



IPv6-protokollan käyttöönoton esteet

Hanna Gröndahl

Haaga-Helia ammattikorkeakoulu

Tradenomi, tietojenkäsittely

Tutkimus

2024

Tiivistelmä

Tekijä(t) Hanna Gröndahl
Tutkinto Tradenomi
Raportin/Opinnäytetyön nimi IPv6-protokollan käyttöönoton esteet
Sivu- ja liitesivumäärä 36 + 6
<p>Opinnäytetyössä tutkittiin IPv6-protokollan käyttöönoton hitaan etenemisen syitä. Tutkimuksen tavoitteena oli ymmärtää kirjallisuuskatsauksen keinoin, mitkä olennaiset tekijät ovat jarruttaneet käyttöönottoa. Lisäksi tutkimuksessa tunnistettiin, mitkä tekijät voisivat edistää käyttöönottoa, ja miltä IPv6-protokollan käyttöönoton tulevaisuus näyttää.</p> <p>IPv6:n käyttöönotto on prosessi, jossa internet-liikenne siirtyy käyttämään IPv6-protokollaa IPv4-protokollan sijasta. Käyttöönotto on tullut yhä ajankohtaisemmaksi viime vuosina internetin päätelaitteiden määrän kasvaessa, sillä neljän miljardin ainutlaatuisen osoitteen muodostama IPv4-verkko ei riitä kattamaan nykyisiä ja tulevia tietoliikenteen tarpeita. IPv4-osoiteavaruuden rajallisuus on tiedetty jo pitkään, ja IPv6-protokolla kehitettiin vastaamaan tähän haasteeseen jo 1990-luvun lopulla. IPv6:n käyttöönotto on ollut kuitenkin hidasta, ja toukokuussa 2024 globaalisti internet-liikenteestä yli puolet käytti edelleen IPv4-protokollaa. Eri IP-protokollat eivät ole keskenään yhteensopivia, ja siksi IPv6:n käyttöönotto vaatii panostuksia esimerkiksi verkkolaitteisiin ja osaamiseen.</p> <p>Tutkimusmenetelmänä opinnäytetyössä oli integroiva kirjallisuuskatsaus, jonka avulla luotiin kokonaisvaltainen käsitys tutkittavasta ilmiöstä. Kirjallisuutta haettiin tutkimusaineistoksi eri tietokannoista eri parametreilla. Lopulliseksi aineistoksi valikoitui kahdeksan eri tutkimusta, jotka edustavat laajasti eri tutkimusmenetelmiä ja -asetelmiä. Aineistosta tunnistettiin neljä pääsyitä IPv6-protokollan käyttöönoton hitaudelle.</p> <p>Taloudelliset syyt nousivat aineistosta kaikista useimmiten esiin. IPv6:n käyttöönotto ei ole tähän mennessä tarjonnut tarpeeksi vahvoja lyhyen aikavälin liiketoiminnallisia hyötyjä. Käyttöönotto on edellyttänyt taloudellisia panostuksia, ja hintaa on pidetty liian suurena. Teknisiä syitä käyttöönoton hitaudelle ovat olleet esimerkiksi IPv6-verkkojen heikko suorituskyky siirtymäteknologioiden aikana ja mahdolliset turvallisuusongelmat. Taloudelliset ja tekniset syyt ovat muodostaneet yhdessä negatiivisen kierteen, ja siten merkittävän esteen IPv6:n käyttöönotolle. Lisäksi tietoon ja osaamisen puutteeseen liittyvät kysymykset ovat nostaneet kynnystä käyttöönottoon organisaatioissa entisestään. Hitaalle käyttöönotolle on ollut myös asenteisiin liittyviä syitä, kuten kokemukset työläydestä ja asian kaukaisuudesta.</p> <p>IPv6:n tulevaisuudennäkymät ovat kaikesta huolimatta lupaavat. Vaikka IPv4 jäisikin osittain elämään esimerkiksi yritysten sisäverkkoihin, IPv6:n merkitys tulee kasvamaan. Erityisesti mobiili- ja esineiden internet-liittymissä IPv6-protokollalla tulee todennäköisesti olemaan lähitulevaisuudessa nykyistä merkittävämpi rooli. Siirtymän nopeudesta on kuitenkin erittäin vaikea esittää arvioita. Suosituksena on, että IPv4-yhteyksiä käyttävät yritykset ja organisaatiot Suomessa ottaisivat selvää oman verkkonsa ja käyttämiensä verkkopalveluiden IPv6-valmiudesta.</p>
Asiasanat TCP/IP, internet, käyttöönotto, tietoliikenneverkot

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Internet-protokollat	3
2.1	Internet-protokollien määrittely ja käyttötarkoitus	3
2.2	IP-osoitteiden merkintätavat	4
2.3	IP-paketin piirteet	6
2.4	Yksityiset ja julkiset IP-osoitteet.....	7
2.5	Osoitteenmuunnos ja reititys	10
3	IPv6:n käyttöönotto.....	12
3.1	Sytä IPv6:n käyttöönotolle	12
3.2	IPv6:n nykyinen käyttöaste.....	13
3.3	Siirtymäajan teknologiat	15
4	Tutkimustehtävä ja -menetelmä.....	18
4.1	Integroiva kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä	18
4.2	Tutkimuksen toteutus	20
4.3	Aineiston esittely	22
5	Tutkimustulokset	23
5.1	Taloudelliset syyt.....	23
5.2	Tekniset syyt	25
5.3	Tiedon ja osaamisen puute	26
5.4	Asenteisiin liittyvät syyt.....	27
5.5	Tulevaisuudennäkymät	28
6	Johtopäätökset ja pohdinta.....	30
6.1	Johtopäätökset.....	30
6.2	Tutkimuksen arviointi ja jatkotutkimuksen aiheita	31
6.3	Oman oppimisen arviointi	32
	Lähteet.....	34
	Liitteet.....	37
	Liite 1. Tehdyt kirjallisuushaut ja seulontaprosessi.	37
	Liite 2. Tutkimusaineistoksi valitut tutkimukset.....	39

1 Johdanto

Jokainen internetissä toimiva päätelaite tarvitsee yksilöllisen IP-osoitteen. IP-osoite mahdollistaa tietoliikenteen lähettämisen, reitittämisen ja vastaanottamisen. IPv4-protokolla kehitettiin jo 1980-luvun alussa tätä tarkoitusta varten, ja erilaisia osoitteita protokollalla voi olla noin neljä miljardia. Internetiin yhteydessä olevien päätelaitteiden määrä on kuitenkin jo ylittänyt uniikkien osoitteiden määrän, minkä vuoksi 1998 julkaistiin uusi IPv6-protokolla. (Panek 2020, Lesson 4.)

IPv6-protokollan tarkoitus oli laajentaa osoiteavaruus käsittämättömään mittaluokkaan ja ratkaista siten globaalin internetin osoitteistamiseen liittyvä ongelma. Tästä huolimatta valtaosa internet-liikenteestä käyttää edelleen IPv4-protokollaa, vaikka vapaita yksilöllisiä osoitteita ei enää ole. IPv4 vaikuttaisi jo ylittäneen elinkaarensa päätepisteen, mutta IPv6 ei ole sitä onnistunut syrjäyttämään. (Panek 2020, Lesson 4; Google IPv6, 2024.)

Tutkin opinnäytetyössäni sitä, miksi IPv6-protokollan laajamittainen käyttöönotto on edennyt niin hitaasti. Kokonaisuudessaan opinnäytetyön aihe liittyy siihen, miten tietoverkot ja internet on järjestetty, ja miten niitä tulevaisuudessa tullaan toteuttamaan. Tutkimukseni on luonteeltaan laadullinen. Tutkimuksen tietoperustana on internet-protokollien vertaileva esittely sekä IPv6:n käyttöönoton luonnehdinta. Luonnehdinnan yhteydessä esittelen tarkemmin IPv6:n erityispiirteitä ja nykytilannetta. Käytän tutkimusmenetelmänäni integroivaa kirjallisuuskatsausta, jonka avulla pyrin saamaan monipuolisen käsityksen siitä, mitä tutkittavasta ilmiöstä tiedetään tällä hetkellä.

Tutkimuksen tavoitteena on tunnistaa syitä sille, miksi IPv6:n käyttöönotto etenee niin hitaasti. Ongelman ajankohtaisuutta korostaa esimerkiksi Amazon Web Servicesin päätös alkaa laskuttaa julkisten IPv4-osoitteiden käytöstä helmikuusta 2024 alkaen (Barr 28.6.2023). Ajantasainen tilannekuva ja käsitys käyttöönoton haasteista antaa eri toimijoille mahdollisuuden punnita oman organisaation valmiuksia muuttuvassa verkossa ja käyttöönoton merkitystä oman organisaationsa kannalta. Esimerkiksi infrastruktuuriuudistuksia suunnitellessa olisi olennaista huomioida verkkolaitteiden tulevaisuudenkestävyys, ja se edellyttää tietoa tietoverkkojen kehityksestä.

Tutkimusongelmani on, mitkä tekijät ovat estäneet IPv6:n käyttöönottoa. Peittomatriisin avulla esittelen tutkimusongelmien suhdetta tietoperustaan ja tuloksiin (Taulukko 1). Lähestyn tutkimusongelmaa tätä seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

- Mitkä tekijät ovat hidastaneet IPv6:n laajamittaista käyttöönottoa?
- Mitkä tekijät parhaiten edesauttavat IPv6:n yleistymistä?
- Miltä IPv6:n käyttöönoton tulevaisuuden näkymät näyttävät?

Taulukko 1. Peittomatriisi

Ongelma	Tietoperusta	Tulokset
Mitkä tekijät ovat hidastaneet IPv6:n laajamittaista käyttöönottoa?	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3.	5.1, 5.2, 5.3, 5.4.
Mitkä tekijät parhaiten edesauttavat IPv6:n yleistymistä?	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 3.1, 3.2, 3.3.	5.1, 5.2, 5.3, 5.4.
Miltä IPv6:n käyttöönoton tulevaisuuden näkymät näyttävät?	2.1., 3.1, 3.2, 3.3.	5.5.

Valitsin aiheen, koska kahden protokollan käyttö rinnakkain on ihmetyttänyt minua opintojeni aikana. IPv4:n heikkoudet IPv6:n vahvuuksiin verrattuna vaikuttavat teoriassa selviltä. Olen kuitenkin työelämässä havainnut, että IPv6-osoitteita ei aina edes tunnisteta IP-osoitteiksi, eikä IPv6:n käyttö yritysverkoissa vaikuta olevan relevantti vaihtoehto. Toisaalta IPv4:n käyttöä jatkaminen erilaisilla korjaustoimenpiteillä ei vaikuta myöskään kestävältä. Jostain syystä IPv6 ei vaikuta kiinnostavan yrityksissä, ja halusin selvittää mistä se johtuu.

2 Internet-protokollat

Esittelen tässä osiossa internet-protokollien (IP) tyypillisiä piirteitä sekä niiden välisiä erityisiä eroavaisuuksia. IPv4- ja IPv6-protokollien toiminnan ymmärrys on keskeistä IPv6:n käyttöönoton haasteiden ymmärtämiseksi. Lisäksi on tarpeellista saada kattava käsitys siitä, miten internet-liikenne on nykyisessä kahden IP-protokollan tilanteessa järjestetty. Tavoitteenani on selventää sitä, mikä on internet-protokollien merkitys internetin toiminnan kannalta, mitä haasteita eri protokollien käyttöön liittyy ja miksi IPv6:n kehitys koettiin tarpeelliseksi.

2.1 Internet-protokollien määrittely ja käyttötarkoitus

IP-protokollat ovat tiedonsiirtoprotokollia, joiden tarkoitus on mahdollistaa tiedonsiirto päätelaitteiden välillä verkosta toiseen. Ne sijoittuvat verkkoliikennettä jäsentävän OSI-protokollamallin kolmanteen tasoon eli verkkokerrokseen (eng. *network layer*). Internet-protokollia käytetään päätelaitteiden osoitteistamiseen sekä yhteyden eheyden varmistamiseen. (Cisco 2022, 5.3.6.)

Erilaiset standardit määrittävät sitä, miten Internet-liikenne järjestetään. Tämä koskee myös IP-protokollia. Internet-standardien vaikutusvaltaisin määrittelijä on Internet Engineering Taskforce (IETF), jonka RFC-asiakirjoissa kuvataan eri standardit kehitysprosessineen (Cisco 2022, 5.2.3). Esimerkiksi IPv4 kuvataan syyskuulle 1981 päivätyssä RFC 791 -dokumentissa (DARPA 1981). IPv6 kuvattiin alun perin joulukuussa 1998 julkaistussa RFC 2460 -dokumentissa (Deering & Hinden 1998), mutta se on korvattu RFC 8200 -dokumentilla heinäkuussa 2017 (Deering & Hinden 2017).

Yksilöllinen IP-osoite on välttämätön, jotta liikenteen reitittäminen Internetissä on mahdollista. Jokaisella Internet-yhteydessä olevalla laitteella, niin palvelimilla, reitittimillä kuin tablettitietokoneillakin, on siten oltava IP-osoite. Osoitteistoa hallitsee Internet Assigned Numbers Authority (IANA). Tällä hetkellä käytössä on kaksi eri IP-protokollaa, varhaisempi IPv4 sekä sen seuraajaksi kehitetty IPv6. (Cisco 2022, 8.1, 8.5.2.)

IP-osoite on pituudeltaan 32 tai 128 bittiä. IPv4-osoitteet ovat pituudeltaan 32 bittiä, eli ne muodostuvat 32 yhden (1) ja nollan (0) sarjasta. Erilaisia IPv4-osoitteita voi taten olla yli 4 miljardia, tarkalleen $4\,294\,967\,296$. 128-bittinen IPv6-osoite on huomattavasti pidempi, ja siten mahdollinen osoitevaraus on myös huomattavasti laajempi. Erilaisia osoitteita voi olla yli 2^{128} kappaletta, eli noin $340\,282\,366\,920\,938\,463\,463\,374\,607\,431\,768\,211\,456$ uniikkia osoitetta. (Cisco 2022, 10.3.2.)

Yksittäiselle käyttäjälle IP-osoitteen käyttö voi olla huomaamatonta, eikä käyttäjä useinkaan tiedä kumpaa protokollaa hän käyttää. Internet-protokollien käyttö on kuitenkin läsnä kaikessa internetin käytössä, ja se määrittää verkon kautta käytettävien palvelujen toimintaa. Esimerkiksi käyttäjän

kirjoittaessa internet-selaimen osoiteriville www.haaga-helia.fi, hän ottaa tosiasiaassa yhteyttä IP-osoitteeseen, jota edustaa DNS-tietueeseen tallennettu osoitetieto. Käyttäjän huomaamatta selain selvittää IP-osoitteen, johon osoiteriville kirjoitettu osoite viittaa. Kohteena oleva IP-osoite voi olla IPv4- tai IPv6-protokollan osoite. (Hughes 2022, luku 1.)

Tavallista käyttäjää selkeämpi merkitys käytetyllä protokollaversiolla on internet-palveluntarjoajille ja internetissä julkaiseville tahoille. IPv4-osoitteiden tarjoaminen käyttäjille tulee jatkuvasti vaikeammaksi, ja jossain vaiheessa osoitteita ei vain pystytä enää tarjoamaan. Julkisia IP-osoitteita eivät tarvitse ainoastaan yksittäiset kuluttajat, vaan myös erilaiset palvelut ja yritykset. (Hughes 2022, luku 4.)

IPv6-pohjainen ”kolmannen sukupolven internet” tulee olemaan hajautetumpi ja demokraattisempi, koska esimerkiksi viestiliikenteen ei tarvitsisi kulkea keskitetyn palvelun kautta, vaan viestintä voi tapahtua suoraan päätelaitteelta päätelaitteelle. IPv6-protokollaan pohjautuvan internetin ominaisuuksia voidaan spekuloida, eikä kaikkia muutoksia voida tietää ennen laajaa IPv6:n käyttöönottoa. (Hughes 2022, luku 1; Graziani 2017, luku 1.)

2.2 IP-osoitteiden merkintätavat

IPv4-osoitteet esitetään piste-desimaali-muodossa, jossa osoite muodostuu neljästä pisteellä erotellusta oktetista eli kahdeksan bittiä pitkästä luvusta. Kymmenkantajärjestelmään muutettuna tämä tarkoittaa lukuja 0–255. Mahdolliset osoitteet ovat välillä 0.0.0.0–255.255.255.255. Kokonaisuudessaan IPv4-osoite on siis 32 bittiä pitkä, ja tällä saadaan 4,3 miljardia erilaista osoitetta. IPv4-osoite voi olla esimerkiksi 192.168.1.1. (Cisco 2022, 10.4.5.)

IPv6-osoitteen esitystapaa määritellään RFC 5952 -dokumentissa. 128-bittinen IPv6-osoite esitetään kaksoispiste-heksadesimaali-muodossa, jossa osoitteen muodostaa kahdeksan kaksoispisteellä erotettua neljän heksadesimaalimerkin ryhmää. Yksittäinen ryhmä on siten pituudeltaan 16 bittiä. Erilaisia osoitteita on yli 340 sekstiljoonaa. IPv6-osoite voi olla esimerkiksi 2001:0db8:85a3:0000:0000:8a2e:0370:7334. Heksadesimaalijärjestelmään kuuluvat kirjainmerkit voidaan kirjoittaa isolla tai pienellä, mutta IPv6-osoitteissa pienten kirjainten käyttöä suositellaan esimerkiksi säännöllisten lausekkeiden ja Unix-perheen käyttöjärjestelmien ominaisuuksien vuoksi. (Kawamura & Kawashima 2010.)

IPv6-osoitteiden ilmaisun tiivistämiseksi on kehitetty sääntöjä, jotka nekin määritellään RFC 5952 -dokumentissa. Sääntöjä tulisi hyödyntää aina kun mahdollista. Ensimmäisenä sääntönä on, että yksittäisen ryhmän alusta voidaan poistaa nollat. Toisena sääntönä yksittäiset nollaryhmät voidaan esittää neljän nollan sijaan yhtenä nollana. Kolmantena sääntönä peräkkäiset kokonaan nolliasta koostuvat ryhmät voidaan korvata kaksoispisteellä. Vaikka peräkkäin olisi useampi kuin kaksi

ryhmää, nämä korvataan vain yhdellä kaksoispisteellä. Tätä sääntöä voidaan hyödyntää yhden osoitteen kohdalla vain pisimmän nollaryhmän kohdalla, koska muuten mahdollisia osoitteita olisi enemmän kuin yksi. Näiden tiivistämissääntöjen ansiosta äskettäin esimerkkinä käytetty osoite voidaan esittää myös muodossa 2001:db8:85a3::8a2e:370:7334. Taulukossa 1 esitetään yhteenvedon eri protokollien mukaisten IP-osoitteiden piirteet ja merkintätavat. (Cisco 2022, 10.4.5.; Kawamura & Kawashima 2010.)

Taulukko 2. IP-osoitteiden piirteet

Proto-kolla	Pituus	Osoiteavaruuden koko	Esitystapa	Esimerkki
IPv4	32 bittiä	Yli neljä miljardia	Piste-desimaali	192.168.1.1
IPv6	128 bittiä	Yli 340 triljoonaa	Kaksoispiste-heksadesimaali	2001:0db8:85a3:0000:0000:8a2e:0370:7334 tai 2001:db8:85a3::8a2e:370:7334

IP-osoitteen yhteydessä voidaan ilmoittaa myös aliverkon peite. Aliverkon peite jakaa IP-osoitteen verkko-osaan ja yksityiseen osaan. Verkko-osa kertoo mihin verkkoon osoite kuuluu, kun taas yksityinen osa on yksittäisen laitteen tunnistamiseksi verkossa. Tieto on oleellinen erityisesti reitittimille, sillä niiden tarkoitus on ensisijaisesti etsiä reittejä verkkojen eikä yksittäisten päätelaitteiden välillä. Aliverkkoihin perustuvaa reititystä kutsutaan luokattomaksi reititykseksi (eng. *classless inter-domain routing*, CIDR). (Panek 2020, Lesson 4.)

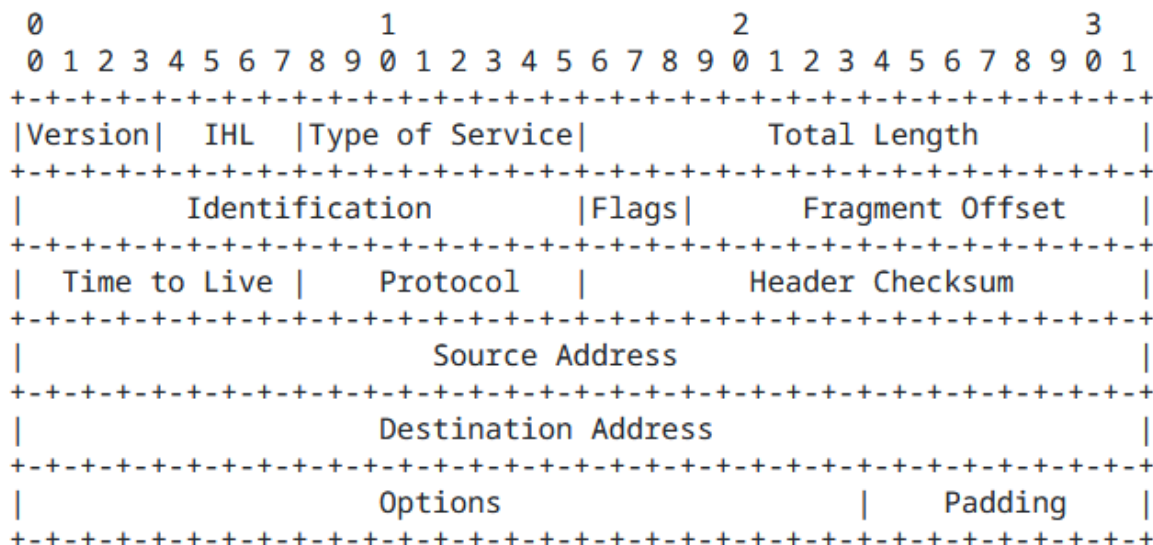
Aliverkon peite voidaan esittää piste-desimaalinotaatiolla tai CIDR-notaatiolla, joka kertoo julkisen verkon koon bitteinä. Esimerkiksi piste-desimaalinotaatiolla 255.255.255.0 tai CIDR-notaatiolla /24 aliverkon peitteenä tarkoittaisi IPv4-osoitteen kohdalla, että sen kolme ensimmäistä oktettia muodostavat osoitteen verkko-osan. Merkintätapaa käytetään myös IPv6-osoitteiden kohdalla osoittamaan globaalia reititettävää osaa. Varsinainen aliverkotus tapahtuu kuitenkin aliverkon ID:llä, joka on 16-bittinen osa keskellä IPv6-osoitetta. (Cisco 2022, 8.3.2.)

Verkossa IP-osoitetta voidaan käyttää ihmiselle helppolukuisemmalla DNS-tietueella. Internet-osoitteiden käyttö on juuri DNS-tietueiden hakemista. IPv4-osoitteiden DNS-tietueet ilmoitetaan DNS-palvelimelle niin sanottuina A-rekordeina, kun taas IPv6-osoitteet yhdistetään AAAA-rekordiin. Jos palvelimella on sekä IPv4- että IPv6-osoite, se tarvitsee molemmat rekordit, jotta niitä voidaan hyödyntää. (Graziani 2017, luku 17.)

2.3 IP-paketin piirteet

Internet-protokollissa ei ole kyse ainoastaan osoitteistamisesta, vaan myös tietoliikenteen välittämisestä. Kun dataa lähetetään verkosta toiseen, se paketoituu IP-paketiksi. IP-paketti muodostuu otsikosta (eng. *header*) sekä datasta. Otsikko sisältää paketin lähde- ja kohdeosoitteen lisäksi muita internetin toiminnan kannalta oleellisia kenttiä. Otsikon tehtävän ymmärtämiseksi sitä voi verrata kirjekuoren käyttöön perinteistä postia lähettäessä ja vastaanottaessa. IPv4- ja IPv6-protokollat eivät muodosta samanlaisia paketteja, vaan protokolla vaikuttaa oleellisesti myös siihen, millaisia otsikkokentän tietoja paketilla on. Erilaisen otsikoinnin vuoksi internet-protokollat eivät ole sellaisenaan keskenään yhteensopivia. (Graziani 2017, luku 3.)

Kuvassa 1 esitetään IPv4-paketin kentät sellaisena kuin se on RFC 791 -dokumentissa. Kentän koko ilmaisee samalla kentän pituutta bitteinä. Paketin ensimmäisenä tietona on versio, joka kertoo IP-protokollan versionumeron, jolla lähetys on paketoitu. Seuraavat kentät antavat tietoa esimerkiksi paketin käsittelyluokasta, kokonaispituudesta, datan protokollasta sekä otsikon tarkistussummasta. Olennaisiin tietoihin kuuluu luonnollisesti myös lähdeosoite ja kohdeosoite.



Kuva 1. IPv4-paketin otsikko (DARPA 1981)

IPv4- ja IPv6-paketit eroavat toisistaan terminologian, koon ja otsikkokenttien perusteella. IPv4-paketin otsikko koostuu 14 pakollisesta kentästä. IPv6-paketin pakollinen otsikko sisältää kahdeksan pakollista kenttää, sillä kaikkia IPv4-pakettien otsikkokenttiä ei siirretty IPv6-protokollaan. IPv6-otsikkoa voidaan kuitenkin laajentaa liitännäiskentillä, joilla saadaan käyttöön esimerkiksi reititykseen liittyviä ja turvallisuutta parantavia ominaisuuksia. Otsikkokenttien nimiä on muutettu, ja esimerkiksi IPv6-paketin Traffic Class ja Hop limit vastaavat IPv4-paketin Type of Serviceä ja Time to Liveä.

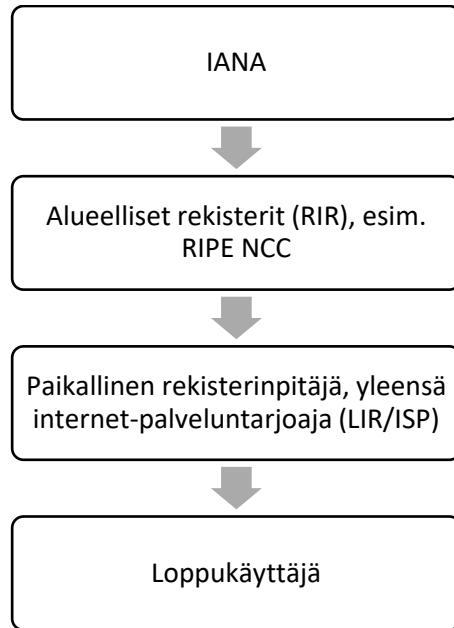
Näistä osoitteista tulevaa liikennettä ei reititetä. Jos reitittimelle tulee pyyntö välittää paketteja yksityisiin osoitteisiin tai yksityisistä osoitteista, paketit hylätään. (Cisco 2022, 8.5.1.)

Myös IPv6-osoitteet jakautuvat yksityisiin ja julkisiin osoitteisiin, mutta niissä käytetään erilaista terminologiaa. Jokaisella IPv6-verkossa toimivalla laitteella on yksityinen link local-osoite. Osoite viittaa yksittäiseen fyysiseen liitäntään, joten yksittäisellä päätelaitteella voi olla useampi link local-osoite. Tätä osoitetta käytetään sisäverkossa, ja sen saadaan yleensä automaattisesti reitittävältä laitteelta. Link local-osoitteet sijoittuvat fe80::/10-alueelle. (Panek 2020, Lesson 4.)

Päätelaitteet saavat julkiset globaalit unicast-osoitteensa tyypillisesti SLAAC-metodilla (*stateless address auto configuration*), DHCPv6:lla tai näiden yhdistelmällä. Reititin saa internet-palveluntarjoajalta osoitealueen, jota se mainostaa omassa verkossaan. Kun päätelaite ottaa yhteyttä reitittimeen, se saa IPv6-osoitemäärittämiseen tarvittavan tiedon ja siten muodostaa itselleen uniikin IPv6-osoitteen. (Cisco 2022, 10.4.3)

Julkisten IP-osoitteiden jako tapahtuu hierarkiassa. Kokonaisuudessaan IP-osoiteavaruudesta vastaa IANA. IANA jakaa osoitealueita edelleen alueellisille rekisterinpitäjille (eng. *regional Internet registries, RIR*). RIRit jakavat osoitteita edelleen alueellaan toimiville internet-palveluntarjoajille. Näiltä IP-osoitteet jaetaan edelleen organisaatioille ja pienemmille internet-palveluntarjoajille. RI-Rien osalta Suomi kuuluu RIPE NCC:n (*Réseaux IP Européens Network Coordination Centre*) piiriin, joka jakaa osoitteita Euroopan, Lähi-Idän ja Keski-Aasian internet-palveluntarjoajille oman politiikkansa mukaisesti. (Cisco 2022, 8.5.2.)

Merkittävimmät IP-osoitteiden jakajat suomalaisille loppukäyttäjille ovat suuret teleoperaattorit Elisa, DNA ja Telia. Omia IP-osoitealueitaan pitää kuitenkin hallussaan lukuisat muut organisaatiot, jotka ovat liittyneet rekisterinpitäjien jäseneksi. IP-osoitteiden jakaminen IANA:ltä loppukäyttäjälle esitetään tiivistetysti taulukossa 2. (Regional Internet Registries Statistics 2024.)



Kuva 3. IP-osoitteiden jakamisen hierarkia IANA:lta loppukäyttäjälle (RIPE 2020)

IANAlla ei ole ollut jaettavanaan IPv4-osoitteita RIReille enää vuosiin, vaan se seuraa toukokuussa 2012 ratifioitua politiikkaansa palautuneiden osoitteiden jakamisessa (ICANN 2012). RIPE NCC kulutti oman IPv4-osoiteavaruutensa loppuun marraskuussa 2019. Kaikki julkiset IPv4-osoitteet ovat siis käytössä. Nykyisenä käytäntönä on, että paikalliset rekisterinpitäjät (eng. *local Internet registry*), joilla ei ole ennestään IP-osoitealokaatiota, voivat ilmoittautua odotuslistalle. Odotuslistalla oleville organisaatioille jaetaan korkeintaan /24-laajuisia alueita sitä mukaan, kun osoitealueita palautuu RIPE NCC:lle. /24-laajunen osoitealue sisältää 256 eri julkista IP-osoitetta. (RIPE NCC 2019.)

Vaikka IPv6-osoiteavaruus on kooltaan suorastaan käsittämätön, sitä hallitaan samassa hierarkiassa. Paikallisille rekisterinpitäjille jaetut osoitealueet ovat laajuudelta lähtökohtaisesti /32–/29. Perustellusta syystä alokaatio voi olla suurempi. Osoitemäärät ovat niin suuria, että loppukäyttäjän saama osoiteavaruus voi sisältää miljardeja osoitteita. Tällä varmistetaan jokaisen IP-osoitteen ainutlaatuisuus, vältetään resurssien tuhlaamista, ylläpidetään internetin topologiaa ja estetään IP-alueiden pirstaloituminen. RIPE NCC nostaa tärkeimmäksi tavoitteeksi juuri pirstaloitumisen estämisen. Jos IPv6-osoitteita jaettaisiin täysin sattumanvaraisesti, luokaton reititys hankaloituisi tai kävisi mielettömäksi. Reititystaulut paisuisivat, sillä osoitteesta ei voisi tunnistaa, mihin verkkoon päätelaite kuuluu. (RIPE NCC 2020.)

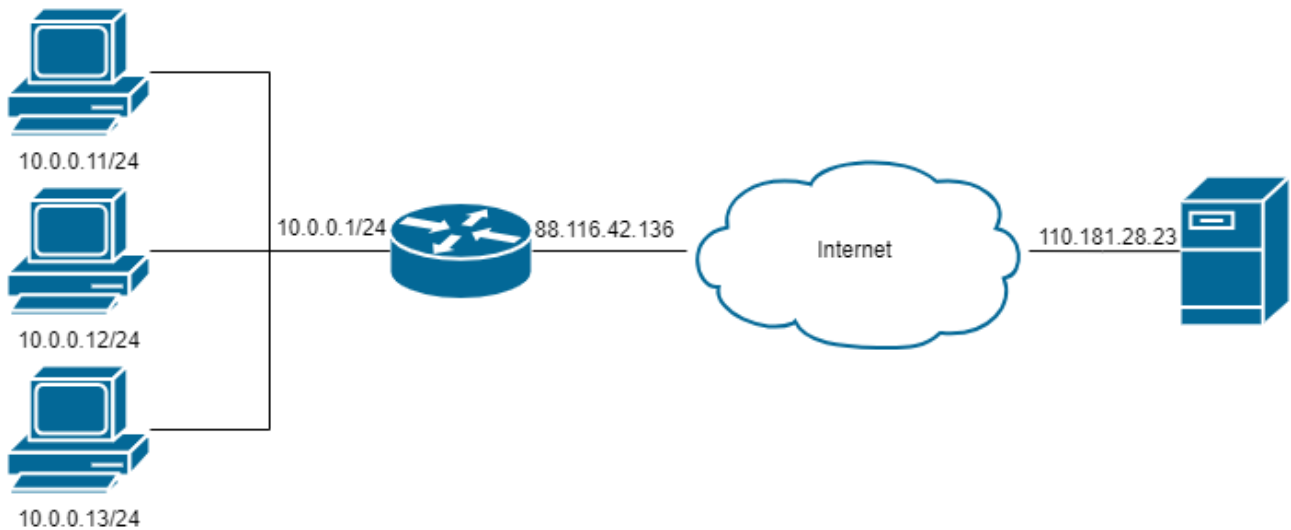
2.5 Osoitteenmuunnos ja reititys

Laitteiden julkiset IPv4-osoitteet eivät ole aidosti uniikkeja, vaan useampi laite jakaa saman osoitteen. Kotikäytössä oleva reititin ei saa sekään uniikkia julkista osoitetta, vaan internet-palveluntarjoaja voi antaa saman osoitteen usealle reitittimelle (Graziani 2017, luku 1). Jakamisen mahdollistaa osoitteenmuutosprotokollat, NAT (eng. *network address translation*) ja sen edistyneempi versio PAT (*port address translation*). IPv4 kehitettiin suoraan päätelaitteiden väliseen kommunikaatioon, mutta osoitevaruuden verrattain pienen koon vuoksi tarvittiin ratkaisu julkisten osoitteiden säästämiseksi. Osoitteenmuunnoksen ansioista yhden julkisen IPv4-osoitteen takana voi olla satoja tai jopa tuhansia laitteita. Tämä hillitsee merkittävästi julkisten osoitteiden tarvetta, ja lisää sisäverkon turvaa rajaamalla suoraa näkyvyyttä sisäverkkoon. (Panek 2020, Lesson 4.)

Tyypillisesti osoitteenmuunnos toteutetaan reunareitittimellä tai palomuurilla. Reitittimellä on sisäverkkoon päin yksityinen IP-osoite ja internetiin päin julkinen IP-osoite. Reititin kommunikoi sisäverkkoon päin yksityisillä osoitteilla, ja kun sisäverkosta halutaan ottaa yhteyttä toiseen verkkoon, lähtevä liikenne saa reitittimen julkisen IP-osoitteen. Vastaavasti ulkoverkosta sisäverkkoon saapuva liikenne lähetetään reitittimen julkiseen osoitteeseen, ja reititin muuttaa NAT-protokollalla osoitteen yksityiseksi ja välittää datan päätelaitteelle. (Panek 2020, Lesson 4.)

PAT on yleinen versio NATista, eikä varsinainen oma protokollansa. Se seuraa IP-osoitteen ohella osoitemuunnoksen yhteydessä TCP/UDP-porttinumeroita. Näitä loogisia porttinumeroita on yli 60 tuhatta. Porttinumeron avulla se tunnistaa liikennettä vastaanottaessaan osoitemuunnetun liikenteen todellisen vastaanottajan. Käsitteitä käytetään yleensä ristiin. (Graziani 2017, luku 1.)

Kuvassa 4 esitetään esimerkki verkosta, jossa kolme päätelaitetta on reitittimen kautta yhteydessä internetiin. Kun laite lähettää IPv4-osoitteesta 10.0.0.11 pyynnön internetissä olevalle palvelimelle, reititin antaa NAT-protokollan avulla paketin lähetysosoitteeksi oman julkisen osoitteensa 88.116.42.136. Samalla se pitää kirjaa yhteyksistä osoitteenmuunnostaulussa, jotta se osaa välittää saapuvan liikenteen oikealle päätelaitteelle. Kun palvelin vastaa pyyntöön, kohdeosoitteeksi tulee julkinen osoite, jonka muutetaan reitittimellä jälleen yksityiseksi osoitteeksi. (Panek 2020, Lesson 4.)



Kuva 4. Esimerkki kolmen päätelaitteen pienestä verkosta 10.0.0.0/24, joka on yhteydessä reitittimen kautta internetiin ja sitä kautta palvelimeen 110.181.28.23 (mukaillen Cisco 2020, Figure 10-3)

IPv6-osoiteavaruuden valtavan koon vuoksi IPv6-liikenne ei tarvitse osoitteenmuunnosta. IPv6-verkoissa laitteilla on suoraan omat uniikit julkiset osoitteensa. Kommunikoidakseen IPv4-verkossa olevien laitteiden kanssa IPv6-osoitteistetut laitteet hyödyntävät NAT64-protokollaa, joka muuntaa IP-osoitteet ja -paketit protokollasta toiseen. Sen käyttötarkoitus eroaa kuitenkin IPv4:n NATin käytöstä merkittävästi, koska tarvetta yksityisten osoitteiden muuttamiselle ei ole. (Panek 2020, Lektion 4.)

IPv6-protokollan käyttöä on kritisoitu siitä, että liikenne ilman NATia olisi turvatonta, sillä yksittäiset päätelaitteet ovat suoraan yhteydessä verkkoon omalla osoitteellaan. NAT ei ole kuitenkaan rakennettu turvallisuusominaisuudeksi, vaan sen luoma turvallisuuden tunne syntyy yhteyden tilallisuudesta. Osoitteenmuunnoksen tulee muistaa sisäverkon laitteet ja niiden porttinumerot, jolloin se toimii palomuurin tavoin. Tällöin sama turvallisuusvaikutus saadaan IPv6-verkossa oikeilla turvallisuustoimilla, kuten tilallisella palomuurilla. (Graziani 2017, luku 1.)

3 IPv6:n käyttöönotto

Edellisessä luvussa esittelin IPv4- ja IPv6-protokollien keskeisiä piirteitä ja eroavaisuuksia. Tässä luvussa käsittelen sitä, mitä käytännön seurauksia näillä eroavaisuuksilla on. Lisäksi nostan esiin IPv6-protokollalla tavoiteltuja käytännön hyötyjä. Tavoitteenani on kirkastaa syitä IPv6:n kehittämiseen ja käyttöönotolle, jotta siihen liittyvää prosessia voidaan paremmin ymmärtää.

3.1 Syitä IPv6:n käyttöönotolle

IPv6:n käyttöönotto tarkoittaa prosessia, jossa verkkoinfrastruktuuri ja -palvelut siirretään käyttämään IPv6-protokollaa. Keskeisiä toimijoita käyttöönotossa ovat internetin katto-organisaatiot, kuten IEEE ja IANA, jotka vastaavat esimerkiksi osoitealueiden jaosta ja standardien määrittämisestä sekä internet-palveluntarjoajat, jotka jakavat osoitteita edelleen loppukäyttäjille. Oma roolinsa on myös käyttäjillä, eli yrityksillä ja yksittäisillä kuluttajilla. (Graziani 2017, luku 1.)

IPv4-protokolla kehitettiin radikaalisti nykyaikaisesta internetistä eroavaan toimintaympäristöön. Tiedonsiirtonopeudet ja liikkuvan datan määrä ovat kasvaneet muutamassa vuosikymmenessä lukemiin, jotka eivät olleet millään tavalla realistisia 1980-luvulla. Päätelaitteiden määrä oli korkeintaan tuhansia. Osoitealueita jaettiin avokätisesti yliopistoille ja muille varhaisen internetin toimijoille, sillä niiden ajateltiin riittävän pitkälle tulevaisuuteen. (Hughes 2022, luku 1.)

WWW:n ja internetin myötä 1990-luvun alussa tuli kuitenkin pian selväksi, että osoitteet eivät tulisi riittämään. Nykyään yksittäisten internetiin yhteydessä olevien päätelaitteiden määrästä ei ole tarkkaa tietoa, mutta kyse on kymmenistä miljardeista laitteista. Määrä kasvaa jatkuvasti paitsi internetin globaalin saatavuuden parantuessa, myös erilaisten mobiili- ja IoT-laitteiden yleistyessä. Kotitalouksissa internet-yhteyttä käyttää yhä useampi elektroniikkalaitte televisioista valvontakameroihin, eikä vain yksi talouden yhteinen tietokone. (Hughes 2022, luku 1.)

Päätelaitteiden määrä ylittää jo nyt IPv4-osoitteiden maksimimäärän, mutta erilaiset siirtymäteknologiat ovat pidentäneet sen elinkaarta. IPv4-osoitteiden ehtymisen ongelma on näennäisesti ratkaistu piilottamalla miljardeja päätelaitteita yksityisten verkkojen takana ja laittamalla ne jakamaan julkiset osoitteet NAT-protokollan avulla. NAT ei kuitenkaan sovellu kaikkeen liikenteeseen, ja saattaa rajoittaa internet-teknologioiden kehittymistä. Tämän lisäksi julkisten osoitteiden tarve ei ole loppunut, vaan niitä edelleen tarvitaan enenevässä määrin. Vaikka ehtymisen aiheuttamia ongelmia on onnistuttu lykkäämään, vapaat IPv4-osoitteet tulevat joka tapauksessa ennen pitkää loppumaan. (Hughes 2022, luku 1.)

IPv6:n käyttöönotto edellyttää merkittäviä panostuksia verkkoinfrastruktuurin kehittämiseen. Koska IPv4- ja IPv6-protokolla eivät ole keskenään yhteensopivia, siirtymä saattaa edellyttää uusien

verkkolaitteiden hankintoja ja järjestelmien uudelleensuunnittelua. Erityisesti kriittisten perinteisten järjestelmien (eng. *legacy system*) muuttaminen toimiviksi ja turvallisiksi IPv6-yhteensopiviksi järjestelmiksi voi vaatia paljon huolellista suunnittelua työtä. (Graziani 2017, luku 1.)

IPv6:n tärkein hyöty on sen massiivinen osoiteavaruus, mutta sen käytännölliset hyödyt eivät rajoitu siihen, että jokainen laite saa uniikin julkisen osoitteen. IPv6-paketti on suorituskykyisempi, turvallisempi ja modulaarisen luonteensa ansiosta sen kehittämistä on helpompi jatkaa. IPv6 tukee päätelaitteiden määrän kasvua, mikä edesauttaa esimerkiksi mobiili- ja IoT-laitteiden jatkuvaa kehitystä. Samoin se tukee yksinkertaisempaa aliverkon ID-tunnuksiin perustuvaa aliverkotusta aiemman aliverkon peitteen laskemisen sijaan. (Graziani 2017, luku 1.)

IPv6:n yksinkertaisempi osoitehallinta voi olla merkittävä hyöty organisaatioille. IPv4-osoitteiden hallinta on merkittävä osa verkkojen suunnittelua, ja IPv6 voi nopeuttaa uusien verkkojen käyttöönottoa. Suuret osoitealueet myös antavat väljyyttä verkkojen suunnitteluun, eikä osoitteiden riittävyyden tulisi muodostua ongelmaksi sisäverkokossakaan. (Graziani 2017, luku 1; luku 17.)

IPv6-protokolla voi parantaa myös internet-yhteyksien suorituskykyä. IPv6-paketit ovat uuden otsikoinnin ansiosta kevyempiä käsitellä. Osoitteenmuunnoksen poistaminen samaten nopeuttavat tiedonsiirtonopeuksia, sillä kokonainen työläs välivaihe poistuu ja reitittäminen yksinkertaistuu. Välivaiheen poistuminen helpottaa myös vianselvitystyötä, kun yhteysongelmia väistämättä kohdataan organisaatioissa. (Graziani 2017, luku 1.)

NATin poistuminen parantaa myös pakettitason turvallisuutta, sillä pakettien kryptografiseen suojaamiseen käytettävä IPsec-protokolla on heikosti yhteensopiva osoitteenmuunnoksen kanssa. Kun osoite muutetaan, paketin sisältö muuttuu. Tällöin IPsec-protokollan tekemä tarkistuslaskenta epäonnistuu paketin saapuessa kohteeseen. IPv6:n osalta IPsecin käyttöä suositellaan käytettäväksi kaikilla verkkolaitteilla, ja se toimii IPv6-protokollalla päästä päähän. (Graziani 2017, luku 1; luku 3.)

3.2 IPv6:n nykyinen käyttöaste

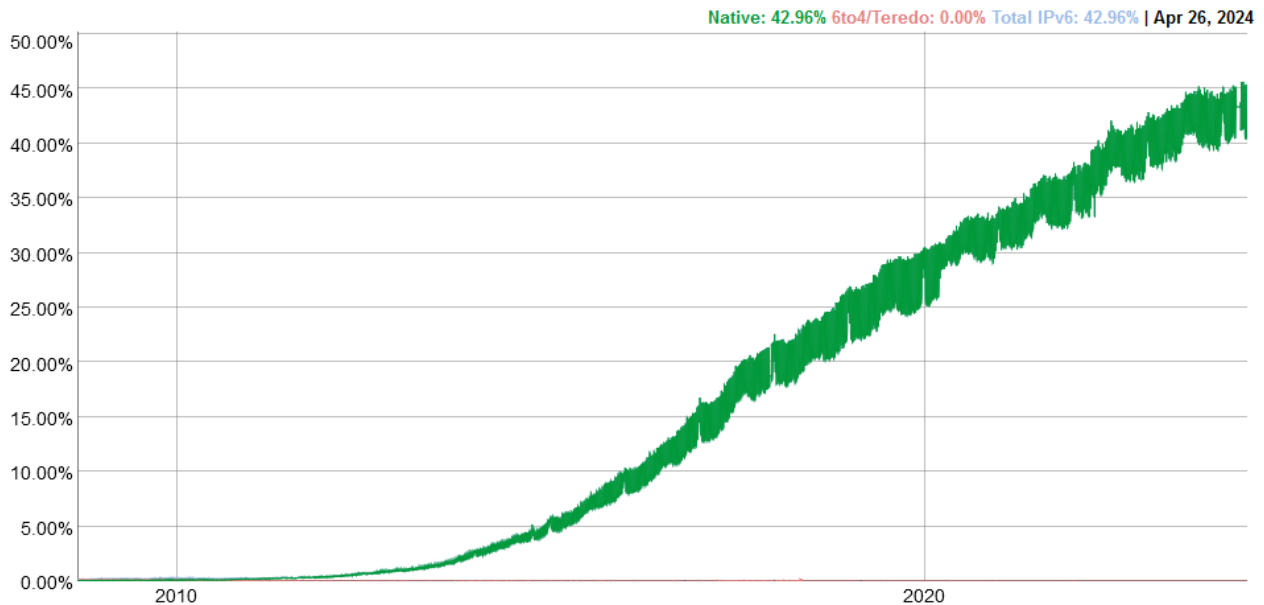
Tällä hetkellä IPv4- ja IPv6-protokollia käytetään rinnakkain, ja IPv6:n käyttöasteesta on erilaisia arvioita. Google julkaisee ajantasaista tilastoa siitä, kuinka moni sen käyttäjistä käyttää sen palveluita natiivisti IPv6-protokollan kautta (Google IPv6, 2024). Tilaston kautta saadaan varsin hyvä kuva globaalista käyttöasteesta. Merkittävin tilaston ulkopuolelle jäävä alue on Manner-Kiina, jossa Googlen palveluiden käyttö on virallisesti estetty (Comparitech 2024).

Googlen tilaston mukaan 26. huhtikuuta 2024 sen käyttäjistä 42,96 % käytti Googlen palveluita IPv6-protokollan kautta. Tasan vuotta aiemmin käyttöaste on 1–2 prosenttiyksikköä pienempi, joten

käyttöön otossa ei ole viimeisen vuoden aikana tapahtunut merkittävää muutosta. Viisi vuotta aiemmin huhtikuussa 2019 IPv6-liikenteen osuus oli noin 25 %, joten tyypillisesti kasvua on vuosittain tullut 3–5 prosenttiyksikköä. (Google IPv6, 2024.)

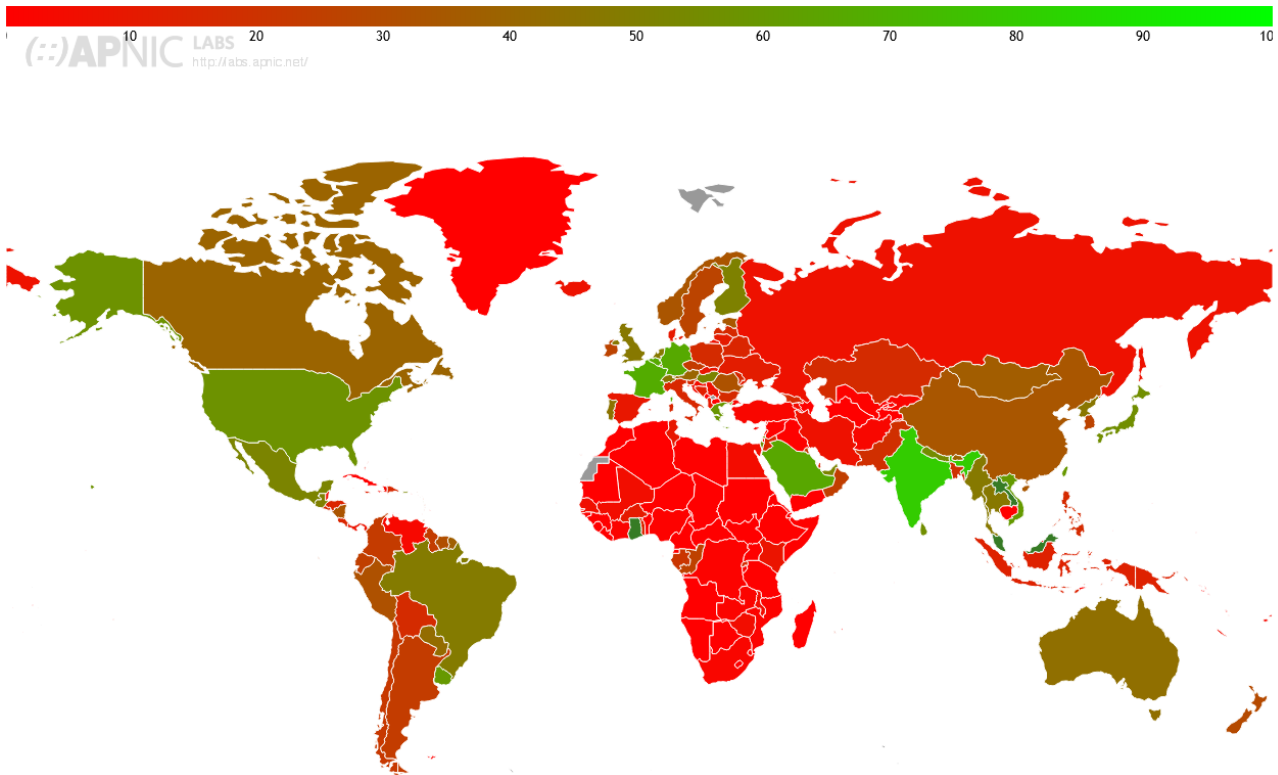
IPv6 Adoption

We are continuously measuring the availability of IPv6 connectivity among Google users. The graph shows the percentage of users that access Google over IPv6.



Kuva 5. Googlen tilasto IPv6-liikenteen yleistymisessä sen palvelussa syyskuusta 2008 huhtikuuhun 2024 (Google IPv6, 2024)

APNICin, eli Aasian ja Tyynenmeren alueen rekisterinpitäjän, 9.4.2024-8.5.2024 ajanjaksolla tehdyn mittauksen mukaan globaalista internet-liikenteestä IPv6-yhteensopivaa on 37 %. Alueelliset erot ovat suuria. Pisimmällä IPv6-yhteensopivuus on Intiassa (79 %), Malesiassa (70 %) ja Ranskassa (68 %). Euroopan keskiarvo on 32 %. Toisin kuin Googlen tilasto, APNICin tilasto sisältää arvion myös Kiinan liikenteestä, joka on tällä hetkellä 34 % IPv6-yhteensopivaa. (APNIC 2024a.)



Kuva 6. Kartta internet-liikenteen IPv6-valmiudesta maittain toukokuussa 2024 (APNIC 2024a)

Suomalaisesta liikenteestä Googlen palveluihin IPv6-käytön aste on 47,14 %, eli hieman globaalin keskiarvon yläpuolella (Google IPv6, 2024). Traficom on antanut suosituksen teleoperaattoreille alkaa tarjota IPv6-yhteys oletusarvoisesti kuluttajaliittymille. Oleellista on kuitenkin, että samat palvelut ovat tarjolla käytetystä protokollasta huolimatta. (Nieminen 2020, 2.)

APNICin tilastojen mukaan suurten Suomessa toimivien teleoperaattoreiden julkisen liikenteen osalta DNA on pisimmällä IPv6:n käyttöönotossa, sillä IPv6-protokollaa käyttää 77 % tutkitusta liikenteestä. Elisa on hieman perässä 71 %:n osuudella. Sen sijaan Teliällä vain 1,5 % liikenteestä on natiivisti IPv6-protokollalla toimivaa. Suomen osalta käyttöönotossa ei siis edetä yhtenä rintamana, vaan teleoperaattorit ovat keskenään eri vaiheissa. (APNIC 2024b.)

3.3 Siirtymäajan teknologiat

IPv6 ei ole suunniteltu taaksepäin yhteensopivaksi IPv4:n kanssa, joten kaikkia verkkoratkaisuja, laitteita ja järjestelmiä ei voi yksinkertaisesti siirtää uuden protokollan piiriin. IPv6:n käyttöönotto on asteittaista, ja se etenee eri tahdissa niin maailmanlaajuisessa kuin kansallisessa mittakaavassa. Siirtymä protokollaversiosta toiseen on edellyttänyt sellaisten teknologioiden kehittämistä ja käyttöä, jotka paitsi pidentävät IPv4:n elinkaarta, myös mahdollistavat verkkoprotokollien välisen liikenteen.

IPv4:n elinkaarta lienee parhaiten pidentänyt aiemmin esitelty NAT-protokolla, joka on muovautunut oleelliseksi osaksi tietoverkkojen välistä liikennettä. Perinteinen NAT ei kuitenkaan yksin riitä, vaan muut teknologiat ovat erikoistuneet toteuttamaan liikennettä IPv4- ja IPv6-verkkojen välillä. Siirtymäteknologiat jakautuvat kolmeen pääkategoriaan, jotka ovat kaksoispinoverkot, tunnelointi ja osoitteenmuunnokset. (Panek 2020, Lesson 4; Hughes 2022, luku 8.)

Kaksoispinoverkot ovat erilaisia ratkaisuja, jotka toimivat natiivisti sekä IPv4- että IPv6-protokollalla. Kaksoispinovalmiita voivat olla niin ohjelmat ja sovellukset kuin verkkolaitteet. Kaksoispinoteknologian toiminnalle keskeistä ovat hybridisokitit, jotka pystyvät käsittelemään molempien protokollien liikennettä. Ne pystyvät myös käsittelemään esimerkiksi DNS-tietueita ilman monimutkaisia osoitteenmuunnoksia. (Panek 2020, Lesson 4.)

Kaksoispinoratkaisut toimivat tyypillisesti IPv6-protokollan sääntöjen mukaan, ja IPv4-osoitteet muunnetaan IPv6-osoitteiksi erityisellä, päällisin puolin minimalistisella tavalla. IPv4-osoite nimittäin liitetään ::ffff /96-verkon osoitteen loppuun. IPv4-osoite säilyttää oman piste-desimaalinotaationsa. Tällöin 192.168.1.1 esitettäisiin muodossa ::ffff:192.168.1.1. (Panek 2020, Lesson 4.)

Kaksoispinoverkko on verrattain raskas infrastruktuuri, koska se edellyttää kahta kokonaista loogista verkkoa. Jokainen pääte- ja verkkolaite tarvitsee osoitteistuksen molempia protokollia varten. Se ei itsessään vähennä IPv4-protokollan käyttöä, vaan sen tärkein rooli on edistää verkon valmiutta IPv6:n yleistymiseen. IPv6:n käyttöönotto tapahtuu parhaassa tapauksessa huomaamatta yhteyksien siirtyessä yksi kerrallaan käyttämään IPv6-protokollaa. (Hughes 2022, luku 8.)

Tunnelointi on teknologia, jolla IPv6-paketteja saadaan siirrettyä IPv4-verkkojen yli. Tunneloinnin keskeisenä ajatuksena on enkapsuloida eli paketoita IP-paketti uudelleen erilaisilla menetelmillä. Enkapsuloinnin avulla paketit pystyvät ylittämään IPv4- tai IPv6-verkkoja. Esimerkiksi 6in4-tunneloinnin keskeisenä ajatuksena on liittää IPv6-paketin otsikon eteen IPv4-otsikko. Tällöin kokonaista IPv6-pakettia käsitellään IPv4-paketin datana. Tunneloinnilla on myös valmius toimia toisin päin IPv4-paketin ylittäessä IPv6-verkon. Tällöin kyseessä on 4in6-tunnelointi. (Hughes 2022, luku 8.)

Tunnelointiprotokollia on useita erilaisia. Windows-ympäristöissä tunnelointi tehdään tavallisesti Teredo-protokollan avulla. Protokollalla määritellään päätelaitteelle virtuaalinen liitäntä, joka mahdollistaa tunneloinnin ja IPv6-laitteen yhteyden IPv4-verkkoon ja sen yli. Protokollan vahvuutena on, että se on yhteensopiva osoitteenmuunnoksen kanssa. (Panek 2020, Lesson 4.)

Tunneloinnin tärkein hyöty on, että se mahdollistaa IPv6-liikenteen IPv4-infrastruktuurissa ennen kuin internet-palveluntarjoajat ovat valmiina tarjoamaan kaikkialla valmiutta IPv6-liikenteelle. Ilman tunnelointia asteittainen käyttöönotto ei olisi mahdollista, vaan käyttöönotossa pitäisi odottaa

kaikkien verkkojen valmiutta, tai vähintään hyvin laajaa IPv6:n omaksumista. Toisaalta tunnelointi tekniikkana ei mitenkään vähennä IPv4:n tarvetta, joten se ei itsessään auta hidastamaan IPv4-osoitteiden ehtymistä. (Hughes 2022, luku 8.)

Viimeisenä siirtymäteknologian menetelmänä on erilaiset osoitteenmuunnokset. NAT64-osoitteenmuunnos mahdollistaa vain IPv6:ta ja IPv4:ä käyttävien verkkojen keskinäisen kommunikoinnin. Sitä käytetään tyypillisesti yhdessä DNS64:n kanssa, joka yhdistää DNS-tietueita eri protokollien IP-osoitteisiin. Kun IPv6-päätelaite lähettää HTTP-pyyynnön IPv4-web-palvelimelle, NAT64 antaa palvelimelle tekaistun IPv6-osoitteen, ja tallentaa sen muistiinsa. Web-palvelimen tapauksessa tekaistu IPv6-osoite tallennettaisiin myös DNS64-palveluun tietueeksi kyseiselle osoitteelle. NAT64-muunnos tapahtuu tyypillisesti IPv6-verkon reunareitittimellä. (Hughes 2022, luku 8.)

4 Tutkimustehtävä ja -menetelmä

Kuten teoriaosuudessa todettiin, siirtymä on edennyt hitaasti eikä protokollien rinnakkaiselo ole täydellinen tilanne. IPv4:n ongelmat ovat olleet tiedossa pitkään, ja IPv6 on julkaistu jo yli 25 vuotta sitten. Tutkimusongelmani on, mitkä tekijät estävät IPv6:n käyttöönottoa. Lähestyn tätä seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

- Mitkä tekijät ovat hidastaneet IPv6:n laajamittaista käyttöönottoa?
- Mitkä tekijät parhaiten edesauttavat IPv6:n yleistymistä?
- Miltä IPv6:n käyttöönoton tulevaisuuden näkymät näyttävät?

Tutkimukseni on luonteeltaan laadullinen, ja hyödynnän siinä menetelmänä integroivaa kirjallisuuskatsausta. Etsin eri tutkimustietokannoista perustelluin parametrein rajattuja tutkimuksia, jotka muodostavat tutkimukseni aineiston. Tässä luvussa esittelen ensin kirjallisuuskatsausta tutkimusmenetelmänä. Sen jälkeen esittelen tutkimusprosessin ja lopuksi itse tutkimusaineiston.

4.1 Integroiva kirjallisuuskatsaus tutkimusmenetelmänä

Kirjallisuuskatsaus on laadullinen menetelmä, jonka tarkoituksena on tunnistaa, mitä tutkimuskohdeesta tiedetään ja mitä ei. Tätä tavoitellaan aiemman tutkimuksen systemaattisella läpikäynnillä ja vertailulla. Kirjallisuuskatsaus ei ole luettelo tehdyistä tutkimuksista, vaan sen tarkoituksena on tavoittaa paras mahdollinen käsitys aiheesta. Kaikkea tutkimusta ei ole mahdollista tavoittaa, mutta menetelmällisellä huolellisuudella voidaan saada mahdollisimman kattava ja tasapuolinen kuva olemassa olevasta tutkimuksesta. (Booth, Sutton & Papaioannou 2016, 11–12, 21.)

Tieteellisenä tutkimuksena kirjallisuuskatsauksen tulee olla toistettavissa ja menetelmällisesti täsmällinen. Tutkimuksen onnistumisen kannalta on siksi olennaista määritellä, kuinka olennainen tutkimusaineisto on tunnistettu, valikoitu ja arvioitu. Tämän jälkeen tulokset analysoidaan ja vedetään yhteen. Tavoitteena on luoda synteesi olemassa olevasta tutkimuksesta. (Booth ym. 2016, 11–13.)

Aiemman tutkimuksen synteessillä voidaan saavuttaa erilaisia hyötyjä useissa eri tutkimusasetelmissä. Kirjallisuuskatsaus antaa mahdollisuuden vertailun kautta saada laajemman kuvan eri teknologioiden tai menetelmien käytöstä eri kohderyhmillä. Se mahdollistaa myös vertailun saman palveluiden erilaisten toteutusten välillä. Lisäksi kirjallisuuskatsaus voi paljastaa mahdollisia eroja tutkijoiden näkemyksissä ja tutkimustuloksissa. (Booth ym. 2016, 11.)

Kirjallisuuskatsaukselle tyypilliset tutkimuskysymykset voidaan jakaa vaikutuksiin, menetelmiin ja käsitteisiin keskittyviin kysymyksiin. Vaikutuksista kiinnostuneet tutkimukset voivat vertailla eri toimenpiteiden tutkittuja vaikutuksia. Menetelmiin keskittyvät tutkimukset lisäävät tietoa siitä, millä tavoin tiettyä aihetta on aiemmin tutkittu. Käsitteisiin painottuva tutkimus pyrkii kuvaamaan ilmiötä

mahdollisimman tarkasti sekä tunnistamaan erilaisia määritelmiä ja teorioita liittyen tutkimuksen aiheeseen. Tässä tutkimuksessa tutkimuskysymykset painottuvat käsitteisiin keskittyvään lähestymistapaan. (Booth ym. 2016, 13.)

Kirjallisuuskatsaukset jaetaan tyypillisesti systemaattisiin ja ei-systemaattisiin (narratiivisiin) tutkimuksiin sekä näiden alatyyppeihin. Systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa aineisto on laaja, suorastaan kaikenkattavuutta tavoitteleva. Sitä analysoidaan numeerisesti ja tilastollisesti. Ei-systemaattiset kirjallisuuskatsaukset ovat aineiston suhteen valikoivampia, ja ne tähtäävät käsitteiden kirkastamiseen ja ilmiön monipuoliseen ymmärtämiseen. On kuitenkin olennaista, että myös ei-systemaattisilla menetelmillä työskennellään systemaattisesti ja metodisen integriteetin säilyttäen. (Booth ym. 2016, 25–27.)

Integroivan kirjallisuuskatsauksen erityispiirteenä on, että se yhdistelee systemaattisen ja narratiivisen tutkimuksen piirteitä. Menetelmänä se mahdollistaa monipuolisen aineiston käsittelyn, sillä se ei aseta täysiveristen systemaattisten menetelmien tavoin tiukkoja vaatimuksia aineistoksi hyväksyttävän tutkimuksen menetelmille tai laajuudelle (Booth ym. 2016, 26). Integroiva kirjallisuuskatsausta käytetäänkin silloin, kun tutkittavasta ilmiöstä halutaan luoda mahdollisimman monipuolinen kuva (Salminen 2011, 8).

Tutkimusprosessi tässä integroivassa kirjallisuuskatsauksessa seuraa systemaattisen kirjallisuuskatsauksen seitsemää askelta, joka alkaa tutkimuskysymysten laatimisella ja aineistohaun suunnittelulla. Tämän jälkeen edetään varsinaiseen hakuun ja seulontaan. Sitten valitaan varsinainen aineisto, käydään se läpi ja luodaan synteesi. Lopulta prosessi viimeistellään kirjalliseen muotoon seuraten tutkimuksen aikana tehtyä dokumentaatiota. (Greetham 2021, 12.)

Kirjallisuuskatsauksen onnistumiseksi on olennaista löytää paitsi oikeat tietokannat, myös oikeat hakusanat. Hakusanojen on noustava tutkimuskysymyksistä, jotta aineisto mahdollistaa tutkimuskysymyksiin vastaamiseen. On suositeltavaa käyttää tarkkoja, tutkimuskohteelle luonteenomaisia teknisiä termejä, sillä liian yleisluontoiset hakusanat tuottavat liikaa tuloksia, jolloin oleellinen tutkimus voi jäädä havaitsematta. Tämän tutkimuksen kohdalla tulee siis kyseeseen käyttää haussa esimerkiksi sanaa ”ipv6” ennemmin kuin esimerkiksi ”ip-osoite”. Haun onnistumiseksi on syytä käyttää hakuoperaattoreita, jotta haku rajautuu oikein. Jokerimerkkiä suositellaan käytettäväksi erilaisten yhdistelmien, kirjoitusasujen ja taivutusmuotojen sisällyttämiseksi hakutulokseen. (Greetham 2021, 70–71.)

Haussa aineiston oleellisuuden ohella on tärkeää kiinnittää huomiota myös sen luotettavuuteen. Lähtökohtaisesti tieteellisiä tietokantoja käyttäessä lähteiden luotettavuuteen voidaan suhtautua optimistisesti, mutta kirjoittajaan, hänen edustamaansa instituutioon ja julkaisuun on silti

kiinnitettävä huomiota. Kirjallisuuskatsauksissa on suositeltavaa käyttää aineistona vertaisarvioituja tutkimuksia, koska ne ovat todennäköisesti luotettavia ja tehty tieteellisin menetelmin. (Greetham 2021, 71–74.)

4.2 Tutkimuksen toteutus

Kirjallisuuskatsauksen tutkimusongelma nousi omasta havainnostani, jossa pohdin ristiriitaa siitä, miten IPv6-protokollaa kohdellaan tietoverkkojen parissa sivupolkuna, vaikka siitä samalla puhutaan osana tulevaisuuden tietoverkkojen paradigmaa ja ratkaisuna IPv4-osoitteiden hupenemiselle. Varsinaiset tutkimuskysymykset muotoilin saadakseni vastauksen tutkimusongelmaani eri näkökulmista. Aineistohaun suunnittelun aloitin valitsemalla avainkäsitteet ja hakusanat, jotka nousevat tutkimuskysymyksistä.

Avainkäsitteistä ”ipv6” oli pakollinen kaikissa hauissa. Käyttöönoton englanninkielisistä vastineista sisällytin hakuihin sekä ”deployment” että ”adoption”, sillä molemmat sanat olivat esiintyneet tietoperustan lähteissä. Sisällyttämällä hakuun sanan ”exhaustion”, hakutulokset liittyisivät todennäköisemmin IPv4-protokollan väistymiseen eikä vain yksittäisten sovellutusten käyttöönottoon, joihin IPv6 liittyy välineellisesti. Suomenkieliset haut ovat luonteeltaan väljiä. Pidin todennäköisenä, että suomenkielistä tutkimusta ei ole tehty paljon, jolloin liian tarkat haut saattaisivat piilottaa oleellisia hakutuloksia. Haussa hyödynnettiin AND ja OR hakuoperaattoreita tulosten monipuolistamiseksi ja täsmentämiseksi.

Taulukko 3. Käytetyt hakusanat ja kohdetietokannat

Hakusana	Tietokanta
ipv6 AND deployment OR ipv6 AND adoption	Google Scholar, EBSCOhost, IEEE Xplore Finna
ipv6 AND deployment AND exhaustion OR ipv6 AND adoption AND exhaustion	Google Scholar, EBSCOhost, IEEE Xplore Finna
ipv6 AND käyttöönöt*	Google Scholar, Finna

Hakuja tehtiin Finna-kirjastotietokannan, EBSCO-artikkelitietokantaan, IEEE Xplore-tietokantaan ja Google Scholar-hakupalveluun. Rajauksena käytetään julkaisuvuosina 2019–2024. Englanninkieliset haut tehdään kaikkiin tietokantoihin, suomenkieliset vain Finnaan ja Google Scholariin.

Ennen varsinaista hakua on suunniteltava myös seulonnan kriteerit. Seulonnassa hyödynnetään sisäänottokriteerejä. Laatomalla kriteerit pystyn rajaamaan ja valitsemaan hakutuloksista

tutkimuskysymysten kannalta oleelliset tutkimukset (Booth ym. 2016, 84–86). Hakutuloksia seulo-
taan kriteeri kerrallaan käsiteltävän potentiaalisen aineiston määrän vähentyessä joka askeleella
(Booth ym. 2016, 143–144). Lopullisena aineistona on 6–10 sopivaa tutkimusta.

Integroiva kirjallisuuskatsaus mahdollistaa aineiston ”poimimisen”, jossa erityisen kiinnostavaa ai-
neistoa voidaan valita analysoitavaksi, vaikka se ei täyttäisi jokaista sisäänottokriteeriä. Todennä-
köisimmin joustoa tapahtuisi luotettavuuden ja kielen kohdalla. Luotettavuudesta tinkiminen tulisi
kyseeseen, että sen olisi julkaissut arvovaltainen taho (esimerkiksi IEEE, IANA), mutta tutkimus ei
ole käynyt läpi vertaisarviointiprosessia. Kielestä voin joustaa, koska kielitaitoni ei rajoitu suomeen
ja englanttiin. Kriteerit on kuitenkin sisällytetty hakusanojen kielen ja rajauksen välttämättömyyden
vuoksi.

Sisäänottokriteereinä käytin seuraavia piirteitä:

- Aika: tutkimus on julkaistu vuosina 2019–2024.
- Kieli: tutkimus on julkaistu suomen tai englannin kielellä.
- Kokotekstin saatavuus: koko tutkimus on saatavilla siedettävällä vaivalla.
- Luotettavuus: tutkimuksen on julkaissut luotettava taho, ja se on mielellään vertaisarvioitu.
- Otsikon sopivuus: tutkimus käsittelee otsikon perusteella IPv6-protokollan käyttöönoton esteitä,
edellytyksiä ja/tai tulevaisuutta.
- Abstraktin sopivuus: tutkimus käsittelee edellä mainittuja aiheita oleellisesta ja tutkimuskysy-
mysten kannalta kiinnostavasta näkökulmasta abstraktin perusteella.
- Kokotekstin sopivuus: tutkimus käsittelee edellä mainittuja aiheita oleellisesta ja tutkimuskysy-
mysten kannalta kiinnostavasta näkökulmasta kokotekstin perusteella.

Haku ja seulonta dokumentoitiin taulukoimalla hakutulokset ja seulonnan vaiheet (liite 1). Eri tieto-
kannat antoivat hyvin erilaisia tuloksia. Selvästi eniten tuloksia löytyi Google Scholarin kautta. Esi-
merkiksi haku ”ipv6 AND deployment OR ipv6 AND adoption” vuosilta 2019–2024 tuotti 16 000 ha-
kutulosta. Valitsin käydä hakutuloksista otsikkotasolla läpi 250 ensimmäistä. Google Scholarin
kautta löytyi suurin osa valituista artikkeleista, yhteensä kuusi. Pidempi haku ”ipv6 AND deplo-
yment AND exhaustion OR ipv6 AND adoption AND exhaustion” tuotti rajatumman aineiston noin 2
000 tuloksella, mutta uutta aineistoa sen avulla en löytänyt. Oleelliset tulokset olin löytänyt jo en-
siksi mainitulla haulla.

EBSCOhost ja IEEE Xplore tuottivat vähemmän tuloksia, ja niiden kaikki tulokset kävin kokonaan
otsikkotasolla läpi. Molemmista tietokannoista valikoitui ”ipv6 AND deployment OR ipv6 AND adop-
tion” haun perusteella yksi artikkeli. IEEE Xploresta valittu tutkimus oli konferenssipaperi, mutta va-
litsin sen mukaan kiinnostavan näkökulmansa vuoksi. Suomenkieliset hakutulokset olivat opinnäy-
tetöitä ja ei-tieteellisiä artikkeleita. Niitä ei valittu mukaan lopulliseen aineistoon.

Valittu tutkimusaineisto pelkistettiin taulukoimalla (liite 2). Pelkistettyä aineistoa käsiteltiin luokittelemalla tutkimusten keskeisiä löydöksiä, ja aineiston luokittelua käytettiin apuna synteessin laatimisessa. Pelkistämisen- ja synteessivaiheiden tulokset on tarkemmin esitelty luvussa 5. Lopullinen synteesi esitellään johtopäätöksissä luvussa 6.

4.3 Aineiston esittely

Merkittävin seulonta tapahtui jo otsikkotasolla, sillä valtava osa erityisesti englanninkielisistä tutkimuksista käsitteli erilaisia IPv6-sovellutuksia ja -teknologioita ja niiden käyttöönottoa. Ne eivät käsitelleet verkkotasolla tapahtuvaa laajamittaista IPv6-käyttöönottoa, joka on tämän tutkimuksen kohde. Hakutulosten määrän rajaus hakusanojen kautta osoittautui hyvin vaikeaksi. Erityisiä käsitteitä tai käsitteyhdistelmiä, jotka erottaisivat laajamittaisen käyttöönoton, ei löytynyt. Tämän vuoksi epäoleellisten hakutulosten määrä oli erityisesti Google Scholarin kautta suuri.

Haun ja seulonnan jälkeen aineistokseni kertyi yhteensä kahdeksan tutkimusartikkelia tai konferenssipaperia. Aineistosta seitsemän on vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita ja yksi konferenssipaperi. Artikkelit edustavat tutkimusta ympäri maailman viimeisen viiden vuoden ajalta. Kaikki tutkimukset ovat englanninkielisiä. Aineistossa on edustettuna monipuolisesti eri kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia menetelmiä, ja ne kaikki antavat näkökulmia tämän opinnäytetyön tutkimusongelmaan. Aineisto on koottu taulukoituna liitteeseen 2.

Pickardin, Angolian ja Drummondin (2019) tutkimus käsitteli tapoja tarkastella IPv6:n käyttöönoton mittausta sekä määrällisesti että laadullisesti. Vaikka tutkimus ei niinkään kommentoi syitä IPv6:n käytön tasolle, se antaa kiinnostavan näkökulman käyttöönoton seurantaan. Amaechin ja Shinyuyn (2021) sekä Bhuiyanin, Ahasan Ullahin, Hasan Khanin, Morshedin ja Islamin (2023) tutkimukset vertailivat globaalin käyttöönoton esteiden syitä yksittäisten maiden tilanteisiin ja syihin. Hamarsheh, Abdalaziz ja Nashwan (2021) sekä Shah, Bhat ja Khan (2019) tekivät ei-systemaattiset kirjallisuuskatsaukset IPv6-siirtymän haasteisiin ja nykytilaan. Kolmessa artikkelissa tarkasteltiin IPv6:n käyttöönottoa tutkimusalojensa näkökulmista. Kuerbis ja Mueller (2020) hyödynsivät sosiologia- ja taloustieteellisiä menetelmiä tunnistaessaan taloudellisia tekijöitä, jotka vaikuttavan IPv6:n käyttöönottoon. Setiawan (2023) tarkasteli käyttöönottoa palvelumuotoilun ongelmana. Syamsuar, Dell, Witarsyah ja Luthfi (2022) hyödynsivät organisaatiotutkimuksen menetelmiä, ja arvioi tutkimuksessaan organisatorisen vastustuksen vaikutusta IPv6:n käyttöönotossa.

5 Tutkimustulokset

Kaiken kaikkiaan kahdeksan artikkelin aineistosta nousi 25 erillistä perustelua IPv6:n käyttöönoton viivästymiselle. Yhdistelemällä luokkia tunnistin neljä pääluokkaa, joiden alle sain sijoitettua kaikki perustelut (Taulukko 4). Määrällisesti merkittävin perustelu oli taloudelliset syyt, jotka mainittiin lähes kaikki artikkeleissa. Erilaiset IPv6-protokollan toimintaan liittyvät tekniset syyt mainittiin viidessä artikkelissa. Tiedon ja osaamisen puute liitettiin käyttöönoton hitaaseen edistymiseen neljässä artikkelissa. Asenteisiin liittyvät syyt, kuten yksilöiden motivoituminen ja kiinnostus IPv6-protokollaa kohtaan, näkyi perusteluna kolmessa artikkelissa.

Taulukko 4. Pääluokkien esiintyvyys aineistossa

Pääluokka	Esiintyvyys eri artikkeleissa
Taloudelliset syyt	7
Tekniset syyt	6
Tiedon ja osaamisen puute	4
Asenteisiin liittyvät syyt	3

Esittelen seuraavaksi tarkemmin eri perusteluita kuhunkin pääluokkaan liittyen. Lopuksi erittelen vielä artikkeleissa nousseita näkemyksiä siitä, miltä IPv6-protokollaan tulevaisuus näyttää. Tämän jälkeen muodostan synteesisä johtopäätökset, joissa vastaan tutkimuskysymyksiin.

5.1 Taloudelliset syyt

Taloudellisiin syihin kytkeytyviä tekijöitä nousi esiin seitsemässä tutkimuksessa kahdeksasta. Erilaiset taloudelliset syyt ovat siten keskeisimpiä esteitä IPv6:n käyttöönotolle. Taloudelliset vaikutukset koskevat ennen kaikkea organisaatioita ja internet-palveluntarjoajia, mutta luonnollisesti kustannusten kasvulla on merkitystä myös loppukäyttäjälle. Taloudellisiin kysymyksiin liittyy myös sosiaalisia ulottuvuuksia esimerkiksi kestävä kehityksen kannalta. Vaikka rahalla on ratkaiseva rooli IPv6:n käyttöönotossa ympäri maailmaa, perustelut vaihtelevat esimerkiksi eri maiden taloudellisen tilanteen mukaan.

Kuerbis ja Mueller tutkivat taloudellista päätöksentekoa IPv6:n käyttöönottoon liittyen. He kiteyttävät kaksoispinoratkaisujen ongelmaksi sen, että ne ovat kalliita ottaa käyttöön, mutta ne eivät tuo erityisiä hyötyjä. IPv4- ja IPv6-verkkojen rinnakkaiselo aiheuttaa ylimääräisiä operatiivisia kustannuksia. Internet-palveluntarjoajien tekemät kaksoispinoratkaisut eivät myöskään edellytä muita toimijoita tekemään vastaavia ratkaisuja. Aikaisella käyttöönotolla ei vaikuta olevan mitään erityisiä

hyötyjä verrattuna myöhäisiin omaksujiin, ja siksi taloudellisesta näkökulmasta aikainen käyttöönotto ei ole järkevää. (Kuerbis & Mueller 2020, 8–9.)

Kustannusten vaikutus käyttöönottoon osoitetaan tilastollisella analyysillä. Tutkimuksessa havaitaan, että IPv6:n käyttöasteella ja maan bruttokansantuotteella on vahva yhteys. Mitä korkeampi BKT valtiolla on, sitä enemmän siellä on IPv6-liikennettä. Koska IPv6:n välittämistä hyödyistä ei ole selkeää näyttöä, varakkaissa maissa toimivat internet-palveluntarjoajat ovat valmiimpia ottamaan riskin sijoittaa IPv6-infrastruktuuriin. (Kuerbis & Mueller 2020, 21–22.)

IPv6:n käyttöönoton kannalta keskeinen taloudelliseen päätöksentekoon vaikuttava tekijä on IPv4-osoitteiden kysyntä ja tarjonta. Niin kauan kuin IPv4-osoitteita on tarjolla siedettävään hintaan, IPv6:n käyttöönotolle ei ole merkittäviä taloudellisia perusteita. IPv4-osoitteiden niukkuus ei ole toistaiseksi juurikaan siirtynyt kuluttajahintoihin. Kasvavilla markkinoilla IPv4-osoitteille on kuitenkin enemmän kysyntää, ja siten niiden piirissä voi ensimmäisenä löytyä taloudellisia perusteita siirtyä IPv6-verkkoihin. Esimerkiksi Yhdysvalloissa internet-yhteyttä tarvitsevien mobiililaitteiden määrän valtava kasvu 2010-luvulla on saanut internet-palveluntarjoajat siirtämään erityisesti mobiililiittymiä IPv6-verkkoon. (Kuerbis & Mueller 2020, 23–26.)

Varakkaissa maissa taloudelliset syyt kytkeytyvät pitkälti kannattavuuteen ja taloudelliseen järkevyyteen. Syamsuarin ja muiden (2022, 2464) tekemissä haastatteluissa nousi esiin, etteivät kaikki asiantuntijat yksinkertaisesti näe IPv6:ssa tällä hetkellä liiketoimintamahdollisuuksia. Artikkeleissa käsitellään kuitenkin myös kehittyvien maiden haasteita, joiden näkökulma käyttöönottoon on erilainen verrattuna esimerkiksi länsimaihin. Käyttöönotto siirtymäteknologioiden avustamanakin edellyttää taloudellisia panostuksia esimerkiksi verkkolaitteisiin ja muuhun infrastruktuuriin sekä ammattilaisten koulutukseen ja osaamisen päivittämiseen. Käyttöönoton tunnetut vaihtoehdot saattavat olla joissakin maissa sietämättömän kalliita, eikä IPv6:n käyttöönotto siten ole realististen vaihtoehtojen rajoissa. (Setiawan 2023, 392–393; Amaechi & Shinyuy 2021, 27–28.)

Bhuiyan ja muut (2023, 1–2) tarkastelivat konferenssipaperissaan IPv6:n käyttöönottoa globaalin näkökulman lisäksi Bangladeshin näkökulmasta, joiden mukaan maalla on vain vähän lyhyen aikavälin taloudellisia intressejä siirtyä IPv6-teknologioiden käyttöön. Bangladesh kuuluu Yhdistyneiden kansakuntien vähiten kehittyneiden maiden (eng. *least developed countries*, LDC) listalle (UN 2023). Maassa ei juuri ole edes saatavilla IPv6-valmiita verkkolaitteita tai ne ovat huonolaatuisia. Lisäksi maa saa IPv4-osoitteita LDC-statuksensa vuoksi toistaiseksi. Maan tulisi silti tavoitella siirtymää, jotta se ei jää vain IPv6:tta tukevien palveluiden ulkopuolella tulevaisuudessa. Tätä voitaisiin tarvittaessa edistää jopa internet-palveluntarjoajia velvoittavalla sääntelyllä. (Bhuiyan ym. 2023, 5)

Erityisesti kehittyvien maiden näkökulmaa esiin nostavissa tutkimuksissa nousee esille, että IPv6:n käyttöönottoa ei tueta valtion taholta poliittisin päätöksin tai taloudellisin tuin. Esimerkiksi Amaechi ja Shinyuy esittivät, että valtiolta tarvitaan investointeja koulutukseen ja tutkimukseen. Kehittyvien maiden yrityksillä ei ole edellytyksiä kantaa kaikkia käyttöönottoon liittyviä riskejä, joten valtion tuella olisi olennaisempi merkitys kuin esimerkiksi Yhdysvalloissa ja Kiinassa. Lisäksi sääntelyn ja tukipolitiikan kautta voidaan ohjata markkinavoimia IPv6:n käyttöönottoon. Valtiot voisivat olla itse ensimmäisinä ottamassa uutta protokollaa käyttöön, jolloin IPv6:sta saadaan paikallista käyttökokemusta ja sen kannattavuudesta saataisiin näyttöä. (Amaechi ja Shinyuy 2021, 28–29.)

5.2 Tekniset syyt

Taloudelliset ja tekniset syyt IPv6:n käyttöönoton etenemisen hitaudessa ovat vahvasti riippuvaisia toisistaan. IPv6-protokolla ei ole enää uutuus, ja se kehittyy jatkuvasti kypsemmäksi ja käyttökelpoisemmaksi teknologiaksi (Graziani 2017, luku 1). IPv6:n teknologinen erinomaisuus verrattuna IPv4:n on sidosryhmien kannalta edelleen teoreettista, eikä kehittyvään protokollaan sitoutuminen ole välttämättä linjassa organisaatioiden tarpeiden ja tavoitteiden kanssa (Amaechi & Shinyuy 2021, 28).

Keskeisin tekninen IPv6:n käyttöönottoa estävä tekijä on taaksepäin yhteensopivuuden puute, mikä voi aiheuttaa IPv6:n siirtyville organisaatioille kustannuksia. Tämä tekijä nostetaan esiin useimmissa tutkimuksissa. IPv6:n käyttöönotto nähdään työläänä, ja ilman välittömiä hyötyjä siihen on vaikea sitoutua. Nämä ongelmat koskevat erityisesti yrityksiä, joilla on jo olemassa olevaa verkkoinfrastruktuuria ja perinteisiä järjestelmiä, jotka on suunniteltu IPv4-verkkoa ajatellen. Luonnollisesti yritykset tarvitsevat myös internet-palveluntarjoajan, jolla on tekniset edellytykset tarjota IPv6-verkkopalveluita. (Shah ym. 2019, 89; Kuerbis & Mueller 2020, 6; Hamarsheh ym. 2021, 339.)

Vaikka siirtymäteknologiat sinänsä mahdollistavat asteittaisen siirtymän, niiden käyttö ei ole missään nimessä yksinkertaista tai tehokasta. Ne vaativat suuria panostuksia niin infrastruktuuriin kuin olemassa olevien järjestelmien mukauttamiseen. Lisäksi ne heikentävät verkon suorituskykyä. Esimerkiksi kaksoispinoratkaisut ovat muisti-intensiivisiä ja tunneloinnissa tapahtuvat pakettien enkapsuloinnit aiheuttavat pullonkauloja tietoliikenteessä. Natiivien IPv6-ratkaisujen lisääntyessä siirtymäteknologioiden aiheuttamat haitat pienenevät, mutta tämä vaatii aikaa. (Shah ym. 2019, 89–90.)

IPv6 on suunniteltu IPv4:ä turvallisemmaksi, sillä siihen on esimerkiksi sisäänrakennettu IPsec-protokolla myös otsikkotasolle. Tästä huolimatta IPv6:n käyttöönottoon liittyy myös turvallisuushuolia, sillä siirtymäteknologioiden hyödyntäminen ei tuo natiivin IPv6:n turvallisuushyötyjä. Väliaikaisratkaisut, joissa IPv4-pohjaiseen verkkoympäristöön suunnitellut perinteiset järjestelmät

muokataan IPv6-yhteensopiviksi, ovat hyvin työläistä, eikä niiden turvallisuudesta voida olla varmoja. (Shah ym. 2019, 90.)

Shahin ja muiden (2019, 89) sekä Pickardin ja muiden (2019, 20–21) mukaan IPv6:n käyttökokeemus on IPv4:ä heikompi. Pickard ja muut tutkivat IPv6-verkkojen suorituskykyä ja käyttäjäkokemusta tekemällä HTTP-kyselyitä erilaisiin kohdeosoitteisiin. DNS-tietueet viittaavat edelleen pitkälti IPv4-osoitteisiin, mikä hidastaa DNS-kyselyitä IPv6-verkosta käsin. Jopa täysin IPv6-natiivit kohdeosoitteet palauttivat useimmiten HTTP-pyyntönsä hitaammin kuin IPv4-protokollalla toimivat kohdeosoitteet. Suorituskykyongelmat oletettavasti pienenevät ja lopulta häviävät IPv6-käyttöönotton edessä, mutta Pickardin ja muiden tehdessä tutkimustaan suorituskykymittarit eivät lainkaan olleet IPv6:n puolella. (Pickard ym. 2019, 20–21.)

5.3 Tiedon ja osaamisen puute

Tiedon ja osaamisen puute liittyen IPv6-protokollaan ja sen käyttöönottoon voi muodostaa merkittävän esteen käyttöönotolle eri organisaatioissa (Setiawan 2023, 385–386). Organisaatiot eivät halua panostaa henkilöstön osaamiseen IPv6:n liittyen, jos niille ei ole selvää, mitä IPv6:n hyödyt ovat. Tiedon puute johtaa erilaisiin haitallisiin uskomuksiin esimerkiksi IPv6:n turvallisuudesta ja käyttöönoton vaikeudesta, minkä seurauksena organisaatioiden on entistä vaikeampi nähdä potentiaalisia hyötyjä, eivätkä ne kiinnostu käyttöönotosta. (Amaechi & Shinyuy 2021, 28.)

Tutkimukset esittävät eri tahoja edistämään tietoisuutta ja vahvistamaan IPv6:n liittyvää osaamista. Amaechi ja Shinyuy (2021, 28) nostivat esiin yleisen insinöörikoulutuksen puutteita, sillä heidän tutkimuksessaan käy ilmi, ettei suurimmalla osalla insinööreistä ja teknikoista ole juuri valmiuksia edistää IPv6:n käyttöönottoa. Ratkaisun avaimet ovat yrityksillä ja valtionhallinnolla, joiden panostukset IPv6:n tuntemisen vahvistamisessa nähdään elintärkeiksi (Amaechi & Shinyuy 2021, 34). Bhuyian ja muut (2023, 5–6) näkevät, että yhteistyö kansainvälisten järjestöjen kanssa voisi mahdollistaa uuden osaamisvajeen kuromisen. Heidän mukaansa järjestöt, kuten APNIC ja Internet Society, voisivat tarjota teknistä tukea ja koulutusta erityisesti kehittyvissä maissa.

Setiawan havaitsi (2023, 391) palvelumuotoilun menetelmiä hyödyntävässä tutkimuksessaan, IPv6:tta pidetään vaikeana ja monimutkaisena protokollana. Hän ehdottaa ratkaisuksi käyttäjälähtöisen opiskelumateriaalin luomista erilaisissa koulutusohjelmissa. Koulutusten järjestäminen olisi päättävien sidosryhmien, kuten yritysten ja internet-operaattoreiden vastuulla. Hän kuitenkin tiedostaa, että koulutuksia on vaikea järjestää, jos järjestävät tahotkaan eivät usko IPv6:n hyötyihin ja mahdollisuuksiin. (Setiawan 2023, 393.)

Myös Shah ja muut nostivat tutkimuksessaan esille tulevat IPv6:n liittyvät koulutustarpeet, ja he ennakoivat IPv6:n käyttöönoton etenemisen tuovan yrityksissä ja organisaatioissa olevan

osaamisvajeen esiin. Koulutus tuo organisaatioiden mahdollisuuden hankkia tarvittavaa osaamista IPv6 käyttöönottoon, ja se vahvistaa organisaatioiden innokkuutta ja valmiutta siirtymään. Koulutuksella ja tiedolla on siten vahva yhteys asenteisiin IPv6:n liittyen. (Shah ym. 2019, 91.)

5.4 Asenteisiin liittyvät syyt

Erilaiset asenteisiin liittyvät syyt aiheutuvat osin tiedon puutteesta, mutta asenteet muodostavat siitä huolimatta oman perustelulinjansa. IPv6:n käyttöönottoa hidastavia asenteita ovat esimerkiksi yleinen muutosvastaisuus ja epäily uusista teknologioita kohtaan, tyytyväisyys nykytilaan sekä ajatukset käyttöönoton ylitsepääsemättömästä vaikeudesta ja siitä, ettei IPv6:n käyttöönotto ole ajankohtaista omalle organisaatiolle. (Bhuiyan ym. 2023, 5; Setiawan 2023, 393; Syamsuar ym. 2022, 2467.)

Syamsuar ja muut soveltavat tutkimuksessaan organisatorisen vastustuksen mallia IPv6:n käyttöönottoon. Organisatoriseen vastustukseen voidaan puuttua vain tunnistamalla ensin vastustuksen taustalla olevat syyt. Vähentämällä vastustusta kasvatetaan organisaatioiden edellytyksiä siirtymään IPv6:n käyttöön. Tutkimuksessa havaittiin, että keskeiset kolme tekijää, jotka aiheuttavat vastustusta ovat ajankohtaisuuden puute, näkemykset uhasta ja ulkopuolisen paineen puute. (Syamsuar ym. 2022, 2462–2463.)

Syamsuarin ja muiden tutkimuksen mukaan IT-alan asiantuntijat Indonesiassa yleisesti tuntevat IPv4:n ongelmat ja IPv6:n toiminnan pääpiirteet. Tästä huolimatta IPv6:n käyttöönotto ei tunnu heistä ajankohtaiselta eikä IPv4-osoiteavaruuden niukkuus kosketa omaa organisaatiota. Tämän lisäksi IPv6:n koetaan uhkaavan organisaation turvallisuutta paitsi NATin poistumisen vuoksi, myös siksi, että sen käyttöönotto olisi niin massiivinen työrupeama. IPv6:n käyttöönotto saattaisi aiheuttaa vakavia häiriöitä liiketoiminnassa. Organisaatiot myös kaipaisivat ulkopuolista painetta ja tukea käyttöönottoon joko muilta organisaatioilta tai hallinnolta ja internet-palveluntarjoajilta. Oma-aloitteeseen aktiivisuuteen IPv6:n käyttöönotossa ei ole yksinkertaisesti mitään kannustimia. Aloitetta siirtymään kaivataan ulkopuolelta. (Syamsuar ym. 2022, 2467.)

Tutkimuksissa havaittiin, että IPv6:n käyttöönottoa pidetään suorastaan ylivoimaiselta tehtävältä. Setiawanin mukaan (2023, 394) IPv6:n ominaisuuksiin liittyy IT-alan ammattilaisten parissa tietynlaista mystiikkaa, johtuen mahdollisesti esimerkiksi pitkistä ja vaikeasti muistettavista osoitteista. Hän esitti, että koulutuksen avulla asiantuntijoille voitaisiin paremmin korostaa IPv6:n etuja, kuten helpompaa aliverkotusta ja osoitteenhallinnan vähenemistä. Tällöin IPv6:n koettua vaikeutta on mahdollista verrata IPv4:n ongelmiin, ja asenne saattaa muuttua suopeammaksi vieraampaa protokollaa kohtaan.

5.5 Tulevaisuudennäkymät

Tutkimukset ennakoivat IPv6:n käytön kasvua. Esimerkiksi Shah ja muut (2019, 94) pitivät IPv6-protokollan käyttöönottoa välttämättömänä IPv4-osoiteavaruuden ehtymisen ja IPv6:n kehittyneempien ominaisuuksien vuoksi. Myös Hamarsheh ja muut (2021, 340) pitivät IPv6:n käyttöönottoa väistämättömänä, ja heidän mukaansa kehitys on ennen kaikkea kiinni internet-palveluntarjoajien valmiuksista.

IPv6:n käyttöönoton lopputuloksesta ja aikataulusta ei ole tällä hetkellä kuitenkaan varmuutta. Pickard ja muut (2019, 16) ennakoivat vuoden 2019 tutkimuksessaan, että IPv6:n globaali käyttöönotto olisi valmis joulukuun 2024 ja kesäkuun 2026 välisenä aikana, jos käyttöönotto noudattaa Rogersin mallia teknisen innovaation omaksumisesta. Rogersin mallissa innovaation omaksujat jakautuvat normaalijakaumalla innovaattoreihin, varhaisiin omaksujiin, varhaiseen enemmistöön, myöhäiseen enemmistöön ja viivyttelijöihin. Kehitys ei ole aivan seurannut tätä vauhtia, mutta se on kuitenkin jatkuvasti edennyt kuten luvussa 3.2 todettiin.

Esteistä huolimatta IPv6:n käyttöönotto nähdään pitkällä aikavälillä tärkeäksi hankkeeksi. IPv4:n osoiteavaruus hupenee jatkuvasti, ja IPv6:n yleistyessä sen hyödyt konkretisoituvat ja yhä useampi organisaatio kiinnostuu sen käyttöönotosta. Käyttöönoton etenemisen mahdollisuuksia nähdään erityisesti mobiili- ja IoT-verkoissa (Kuerbis & Mueller 2020, 37).

Kuerbis ja Mueller esittivät eri skenaarioita IPv6:n käyttöönoton tulevaisuudennäkymistä. Todennäköisimpänä he pitävät jonkinlaista mallia, jossa protokollat jatkavat rinnakkaiseloaan. He pitävät mahdollisena, että IPv6:n käyttöönotto ei välttämättä etene täysin yritysverkkoihin asti. Yhteensopiavuuden toteuttaminen on erittäin työlästä ja kallista liiketoiminnalle kriittisissä perinteisissä järjestelmissä. Lisäksi yritysverkot eivät useinkaan tarvitse enempää osoitteita kuin mitä IPv4-osoiteavaruus mahdollistaa. He pitävät todennäköisimpänä tulevaisuuden skenaariona internetiä, jossa IPv4- ja IPv6-verkot elävät rinnakkain. Kun tavalliset kuluttajat siirtyvät pois IPv4:n käytöstä, osoitteita vapautuu markkinoille yritysmaailman tarpeisiin. (Kuerbis & Mueller 2020, 37.)

Täydellinen käyttöönotto on kuitenkin teoriassa mahdollinen. Kuerbis ja Mueller pohtivat tätä uusien verkkolaitteiden ollessa yhä useammin IPv6-laitteita ja perinteisten järjestelmien poistuessa hiljalleen käytöstä. On mahdollista, että jonain päivänä havahdutaan, että IPv6 on syrjäyttänyt IPv4:n. Tällaiselle hiljaiselle IPv6:n käyttöönotolle olisi kuitenkin annettava vuosikymmeniä aikaa. IPv4 ei poistu yksittäisen päätöksen ansiosta, vaan se edellyttää erillisiä toimenpiteitä eri puolella globaalia verkkoa. Päätöksenteon hajautuneisuuden, globaalin eritahtisuuden, mahdollisten uusien teknologioiden ja stabiilien yritysverkkojen vuoksi Kuerbis ja Mueller eivät pitäneet täydellistä

IPv6:n käyttöönottoa ja IPv4:n syrjäyttämistä kuitenkin todennäköisenä. (Kuerbis & Mueller 2020, 37–38.)

6 Johtopäätökset ja pohdinta

Esittelen tässä luvussa ensin tutkimustulosten pohjalta tekemäni johtopäätökset tutkimuskysymyksiin. Tämän jälkeen arvioin tutkimuksen onnistumista sekä mahdollisia jatkotutkimuksen aiheita. Lopuksi kuvailen ja reflektoin opinnäytetyöprosessiani.

6.1 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mitä esteitä IPv6:n käyttöönotossa on, mitkä tekijät voisivat sitä edistää ja miltä IPv6:n käyttöönoton tulevaisuus näyttää. Pyrin vastaamaan kysymykseen integroivan kirjallisuuskatsauksen avulla. Tutkimuksen perusteella päädyin seuraaviin johtopäätöksiin.

IPv6:n käyttöönottoa hidastaa taloudellisten, teknisten ja asenteellisten syiden sekä osaamisvajeen luoma vyyhti. Taloudelliset ja tekniset syyt muodostavat ”muna vai kana” –ilmiön, jossa taloudellisen päätöksenteon keskeisenä perusteluna on, ettei siirtymä tarjoa riittävää teknistä etua. IPv6:n tekniset hyödyt sen sijaan eivät realisoidu ilman taloudellisia panostuksia. Aiemmassa tutkimuksessa on oletettu, että olisi tietty kriittinen piste, jonka jälkeen IPv6:n leviäisi kiihtyvästi. Tätä pistettä ei ole kuitenkaan tavoitettu, eikä käyttöönotto siten näytä noudattavan tavanomaisia innovaation omaksumisen käyriä.

Olellainen syy on myös käyttöönottoon liittyvien päätösten hajanaisuus. Ei ole olemassa yhtä tahoa, joka päättää IPv4:n siirtymisestä perinneteknologiaksi ja IPv6:n laajamittaisesta käyttöönotosta. Eri organisaatiot ovat riippuvaisia toistensa päätöksistä, eikä esimerkiksi yritys voi ottaa käyttöön IPv6-yhteyksiä, jos palveluntarjoajalla ei ole niitä myydä. Onnistunut käyttöönotto vaatii siten eri organisaatioiden onnistunutta koordinoitua.

Suurilla internet-yrityksillä on myös merkittävää valtaa käyttöönoton edistämisessä. Jos esimerkiksi Googlen palvelut siirrettäisiin vain IPv6-yhteensopiviksi, käyttöönotto voisi saada ripeästi vauhtia. Näin ei kuitenkaan todennäköisesti tapahdu yhtäkkiä, koska Googlen intresseissä ei ole tehdä palveluistaan hankalammin saatavia suurelle osalle käyttäjistään. Kiireettömyyden tuntu kuitenkin lykätä käyttöönottoa, sillä yrityksillä ei ole ulkoista painetta siirtyä IPv6-verkkoon.

Käyttöönottoon liittyy myös kestävään kehitykseen liittyviä ongelmia, jossa IPv6-infrastruktuurille välttämättömiä verkkolaitteita ja sen käyttöönottoon tarvittavaa osaamista ei ole saatavilla. Aidosti globaalin internetin kestävyuden kannalta on elimellisen tärkeää, että internet-palvelut ovat saatavilla kaikkialla. Sananvapaudelle ja demokratialle olisi haitallista, jos verkkoneutraalius nykyisestään heikentyisi IPv6:n käyttöönoton vuoksi. Suurin vastuu tässä lienee globaaleilla internet-

palveluilla, ja kansainvälisten järjestöjen tulisi edistää tietoisuutta verkkoinfrastruktuurin kestävästä kehityksestä.

Keskeisin IPv6:n käyttöönottoa edistävä tekijä onkin verkkoinfrastruktuurin ja -palveluiden kustannusten muuttuminen IPv6:lle suotuisaksi. IPv6-valmiiden laitteiden globaalien saatavuuden paraneminen ja hintojen laskeminen yhdistettynä IPv4:n julkisen käytön kustannusten nousuun todennäköisesti edistäisi käyttöönottoa kaikilla alueilla. Tämän lisäksi se toisi IPv6:n paremmin saataville myös vähemmän kehittyneille alueille.

Tekniseltä kannalta taloudelliset syyt kulkevat aivan käsi kädessä. Kun IPv6:n käyttö tulee yleisemmäksi ja sen kannattavuus kasvaa, myös IPv6-verkkojen suorituskyky paranee ja sen liiketoiminnalliset perustelut vahvistuvat. Tällainen positiivinen kierre olisi olennainen käyttöönottoa edistävä tekijä.

Myös koulutuksella ja tietoisuuden lisäämisellä voidaan edistää IPv6:n käyttöönottoa. IPv6-protokollaan liittyy paitsi osaamisvajetta, myös kokemuksia siitä, että se on vaikea ja raskas hallita. Vahvistamalla verkkoasiantuntijoiden koulutusta IPv6:n liittyen pienentää kynnystä käyttöönotolle, kun organisaatioissa on jo valmiiksi osaamista. Vastustus organisaatioissa vähenee, kun tieto lisääntyy.

IPv6:n tulevaisuus näyttää kaikesta huolimatta lupaavalta. Sillä on mahdollisuus muuttaa tapaa, jolla käytämme internetiä vahvistamalla suoria yhteyksiä päätelaitteiden välillä ilman välikäsiä. Käyttöönotto edistyy koko ajan, eikä ole syytä odottaa, että kehitys olisi kääntymässä laskuun. Minäkäänlaista aika-arviota siitä, milloin globaali internet on laajalti IPv6-pohjainen, ei voida antaa. Toistaiseksi siirtymäteknologiat tulevat olemaan tärkeässä roolissa internetin toiminnan ja IPv6-siirtymän mahdollistamiseksi.

Siirtymä on hidaskä, mutta yritysten ja organisaatioiden ei ole vahvaa syytä olettaa, että IPv6 tulisi täysin hylätyksi. Päinvastoin internet jatkaa kasvuaan ja julkinen IPv4-avaruus käy entistä ahtaammaksi. IPv4-yhteyksiä käyttävillä yrityksillä ja organisaatioilla on siten vahvat perusteet selvittää, miten siirtymä IPv6-natiiviin verkkoon vaikuttaisi heidän verkkoonsa ja verkkopalveluihinsa. Suomessa IPv6-yhteyksiä alkaa myös olla niin hyvin saatavilla, että tulee jopa kyseeseen tarkastella, voisiko siirtymällä saada jotain erityisiä hyötyjä.

6.2 Tutkimuksen arviointi ja jatkotutkimuksen aiheita

Tutkimusasetelma johdatti tutkimusta melko yleiselle tasolle, jolloin se ei voi tarjota erityisen tarkkoja ratkaisuja yksittäisten organisaatioiden tai valtioiden tilanteisiin. Sinänsä tutkimusasetelma on kuitenkin perusteltu. Tutkimuksen tuloksia voidaan pitää melko luotettavina ja ne vastaavat

tutkimusongelmaan ja -kysymyksiin. On kuitenkin mahdollista, että haun parametrejä säätämällä tai tekemällä hakuja eri kantoihin voitaisiin löytää vielä eri näkökulmia ja korostuksia, jolloin tulokset voivat olla jokseenkin erilaisia.

Tutkimus on toistettavissa, sillä sen menetelmällinen toteutus on tarkasti selostettu, sitä on noudatettu ja se on dokumentoitu. Aineisto valittiin menetelmällisesti perustellusti, ja se edustaa eri tutkimussuuntia ja näkökulmia aiheeseen. Aineiston heikkoutena kuitenkin, etteivät kaikki artikkelit ole vertaisarvioituja, eikä kaikkia hakutuloksia käyty läpi. Tutkimuksessa onnistuttiin löytämään vastauksia tutkimuskysymyksiin.

Jatkotutkimuksena olisi kiinnostavaa testata tuloksia organisaatiotasolla sekä kartoittaa suomalaisten verkkojen valmiutta IPv6:n käyttöön. Lisäksi olemassa olevan osaamisen taso olisi tärkeä tunnistaa, sekä mahdollisia asenteita, joita suomalaisilla verkkoasiantuntijoilla on IPv6-migraatioon liittyen. Suosittelen jatkotutkimuksen aiheiksi esimerkiksi

- Millaista ja kuinka yleistä on IPv6:n käyttö Suomessa?
- Millaisia näkemyksiä ja valmiuksia suomalaisilla IT-alan ammattilaisilla on liittyen IPv6:n käyttöön?
- Millaisena tässä tutkimuksessa havaitut esteet näyttäytyvät esimerkiksi suomalaisten internet-palveluntarjoajien tai IT-alan ammattilaisten näkökulmasta?
- Millaisia IPv6-verkkoratkaisuja suomalaiset yritykset ovat tehneet yritysverkoissa?

6.3 Oman oppimisen arviointi

Olin päättänyt jo hyvissä ajoin ennen opinnäytetyöprosessin aloittamista, että haluan opinnäytetyössäni saada selvyden itseäni askarruttaneeseen kysymykseen IPv6:n käyttöönoton hitaasta etenemisestä. Alun perin suunnittelin tekeväni opinnäytetyöni tutkimuksena, jossa käytettäisiin aineistonkeruumenetelmänä puolistrukturoitua haastattelua. Tällöin myös tutkimuskysymykset olisivat liittyneet tarkemmin Suomen tilanteeseen. En kuitenkaan onnistunut sovittamaan haastattelujen toteuttamista täysipäiväisen työn oheen, joten päätin lopulta vaihtaa menetelmää ja säätää tutkimusasetelmaa yleisemmälle tasolle.

Tutkimuksen rajaus ja tutkimuskysymysten laatiminen oli mielestäni melko sujuvaa, vaikka jouduinkin sen lopulta tekemään kahdesti. Koin myös tärkeäksi tuottaa aiheeseen liittyvää ajantasaista ja tutkimusperustaista tietoa suomeksi. Mielestäni kirjallisuuskatsaus on hyvä menetelmä, jolla voidaan parantaa ymmärrystä ilmiöistä. Merkittävin menetelmävaihdoksesta aiheutunut ongelma tutkimuksen toteutuksessa oli tutkimusasetelman päivitys ja erityisesti siihen orientoituminen, mutta ratkaisin sen palaamalla säännöllisesti tutkimuskysymyksiin ja refleктоimalla niitä. Näin sain tuottaa työhöni johdonmukaisuutta uuden asetelman mukaisesti.

Opinnäytetyö valmistui alkuperäisen tavoitteen mukaisesti keväällä 2024. Opin itse paljon tietoverkkojen toiminnasta, siihen liittyvistä päätöksenteko- ja hallintaprosesseista sekä kirjallisuuskatsauksen systemaattisesta toteutuksesta. Oppimisprosessini tukee minua vahvistaessani osaamistani ICT-infrastruktuurin asiantuntijana. Uskon, että kehittyneet tutkimustaitoni ja parempi ymmärrykseni globaalista internet-infrastruktuurista tulevat olemaan minulle hyödyksi myöhemmin.

Lähteet

- Amaechi, A. & Shinyuy, K. 2021. What Stands in the Way of Bigger Internet with Virtually Unlimited IP Address in Cameroon: A Study of IPv6 Stakeholders in Cameroon. *Journal of Computer and Communications*, 9, 11, 22-36.
- APNIC. 2024a. IPv6 Capable Rate by country (%). Saatavilla: <https://stats.labs.apnic.net/ipv6>. Luettu 9.5.2024.
- APNIC. 2024b. Use of IPv6 for Finland (FI). Saatavilla: <https://stats.labs.apnic.net/ipv6/FI>. Luettu 9.5.2024.
- Barr, J, 28.6.2023. New – AWS Public IPv4 Address Charge + Public IP Insights. Saatavilla: <https://aws.amazon.com/blogs/aws/new-aws-public-ipv4-address-charge-public-ip-insights/>. Luettu 13.5.2024.
- Bhuiyan, Z. A., Ahasan Ullah, A. B. M., Hasan Khan, M. M., Morshed, S. & Islam, M. M. 2023. An Empirical Research Towards the State of Transition from IPv4 to IPv6. 5th International Conference on Sustainable Technologies for Industry 5.0 (STI), Dhaka, Bangladesh, 1-6.
- Booth, A., Sutton, A. & Papaioannou, D. 2016. Systematic approaches to a successful literature review. Second edition. SAGE Publications Ltd. Lontoo.
- Cisco. 2022. Networking Essentials Companion Guide. Cisco Press. E-kirja. Luettu 12.5.2024.
- Comparitech. 2024. Is Google blocked in China? Saatavilla: <https://www.comparitech.com/privacy-security-tools/blockedinchina/google/>. Luettu 1.5.2024.
- DARPA. 1981. RFC 791. Internet Protocol. Saatavilla: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc791>. Luettu 1.5.2024.
- Deering, S. & Hinden, R. 1998. RFC 2460. Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. Luettavissa: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2460>. Luettu 1.5.2024.
- Deering, S. & Hinden, R. 2017. RFC 8200. Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. Luettavissa: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8200>. Luettu 1.5.2024.
- Google IPv6. s.a. Statistics. Luettavissa: <https://www.google.com/intl/en/ipv6/statistics.html>. Luettu 1.5.2024.

Graziani, R. 2017. IPv6 Fundamentals: A Straightforward Approach to Understanding IPv6, 2nd Edition. Cisco Press. E-kirja. Luettu 1.5.2024.

Greetham, B. 2021. How to write your literature review. Red Globe Press. Lontoo.

Hamarsheh, A., Abdalaziz, Y. & Nashwan, S. 2021. Recent Impediments in Deploying IPv6. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 6, 1, 336-341.

Hughes, L. E. 2022. Third Generation Internet Revealed: Reinventing Computer Networks with IPv6. Berkeley, CA: Apress L. P. E-kirja. Luettu 13.5.2024.

ICANN. 2012. Global Policy for Post Exhaustion IPv4 Allocation Mechanisms by the IANA. Luettavissa: <https://www.icann.org/resources/pages/allocation-ipv4-post-exhaustion-2012-05-08-en>. Luettu 1.5.2024.

Kawamura, S. & Kawashima, M. 2010. RFC 5952. A Recommendation for IPv6 Address Text Representation. Luettavissa: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5952>. Luettu 1.5.2024.

Kuerbis, B. & Mueller, M. 2020. The hidden standards war: economic factors affecting IPv6 deployment. Digital Policy, Regulation and Governance, 22, 4, 333-361.

Nieminen, K. 2020. Suositus IPv6:n käyttöönotosta kuluttajalaajakaistaliittymissä. Traficom julkaisu 230/2020. Luettavissa: <https://www.trafficom.fi/sites/default/files/media/regulation/Suositus-IPv6n-kayttoonotosta-kuluttajalaajakaistaliittymissa.pdf>. Luettu 1.5.2024.

Panek, C. 2020. Networking Fundamentals. Wiley Data and Cybersecurity. E-kirja. Luettu 12.5.2024.

Pickard, J., Angolia, M. & Drummond, D. 2019. IPv6 Diffusion Milestones: Assessing the Quantity and Quality of Adoption. Journal of International Technology & Information Management, 28,1, 2–28.

Regional Internet Registries Statistics. 2024. RIPE NCC Allocations. Luettavissa: <https://www-public.imtbs-tsp.eu/~maigron/rir-stats/ripe-allocations/ipv4/by-number/fi-ipv4-by-number.html>. Luettu 1.5.2024.

RIPE NCC. s.a. What is IPv4 Run Out? Luettavissa: <https://www.ripe.net/manage-ips-and-asns/ipv4/ipv4-run-out/>. Luettu 1.5.2024.

RIPE NCC. 2019. The RIPE NCC has run out of IPv4 Addresses. Luettavissa: <https://www.ripe.net/publications/news/the-ripe-ncc-has-run-out-of-ipv4-addresses/>. Luettu 1.5.2024.

RIPE NCC. 2020. IPv6 Address Allocation and Assignment Policy. Luettavissa: <https://www.ripe.net/publications/docs/ripe-738/>. Luettu 1.5.2024.

Salminen, A. 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyypeihin ja hallinto-tieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopiston julkaisuja. Opetusjulkaisuja 62, Julkisojohtaminen 4.

Setiawan, M. A. 2023. On IPv6 Slow Adoption: Why We Might Approach it Wrongly? Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI), 9, 2, 385–395.

Shah, J. L., Bhat, H. F., & Khan, A. I. 2019. Towards IPv6 Migration and Challenges. International Journal of Technology Diffusion (IJTD), 10, 2, 83-96.

Syamsuar, D., Dell, P., Witarsyah, D. & Luthfi, A. 2022. Organizational Resistance to Technology Diffusion: The Case of IPv6. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 12, 6, 2462-2468.

UN. 2020. LDCs at a Glance. Luettavissa: <https://www.un.org/development/desa/dpad/least-developed-country-category/ldcs-at-a-glance.html>. Luettu 5.5.2024.

Liitteet

Liite 1. Tehdyt kirjallisuushaut ja seulontaprosessi.

Hakusanat	Rajaus	Tietokanta	Yhteensä	Otsikon mukaan valitut	Abstraktin mukaan valitut	Kokotekstin perusteella arvioidtavat	Lopullinen valinta
ipv6 AND deployment OR ipv6 AND adoption	Julkaistu 2019-2024	EB-SCO-host (Haaga-Helia)	74	3	1	1	1
ipv6 AND deployment OR ipv6 AND adoption	Julkaistu 2019-2024	Google Scholar	N. 16 000 (200 ensimmäistä)	18	8	7	6
ipv6 AND deployment OR ipv6 AND adoption	Julkaistu 2019-2024	IEEE Xplore	134	4	2	2	1
ipv6 AND deployment AND exhaustion OR ipv6 AND adoption AND exhaustion	Julkaistu 2019-2024	Google Scholar	N. 2020 (200 ensimmäistä)	6	1	0	0
ipv6 AND deployment AND	Julkaistu 2019-2024	EB-SCO-host	0	0	0	0	0

Hakusanat	Rajaus	Tietokanta	Yhteensä	Otsikon mukaan valitut	Abstraktin mukaan valitut	Kokotekstin perusteella arvioidtavat	Lopullinen valinta
exhaustion OR ipv6 AND adoption AND exhaustion		(Haaga-Helia)					
ipv6 AND deployment AND exhaustion OR ipv6 AND adoption AND exhaustion	Julkaistu 2019-2024	IEEE Xplore	6	0	0	0	0
ipv6 AND käyttönot*	Julkaistu 2019-2024	Google Scholar	0	0	0	0	0
ipv6 AND käyttönot*	Julkaistu 2019-2024	Finna	0	0	0	0	0

Liite 2. Tutkimusaineistoksi valitut tutkimukset.

Tekijä, julkaisun tiedot	Tutkimusongelma, -menetelmä & -aineisto	Keskeiset tulokset
<p>Pickard, J., Angolia, M. and Drummond, D. 2019. IPv6 Diffusion Milestones: Assessing the Quantity and Quality of Adoption. Journal of International Technology & Information Management, 28(1), pp. 2–28. doi:10.58729/1941-6679.1375.</p>	<p>Missä vaiheessa IPv6:n kehitys on? Millainen on IPv6:n käyttökokemus tällä hetkellä?</p> <p>Kvantitaativinen tutkimus. Tarkasteltiin IPv6:n käyttöönoton tasoa ja laatua vertaamalla internet-käyttökokemuksen laatua eri maitareilla. Analysoitiin Googlen IPv6-dataa. Tehtiin koe, jossa skripti haki Googlen DNS:n kautta sivustojen A- ja AAAA-tietueita.</p>	<p>IPv6:n käyttö on saavuttanut kriittisen massan, ja sen käyttö tulee yleistyään kiihtyvällä tahdilla. Käyttäjälle käyttökokemus on nopeampien latausaikojen osalta IPv4:ssä parempi.</p>
<p>Amaechi, A. & Shinyuy, K. 2021. What Stands in the Way of Bigger Internet with Virtually Unlimited IP Address in Cameroon: A Study of IPv6 Stakeholders in Cameroon. Journal of Computer and Communications, 9, 22-36. doi: 10.4236/jcc.2021.911002.</p>	<p>Mitkä tekijät estävät IPv6:n käyttöönottoa Kamerunissa? Miten valvutuneita organisaatioita ovat IPv6:sta?</p> <p>Kvalitatiivinen tutkimus. Asiantuntijahaastattelusta (n=6) tehtiin teema-analyysi, kyselytutkimuksella arvioitiin haastatteluissa esiin nousseiden teemojen merkitystä (n=115).</p>	<p>IPv6:n mahdollisuuksia uudelleen innovaatioita ei ymmärretä. Infrastruktuurin päivitys ja uudelleenkoulutus on kallista. Valtionhallinto ei ole edistänyt siirtymää kannustimilla. IPv6 nähdään kaukaisena asiana.</p>

Tekijä, julkaisun tiedot	Tutkimusongelma, -menetelmä & -aineisto	Keskeiset tulokset
<p>Kuerbis, B. and Mueller, M. 2020. The hidden standards war: economic factors affecting IPv6 deployment. Digital Policy, Regulation and Governance, Vol. 22 No. 4, pp. 333-361. https://doi.org/10.1108/DPRG-10-2019-0085</p>	<p>Mitkä taloudelliset tekijät vaikuttavat verkko-operaattoreiden päätöksiin ottaa IPv6 käyttöön? Mitkä tekijät selittävät parhaiten maata-son IPv6-käytönoton ta-soa? Kuinka siirtymäteknologiat vaikuttavat taloudelli-siin kannustimiin?</p> <p>Kvantitatiivinen tutkimus. Ti-lastotieteellisin menetelmin analysoitiin makrososiaa-lista ja mikrotaloustieteel-listä dataa.</p>	<p>IPv6 tulee kehittymään erityisesti mobiilipuolella, mutta IPv4 tulee jatkamaan rinnalla, koska vanhojen verkkojen päivittäminen ei ole taloudellisesti järkevää. Siirtymäteknologiat tulevat tukemaan tietoliikennettä vielä pitkään.</p>
<p>Setiawan, M. A. 2023. On IPv6 Slow Adoption Why We Might Approach it Wrongly? Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI) Vol. 9, No. 2, June 2023, pp. 385-395. ISSN: 2338-3070, DOI: 10.26555/jiteki.v9i2.26058</p>	<p>Voiko muotoiluajatteluun perustuva lähestymistapa vauhdittaa IPv6:n käyttöönottoa Indonesiassa?</p> <p>Kvalitatiivinen tutkimus. IT-ammattilaisille suunnatun kyselyn (n=106) dataa analysoitiin muotoiluajattelun DTITA-viitekehyksessä.</p>	<p>IPv6:n käyttöönottoa hidastavat erityisesti rajalliset resurssit ja osaamisvaje. Käyttäjälähtöistä suunnittelua voidaan käyttää osaamisvajeen kuromiseen.</p>
<p>Hamarsheh, A., Abdalaziz, Y. & Nashwan, S. 2021. Recent Impediments in Deploying IPv6. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal Vol. 6, No. 1, 336-341.</p>	<p>Millä keinoin IPv4:n elinkaarta on jatkettu? Mikä on estänyt IPv6:n käyttöönottoa prosessin?</p> <p>Kvalitatiivinen tutkimus. E-systemaattinen kirjallisuuskatsaus.</p>	<p>Loppukäyttäjät eivät ole motivoituneita edistämään muutosta. Infrastruktuurimuutos on kallis internet-palveluntarjoajille.</p>

Tekijä, julkaisun tiedot	Tutkimusongelma, -menetelmä & -aineisto	Keskeiset tulokset
<p>Shah, J. L., Bhat, H. F., & Khan, A. I. 2019. Towards IPv6 Migration and Challenges. International Journal of Technology Diffusion (IJTD), 10(2), 83-96. http://doi.org/10.4018/IJTD.2019040105.</p>	<p>Mitä etuja IPv6:n käyttöönotossa on? Mikä on hidastanut IPv6:n käyttöönottoa?</p> <p>Kvalitatiivinen tutkimus. Ecosystemaattinen kirjallisuuskatsaus.</p>	<p>Protokollien yhteensopimattomuus saa tehtävän tuntumaan mahdottomalta. Muutos edellyttää infrastruktuurin ja laitteiston työlästä uudistamista. IPv6:n turvallisuus huolestuttaa. Varhaiset järjestelmät (esim. Windows 95) eivät tukeneet IPv6:ta. Käyttöönotto on kallista.</p>
<p>Syamsuar, D. 2022. Organizational Resistance to Technology. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, 12 (2022). pp. 2462-2468.</p>	<p>Miksi organisatorista vastustusta IPv6:ta kohtaan esiintyy? Miten organisatorista vastustusta voidaan vähentää?</p> <p>Sekamenetelmä. Puolistrukturoiduilla haastatteluilla (n=17) kerätty aineisto analysoitiin teema-analyysinä. Teemoille tehtiin tilastollinen analyysi.</p>	<p>Käyttöönotolle ei koeta olevan tarvetta. IPv6 koetaan turvallisuuskana. Muutosta ei tueta tai säännellä valtion taholta. Ulkopuolelta ei tule muutospainetta.</p>
<p>Bhuiyan, Z. A., Ahasan Ullah, A. B. M., Hasan Khan, M. M., Morshed, S. & Islam, M. M. 2023. An Empirical Research Towards the State of Transition from IPv4 to IPv6th International Conference on Sustainable Technologies for Industry 5.0 (STI), Dhaka, Bangladesh, 2023, pp.</p>	<p>Missä vaiheessa IPv6:n käyttöönotto on? Mikä estää käyttöönottoa globaalisti? Mikä estää käyttöönottoa erityisesti Bangladeshissa?</p> <p>Sekamenetelmä. Ensin tehtiin kirjallisuuskatsaus</p>	<p>Korkeat kustannukset, kannustimien puute ja yhteensopivuusongelmat hidastavat globaalilla tasolla. Bangladeshin erityisongelmina on, ettei IPv6-yhteensopivia laitteita ole</p>

Tekijä, julkaisun tiedot	Tutkimusongelma, -menetelmä & -aineisto	Keskeiset tulokset
1-6, doi: 10.1109/STI59863.2023.10464716.	IPv6:n käyttöönottoon. Sit- ten käyttöä maailmalla ja Bangladeshissa analysoitiin tilastollisesti julkisen datan perusteella. Näiden tuloksia tehtiin synteesi.	saatavilla, maassa on luvaton internet-palve- luntarjoajatoimintaa, hal- linnon järjestelmät eivät tue IPv6:ta, maa saa vielä IPv4-osoitteita, yleinen tietoisuuden puute, asiantuntijuuden puute.