ja luotettavuus heikkenevät sitä enemmän, mitä kauemmaksi tulevaisuuteen arvio sijoittuu. Tässä tutkimuksessa skenaariomenetelmän eduksi osoittautui sen mahdollistama vapaus käsitellä laa-

jasti erilaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat ilmataistelukoneen kehityksen suuntiin. Tällöin kehityssuuntien arvioinnissa kyettiin ottamaan myös huomioon eri teknologiaosa-alueilla tapahtuvan kehityksen yhteisvaikutus lopputilanteisiin. Mikäli tulevan kehityksen arviointi olisi puolestaan sidottu yksittäisiin suoritusarvoa mittaaviin parametreihin, ja lopputilanteen arvio olisi sen pohjalta toteutettu esimerkiksi matemaattiseen analyysiin perustuen, rajoittuisi arvio kuudennen sukupolven ilmataistelukoneesta jo olemassa oleviin ominaisuuksiin. Lisäksi kahden vuosikymmenen päähän esitetyt numeeriset arviot olisivat luotettavuudeltaan kyseenalaisia.

Skenaariomenetelmän käyttöä ei ole laajasti sovellettu yksittäisten teknisten järjestelmien tai järjestelmäkokonaisuuksien kehityksen tutkimiseen. Menetelmää on käytetty pääosin laajempien kokonaisuuksien tutkimisessa ja hahmottamisessa, jolloin skenaarioilla pyritään esimerkiksi selventämään yhteiskunnallisten, taloudellisten, poliittisten ja sotilaallisten tekijöiden vuorovaikutusta. Lisäksi se on usein yksi apuväline muiden joukossa tulevaisuuden kehitystä arvioitaessa. Tapaa, jolla skenaariomenetelmää sovellettiin tässä tutkimuksessa, ei sellaiseenaan löydy tutkimuksen lähteinä käytetyistä menetelmäkirjallisuudesta. Siten myöskään konkreettisia esimerkkejä ilmataistelukoneen kaltaisen järjestelmäkokonaisuuden kehityksen tutkimiseen skenaariomenetelmän avulla ei ollut saatavilla. Lähdekirjallisuus tarjosi kuitenkin kattavasti yleispäteviä tulevaisuuden tutkimisen keinoja, joilla skenaarioiden muodostaminen ja erittely voitiin toteuttaa.

### 5.3 Tulosten merkitys ja luotettavuus

Teknologinen kehitys on keskeinen osa sodankäynnin ja sotilasjärjestelmien kehitystä. Tämä tekee teknologisen kehityksen tutkimisesta perusteltua niin yksittäisten teknologioiden kuin järjestelmäkokonaisuuksienkin osalta. Tutkimus antaa laaja-alaisesti tietoa yleisesti aselavettien ja erityisesti sotilasilma-aluksissa käytettävien teknologioiden kehityksestä. Arviot teknologian osa-alueiden sekä ilmataistelukoneen keskeisistä kehityssuunnista tuovat esiin ilmataistelukoneen käyttöperiaatteisiin ja tehtäviin liittyviä mahdollisuuksia. Toisaalta ne myös auttavat hahmottamaan kehityksen aiheuttamia potentiaalisia uhkakuvia sekä varautumaan niihin. Tutkimuksessa esitettävät arviot eivät perustu todellisiin järjestelmiin tai kehityshankkeisiin, joten ne eivät suoraan ole käyttökelpoisia esimerkiksi uhka-arvioita muodostettaessa. Sen sijaan tutkimus antaa tietoa suurista kehitystrendeistä sekä auttaa teknologiseen kehitykseen liittyvien tutkimustarpeiden tunnistamisessa.

Tarkastelun keskittyminen tulevaisuuden arviointiin vaikuttaa keskeisesti tutkimustulosten luotettavuuteen. Mitä pidemmällä aikajänteellä arvioita esitetään, sitä enemmän tulosten luotettavuus laskee, tai vaihtoehtoisesti tarkkuus heikkenee. Tutkimuksessa tulosten luotettavuutta pyrittiin parantamaan hyväksymällä arvioiden heikompi tarkkuus. Tutkimuksessa arvioitiin muun muassa sitä, milloin eri teknologiset ratkaisut olisi mahdollista ottaa käyttöön ilmataistelukoneessa. Mikäli riittävän luotettavien vuosilukuperusteisten arvioiden esittäminen ei ollut mahdollista, pyrittiin tutkimuksessa ensisijaisesti arvioimaan ratkaisun käytettävyyden tilaa vuonna 2035. Tällä pyrittiin pienentämään riskiä tehdä päätelmiä, jotka pohjautuvat perusteetoman tarkkoihin arvioihin. Arvioiden tarkkuutta olisi ollut mahdollista parantaa tarkastelemalla teknologiaosa-alueiden sisältämien pienempien osakokonaisuuksien kehitystä. Käsiteltävien teknologiaosa-alueiden määrä suhteutettuna tutkimustyön laajuuteen ei kuitenkaan mahdollistanut toteutettua syvempää tarkastelua.

Tutkimuksessa käytetty lähdemateriaali painottuu länsimaiseen, ja erityisesti Yhdysvalloissa tehtävään, kehitystyöhön. Syinä tähän ovat englanninkielisten lähteiden suosiminen kansainvälisten lähteiden osalta sekä julkisesti saatavilla olevan tiedon keskittyminen länsimaissa käynnissä oleviin tutkimus- ja kehityshankkeisiin. Muutoinkin tutkimuksessa tehtävä kartointus perustuu julkaistuun materiaaliin, jolloin osa käynnistä olevasta kehitystyöstä jää luonnollisesti käsittelemättä. Nämä tekijät yhdessä aiheuttavat sen, että kartoituksessa saattaa esiintyä puutteita, jotka vaikuttavat myös tutkimuksen tuloksiin ja tehtyihin johtopäätöksiin.

Osa lähdemateriaalissa esiintyvistä informaatiosta perustuu asiantuntijoiden esittämiin arviointeihin teknologian kehityksestä. Tällöin yksittäisen henkilön omat intressit tai puutteellinen tietämys voivat heikentää arvion luotettavuutta. Ongelmaa pyrittiin tutkimuksessa vähentämään vertaamalla useissa eri lähteissä esiintyvää informaatiota keskenään. Yksi merkittävä tulosten luotettavuuteen vaikuttava tekijä on myös se, kuinka hyvin ilmataistelukoneen kehitystä voidaan arvioida eri teknologian osa-alueiden kehityksen perusteella. Aiemmat ilmataistelukoneiden kehitysprojektit osoittavat, että kehitettyä teknologiaa on pyritty hyvin aktiivisesti hyödyntämään aselaveteissa. Tämä puolestaan osoittaa, että teknologinen kehitys ilmataistelukoneen osajärjestelmissä hyödynnettävässä teknologiassa korreloi suhteellisen hyvin ilmataistelukoneen kehitystä.

## 5.4 Miten tutkimusta voisi jatkaa?

Tutkimuksen arvio ilmataistelukoneen kehityksestä pohjautuu vahvasti teknologian kehitykseen. Teknologisen kehityksen lisäksi sotilasjärjestelmien kehitykseen vaikuttavat merkittävästi sodankäynnin kehittyminen operatiivisella ja strategisella tasolla sekä muut välillisesti vaikuttavat tekijät, kuten talous, politiikka, yleinen mielipideympäristö ja eettiset tekijät. Tässä tutkimuksessa sivutaan edellä mainittuja tekijöitä, mutta niiden vaikutuksia ilmataistelukoneen kehitykseen ei analysoida tarkemmin. Nämä vaikuttimet tarjoavat ainakin kaksi mielenkiintoista tutkimuksen lähtökohtaa. Toinen on se, kuinka sodankäynnissä tapahtuvat muutokset vaikuttavat muita ilma-aluksia vastaan suunnatun ilmataistelukoneen merkitykseen. Tarkastelemalla eri suorituskykyjen tarpeellisuutta tulevaisuuden sodankäynnissä kyetään arvioimaan sitä, mihin suuntaan ilmataistelukoneen rooli ja sitä kautta kehitys tulisi menemään tulevina vuosikymmeninä. Toisena tutkimuslähtökohtana voisi olla talouden, poliittisen ympäristön, ympäristötekijöiden, eettisten kysymysten tai näiden yhdistelmien vaikutus ilmataistelukoneen tai yleisemmin sotilasjärjestelmien kehitykseen.

Tutkimuksessa käsitellään useita ilmataistelukoneen rakenteeseen ja järjestelmiin vaikuttavia teknologian osa-alueita. Tarkastelualan laajuudesta johtuen tutkimus antaa hyvän yleiskuvan ilmataistelukoneen kehityksestä tulevina vuosikymmeninä. Kehitystrendien lisäksi tutkimus antaa tietoa siitä, millaisia uusia suorituskykyjä kuudennen sukupolven ilmataistelukone voisi sisältää. Toisaalta aiheen laajuus ei mahdollista yksittäisten osa-alueiden käsittelyä siinä tarkkuudessa, kuin se olisi mahdollista. Tämä avaa Puolustusvoimissa tarpeen jatkotutkimukselle koskien eri teknologiaosa-alueiden kehitystä sekä kehityksen tuomien vaikutusten tarkempaa analysointia. Tässä tutkimuksessa tarkasteltu teknologinen kehitys on ajankohtaista myös ilma-alusteknologian ulkopuolella ja koskettaa niin maalla kuin vedessä operoivien laivettien kehitysnäkymiä. Miehittämättömän sotakoneteknologian lisäksi muun muassa uudet teknologiat, kuten suunnatun energian aseet, älykkäiden materiaalien lisääntyvä käyttö sekä laajemmalla sähkömagneettisen spektrin alueella käytettävät häivetekniikat, tarjoavat mielenkiintoisia ja ajankohtaisia tutkimuksen aiheita.

## LÄHTEET

- [1] *AFRL's Invent Program Tackles Aircraft System Efficiency*. Aviation Week & Space Technology. Posted 5.11.2012. [Online – Viitattu 5.4.2016]. Saatavilla www-muodossa: <http://aviationweek.com/awin/afrl-s-invent-program-tackles-aircraft-system-efficiency>.
- [2] *Air Force plans to develop revolutionary engine*. Air Force Research Laboratory Public Affairs. Posted 11.4.2007. [Online – Viitattu 7.12.2015]. Saatavilla www-muodossa: <http://www.wpafb.af.mil/news/story.asp?id=123048376>.
- [3] *Autonomic healing of polymer composite*. Nature. Verkoversio julkaisusta Nature 409, 15.2.2001. [Online – Viitattu 31.3.2016]. Saatavilla www-muodossa: <http://www.nature.com/nature/journal/v409/n6822/full/409794a0.html#B1>.
- [4] *Combat Aircraft Projects & Designs*. Pakistan Defence. [Online – Viitattu 12.1.2016]. Saatavilla www-muodossa: <http://defence.pk/threads/combat-aircraft-projects-designs-index-in-2nd-post.75408/page-49>.
- [5] DARPA. *Advanced Airborne Networking Capabilities Sought for Hostile Environments*. [Online – Viitattu 13.1.2016]. Saatavilla www-muodossa: <http://www.darpa.mil/news-events/2015-10-14>.
- [6] *Digitaalinen taistelulentä – informaatioajan sotakoneen tekniikka*, 3. painos. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. Julkaisusarja 1, 2013.
- [7] *F-22 receives FOC status at Langley*. Posted 12.12.2007. [Online – Viitattu 1.9.2015]. Saatavilla www-muodossa: <http://www.acc.af.mil/news/story.asp?id=123079128>.
- [8] Fein, Geoff. *DARPA effort to alter future AESA radar use*. International Defence Review. Posted 15.9.2014. [Online – Viitattu 5.4.2016]. Saatavilla www-muodossa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1722173>.
- [9] *Five generations of jet fighter aircraft*. Air Power Development Centre. Verkojulkaisu 1/2012. [Online – Viitattu 11.1.2016]. Saatavilla www-muodossa: <http://airpower.airforce.gov.au/publications/Details/475/170-Five-Generations-of-Jet-Fighter-Aircraft.aspx>.
- [10] Foster, R. *China's latest stealth fighter takes to the air*. Jane's Defence Weekly. Posted 31.10.2012. [Online – Viitattu 11.12.2015]. Saatavilla www-muodossa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1527801>.

- [11] Georghiou, L – Cassingena Harper, J – Keenan, M – Miles, I – Poper, R. *The handbook of technology foresight, Concept and Practice*, 2008.
- [12] Gertler, J. *U.S. Unmanned Aerial Systems*, 2012. [Online – Viitattu 10.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R42136.pdf](http://www.fas.org/sgp/crs/natsec/R42136.pdf).
- [13] Harrington, C. *Boeing unveils concepts for sixth-generation fighter*. Jane's Defence Weekly. Posted 14.5.2010. [Online – Viitattu 18.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1183599](https://janes.ihs.com/Janes/Display/1183599).
- [14] Harrington, C. *USAF contemplates unmanned jet option*. Jane's Defence Weekly. Posted 23.10.2007. [Online – Viitattu 10.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1157381](https://janes.ihs.com/Janes/Display/1157381).
- [15] He, X – Karagozian, A.R. *Pulse-Detonation-Engine Simulations with Alternative Geometries and Reaction Kinetics*. Journal of Propulsion and Power, Vol.22, NO.4, July-August 2006. [Online – Viitattu 10.0.2015]. Saatavilla [www-muodossa: http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.17847](http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.17847).
- [16] Hecht, J. *Ray Guns Get Real*. Posted 30.6.2009. IEEE Spectrum. Posted 30.6.2009. [Online – Viitattu 17.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/ray-guns-get-real](http://spectrum.ieee.org/semiconductors/optoelectronics/ray-guns-get-real).
- [17] *High Energy Liquid Laser Area Defense System (HELLADS) Programme*. Airforce Technology. [Online – Viitattu 17.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: http://www.airforce-technology.com/projects/high-energy-liquid-laser-programme/](http://www.airforce-technology.com/projects/high-energy-liquid-laser-programme/).
- [18] Hirsjärvi, S – Remes, P – Sajavaara, P. *Tutki ja kirjoita*. Tammi, 1997. ISBN 951-26-4184-4.
- [19] Hosur, M – Jeelani, S. *Survivability of affordable aircraft composite structures – Volume 1*, 2003. [Online – Viitattu 16.3.2016]. Saatavilla [www-muodossa: http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a421600.pdf](http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a421600.pdf).
- [20] Jennings, G. *DARPA looks to next-gen fighter aircraft*. International Defence Review. Posted 29.4.2013. [Online – Viitattu 9.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1571841](https://janes.ihs.com/Janes/Display/1571841).
- [21] Jennings, G. *Generation game*. Jane's Defence Weekly. Posted 10.6.2011. [Online – Viitattu 10.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1187217](https://janes.ihs.com/Janes/Display/1187217).
- [22] Jennings, G. *USAF issues next-generation fighter request*. Jane's Defence Weekly. Posted 5.11.2010. [Online – Viitattu 18.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1185250](https://janes.ihs.com/Janes/Display/1185250).

- [23] Johnson, R.F. *China's J-20 makes maiden flight*. Jane's Defence Weekly. Posted 11.1.2011. [Online – Viitattu 11.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1185786](http://www.muodossa:https://janes.ihs.com/Janes/Display/1185786).
- [24] Kamppinen, M - Kuusi, O ja Söderlund, S. *Tulevaisuudentutkimus – Perusteet ja sovelluksia*. Helsinki, 2002. ISBN 951-746-389-8.
- [25] Kleinman, Z. *Self-healing aeroplane wings 'to fix tiny cracks'*. BBC News. Posted 8.6.2015. [Online – Viitattu 31.3.2016]. Saatavilla [www-muodossa: http://www.bbc.com/news/technology-33047859](http://www.muodossa:http://www.bbc.com/news/technology-33047859).
- [26] *Kvanttikamera kuvaa nurkan takaa*. Tiede. Julkaistu 7.11.2008. [Online – Viitattu 22.2.2016]. Saatavilla [www-muodossa: http://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/kvanttikamera\\_kuvaa\\_nurkan\\_takaa](http://www.muodossa:http://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/kvanttikamera_kuvaa_nurkan_takaa).
- [27] LaGrone, S. *Lockheed Martin Skunk Works Chief: U.S. Next Generation Fighter Need Stealth*. USNI News. Posted 18.2.2015. [Online – Viitattu 21.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: http://news.usni.org/2015/02/18/lockheed-martin-skunk-works-chief-u-s-next-generation-fighters-need-stealth](http://www.muodossa:http://news.usni.org/2015/02/18/lockheed-martin-skunk-works-chief-u-s-next-generation-fighters-need-stealth).
- [28] Lewis, W. *UCAV – The next generation air-superiority fighter*. School of Advanced Airpower Studies, 2002. [Online – Viitattu 13.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/saas/lewis.pdf](http://www.muodossa:http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/saas/lewis.pdf).
- [29] *Lockheed Martin (645) F-22 Raptor*. Jane's Aircraft Upgrades. Posted 23.2.2016. [Online – Viitattu 5.4.2016]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1712036](http://www.muodossa:https://janes.ihs.com/Janes/Display/1712036).
- [30] *Lockheed Martin F-35 Lightning II*. Jane's All the World's Aircraft. Posted 22.1.2016. [Online – Viitattu 6.4.2016]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1343368](http://www.muodossa:https://janes.ihs.com/Janes/Display/1343368).
- [31] Majumdar, D. *Air Force Seeks Laser Weapons for Next Generation Fighters*. USNI News. Posted 20.11.2013. [Online – Viitattu 12.12.2015]. Saatavilla [ww-muodossa: http://news.usni.org/2013/11/20/air-force-seeks-laser-weapons-next-generation-fighters](http://www.muodossa:http://news.usni.org/2013/11/20/air-force-seeks-laser-weapons-next-generation-fighters).
- [32] Malenic, M. *Pentagon to build new variable-cycle engine for F-35 and other aircraft*. Jane's Defence Weekly. Posted 18.3.2015. [Online – Viitattu 7.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa: https://janes.ihs.com/Janes/Display/1738579](http://www.muodossa:https://janes.ihs.com/Janes/Display/1738579).
- [33] Manter, J – Paul, D. *Airframe structures technology for future systems*. Air Force Research Laboratory, 2009. Saatavilla [www-muodossa: http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a541602.pdf](http://www.muodossa:http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a541602.pdf).

- [34] Mason, W.H. *AOE 4124 Configuration Aerodynamics Chapter 4 – Aircraft Configuration Design Options*. Opetusmateriaali, versio 24.8.2015. [Online – Viitattu 17.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa:) [http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason\\_f/ConfigAeroDesignOpt.pdf](http://www.dept.aoe.vt.edu/~mason/Mason_f/ConfigAeroDesignOpt.pdf).
- [35] Moir, I ja Seadbridge A. *Aircraft Systems - Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration*. Third edition, 2008.
- [36] Morris, J. *Keeping Cool A Big Challenge For JSF Laser, Lockheed Martin Says*. Aerospace Daily. Posted 26.9.2002. [Online – Viitattu 17.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa:) [http://web.archive.org/web/20040604124353/http://www.aviationnow.com/aviationnow/news/channel\\_military.jsp?view=story&id=news/masd0926.xml](http://web.archive.org/web/20040604124353/http://www.aviationnow.com/aviationnow/news/channel_military.jsp?view=story&id=news/masd0926.xml).
- [37] Northrop Grumman. *Joint High Power Solid-State Laser*. [Online – Viitattu 17.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa:) <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/SolidStateHighEnergyLaserSystems/Pages/JointHighPowerSolidStateLaser.aspx>.
- [38] *Northrop Grumman X-47*. Jane's Unmanned Aerial Vehicles and Targets. Posted 23.4.2015. [Online – Viitattu 14.1.2016]. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa:) <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1318245>.
- [39] Passoja, K. *Tilannekuvan muodostaminen seuraavan sukupolven hävittäjässä*. Maanpuolustuskorkeakoulu. Esiupseerikurssi opinnäytetyö, 2011.
- [40] *Pratt & Whitney PW9000*. Jane's Aero-Engines. Posted 27.9.2015. [Online – Viitattu 9.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa:) <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1490857>.
- [41] Puuperä, S. *Miehittämätön taisteluilma-alus UCAV, teknologiakatsaus*. Maanpuolustuskorkeakoulu. Esiupseerikurssin opinnäytetyö, 2009.
- [42] Rekkedal, N. *Nykyaikainen sotataito – sotilaallinen voima murroksessa*. Verkko-versio: Maanpuolustuskorkeakoulu, Helsinki, 2013. ISBN: 951-25-1734-5 (PDF).
- [43] Rogoway, T. *The Airborne Laser May Rise Again But It Will Look Very Different*. Foxtrot Alpha. Posted 18.8.2015. [Online – Viitattu 14.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa:](http://www.muodossa:) <http://foxtrotalpha.jalopnik.com/the-airborne-laser-may-rise-again-but-it-will-look-very-1724892313>.
- [44] Rusanen, K. *F/A-18 C/D-hävittäjän seuraajan vastahäiveteknisiä kyvykkyysvaatimuksia*. Maanpuolustuskorkeakoulu. Esiupseerikurssin opinnäytetyö, 2015.



- [45] *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 1. Teknologinen kehitys.* Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2008.
- [46] *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 2. Puolustusjärjestelmien kehitys.* Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2008.
- [47] *Sukhoi T-50 PAKFA.* Jane's All the World's Aircraft. Posted 11.11.2015. [Online – Viitattu 11.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1344168>.
- [48] *The future of advanced stealth – worth the cost?.* Jane's Defence Weekly. Posted 12.7.2006. [Online – Viitattu 3.1.2016]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1154149>.
- [49] The UAV. [Online – Viitattu 9.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): <http://www.theuav.com/>.
- [50] *This is Northrop Grumman's Idea Of A Sixth-Generation Fighter, But Is It Feasible?* 12.12.2015 [Online – Viitattu 16.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): <http://foxtrotalpha.jalopnik.com/this-is-northrop-grummans-idea-of-a-sixth-generation-fi-1747680825>.
- [51] UAS Components. [Online – Viitattu 10.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): [https://www.uavs.org/index.php?page=uas\\_components](https://www.uavs.org/index.php?page=uas_components).
- [52] *Unmanned aircraft systems (UAS) roadmap 2005 – 2030.* US Department of Defense, Office of the Secretary of Defence, 2005. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): [https://fas.org/irp/program/collect/uav\\_roadmap2005.pdf](https://fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap2005.pdf).
- [53] Warwick, G. *6th Gen Engines – Pratt In, Rolls Out, GE Stays On.* Aviation Week. Posted 18.9.2012. [Online – Viitattu 9.12.2015]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): <http://aviationweek.com/blog/6th-gen-engines-pratt-rolls-out-ge-stays>.
- [54] Wills, Colin. *Unmanned combat air systems in future warfare – Gaining control of the air.* Palgrave Macmillan, 2015. ISBN: 978-1-137-49847-2.
- [55] Yoon, Joe. *Fighter Generations.* [Online - Viitattu 11.1.2016]. Saatavilla [www-muodossa](http://www.muodossa): <http://www.aerospaceweb.org/question/history/q0182.shtml>.

## **LIITTEET**

LIITE 1 Tutkielmassa esiintyvät lyhenteet

## TUTKIELMASSA ESIINTYVÄT LYHENTEET

A/A	Air to Air
ADVENT	Adaptive Versatile Engine Technology
AESA	Active Electronically Scanned Array
AFRL	Air Force Research Laboratory
A/G	Air to Ground
ATC	Arrays on Commercial Timescales
BVR	Beyond Visual Range
C2E	Communication on Contested Environment
CFD	Computational Fluid Dynamics
COIL	Chemical Oxygen Iodine Laser
COTS	Commercial Off-the-Shelf
DARPA	Defence Advanced Research Projects Agency
DoD	Department of Defence
DyNAMO	Dynamic Network Adaptation for Mission Optimization
ECM	Electronic counter measures
ECCM	Electronic Counter-Counter-Measures
EOSS	Electro-Optical Sensor System
EOTS	Electro-Optical Targeting System
ESM	Electronic Support Measures
EW	Electronic Warfare
FATE	Future Aircraft Technology Enhancement
HELLADS	High Energy Liquid Laser Area Defense System
HOTAS	Hands On Throttle-And-Stick
HUD	Head-Up Display
HUMS	Health and Usage Monitoring Systems
IFDL	Intra-Flight Data Link
INVENT	Integrates Vehicle Energy Technology
IRST	Infra-Red Search and Tracking
ISR	Intelligence, Surveillance, Reconnaissance
JHPSSL	Joint High Power Solid-State Laser
JSF	Joint Strike Fighter

J-UCAS	Joint Unmanned Combat Aerial System
LO	Low Observable
MADL	Multi-function Advanced Data Link
MIPS	Million-instructions-per-second
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PDE	Pulse Detonation Engine
RAM	Radar Absorbent Material
RAS	Radar Absorbent Structures
RCS	Radar Cross Section
RWR	Radar Warning Receiver
SA	Situational Awareness
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCRAMJET	Supersonic Air Combustion Ramjet
SMH	Structural Health Monitoring
TRL	Technology Readiness Level
TTNT	Tactical Targeting Network Technology
UAS	Unmanned Aircraft System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCAV	Unmanned Combat Air Vehicle
UCAS	Unmanned Combat Air System
USAF	United States Air Force
VCE	Variable Cycle Engine
WVR	Within Visual Range