KANDIDAATINTYÖ
2025

Santeri Hildén

Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan korkeakoulu
Informaatioteknologian tutkinto-ohjelma

Santeri Hildén

Matkapuhelinverkkojen aiheuttama hiilijalanjälki ja sen vähentäminen

Kandidaatintyö

8.5.2025

Työn ohjaaja:

Prof. Jukka Manner

AALTO-YLIOPISTO
SÄHKÖTEKNIIKAN KORKEAKOULU
PL 13000
00076 AALTO

TEKNIIKAN KANDIDAATINTYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Santeri Hildén

Työn nimi: Matkapuhelinverkkojen aiheuttama hiilijalanjälki ja sen vähentäminen

Koulutusohjelma: Informaatioteknologian tutkinto-ohjelma

Päiväys: 8.5.2025 Sivumäärä: 5+18

Vastuuopettaja: Prof. Pasi Lassila

Ohjaaja: Prof. Jukka Manner

Kieli: suomi

Tutkitaan matkapuhelinverkkojen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä ja keinoja sen vähentämiseen. Pyritään selvittämään suurimmat päästölähteet ja arvioimaan teknologisia ja rakenteellisia ratkaisuja, joilla verkkojen ympäristövaikutuksia voidaan pienentää. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa hyödynnettiin useita kansainvälisiä tutkimuksia ja raportteja.

Pääasialliseksi teemaksi asetettiin tukiasemien energiankulutus, jonka todettiin kattavan jopa 80 % koko matkapuhelinverkkojen energiankulutuksesta. Huomattiin myös, että tukiasemien valmistus, kuljetus ja huolto aiheuttavat merkittäviä, mutta vähemmän tutkittuja päästöjä.

Energiankulutuksen vähentämiseksi on kehitetty useita ratkaisuja, kuten tukiasemien dynaaminen lepotila säätely, älykkäät virransäästöalgoritmit ja energiatehokkaat radioteknologiat. Näillä voidaan saavuttaa suuria säästöjä energiankulutuksessa. Uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinkoenergian, käyttö nähdään lisämahdollisuutena päästöjen vähentämiseen erityisesti kehittyvillä alueilla, mutta nykytilanteessa niiden käyttöönottoa ei pidetä laajasti taloudellisesti kannattavana ilman ulkoisia ohjausmekanismeja, kuten hiiliverotusta.

Tulevaisuuden teknologioiden, kuten 6G:n ja generatiivisen tekoälyn, avulla mahdollistetaan entistä tarkempi verkonhallinta ja energiankäytön optimointi. Erityisesti tekoälypohjaisten järjestelmien, kuten DETA:n, avulla voidaan merkittävästi vähentää verkkojen päästöjä. Voidaan todeta, että teknologisia keinoja päästöjen vähentämiseen on olemassa, mutta niiden vaikutuksen todettiin riippuvan taloudellisista kannustimista ja poliittisesta ohjauksesta. Kestävän mobiiliverkon saavuttaminen edellyttää kokonaisvaltaista lähestymistapaa, jossa yhdistetään teknologia, talous ja ympäristöpolitiikka.

Avainsanat: Matkapuhelinverkot, hiilidioksidipäästöt, Informaatio ja kommunikaatioteknologia-järjestelmät

Sisällysluettelo

Tiivistelmä ii

Sisällysluettelo iii

Symbolit ja käsitteet iv

1. Johdanto 1

2. Tämänhetkisien ratkaisujen aiheuttama hiilijalanjälki 3

2.1 Tukiasemien materiaalit 3

2.2 Energialähteet 4

3. Hiilijalanjäljen vähentäminen matkapuhelinverkoissa 6

3.1 Energiatehokkuuden parantaminen 6

3.1.1 Verkkoarkkitehtuurin kehitys 7

3.1.2 Resurssien hallinta ja optimointi 8

3.1.3 Energiatehokkaammat radioteknologiat 9

3.2 Uusiutuvien energialähteiden käyttö 10

3.3 Mobiilimastoihin käytetyt raaka-aineet 11

4. Todennäköiset muutokset tulevaisuudessa 13

4.1 Verkkoteknologian kehitys 13

4.2 6G 14

4.3 Generatiivinen tekoäly 14

5. Yhteenveto 15

6. Lähteet 16

Symbolit ja käsitteet

CO_2	Hiilidioksidi
kW	Kilo watti
kWh	Kilo watti tunti

Käsitteet

APC	Active Power Control
CAPEX	Capital expenditure
CoMP	Coordinated Multi-Point
DETA	Dynamic Energy Trading and Task Allocation
HetNet	Heterogeneous network
ICT	Information and Comminication Technology
MIMO	Multiple-Input and Multiple-Output
NFV	Network Functions Virtualisation
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OPEX	Operating expense
OSS	Operations Support Systems
QoD	Quality on Demand
RAN	Radio Access Network
SDN	Software-Defined Networking
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
Sleep-mode	Dynamic sleep-mode techniques

1. Johdanto

Matkapuhelinverkot ovat keskeinen osa modernia viestintäinfrastruktuuria. Niiden käyttö sekä ylläpito kuluttavat energiaa ja tuottavat hiilidioksidipäästöjä. Energian ja komponenttien alkuperä vaikuttaa merkittävästi verkkojen aiheuttaman hiilidioksidipäästöjen määrään. Kaikkialla ei kuitenkaan ole mahdollista käyttää sitä vihreintä vaihtoehtoa tai se ei ole taloudellisesti kannattavaa. Niin kuin myös kaikilla muilla aloilla, niin mobiiliverkkojen vihreä siirtyminen tapahtuu, kun se on mobiilioperaattoreiden intressien mukaista. Samaan aikaan verkkoteknologian kehittyminen, kuten 5G-verkon laajeneminen, lisää kulutusta ja tuo uusia haasteita energiatehokkuudelle ja kestävyydelle.

Tutkimusaiheen ajankohtaisuutta tukee kestävän kehityksen ja ilmastotavoitteiden merkityksen kasvu. Vuositasolla Informaatio ja kommunikaatioteknologia-järjestelmät (ICT) ovat vastuussa arviolta 2%-4% koko maailman hiilidioksidipäästöistä. Energiakulutuksen kasvu arvioidaan nousevan 15%-20% vuodessa ja tuplaantuvan viiden vuoden jälkeen. Yhteiskunnan jatkuva kasvu ja tarve tietoliikenneverkoille pakottavat keksimään hiilidioksidipäästöjä vähentäviä ratkaisuja, kuten energiatehokkaampaa teknologiaa tai uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Tämä tutkimus selvittää, kuinka matkapuhelinverkot aiheuttavat hiilijalanjälkeä, mistä johtuvat suurimmat päästöt ja miten niiden ympäristövaikutuksia voidaan vähentää. [Su 2013]

Tutkiessamme todennäköisiä päästölähteitä, yksi jatkuva ja suurimpia on oltava verkkojen ylläpitämiseen käytetty energia. Suurin osa matkapuhelinverkkojen energiankulutuksesta tulee tukiasemista, jotka käyttävät uusimpien tutkimuksien mukaan jopa 80 % koko verkon kuluttamasta sähköstä. Lisäksi ydinverkon komponentit, kuten reitittimet ja datakeskukset, vaativat merkittäviä energiamääriä, erityisesti dataliikenteen kasvaessa eksponentiaalisesti. Vaikka energiatehokkuuden parantaminen on yksi keskeisistä kehityskohteista, verkkoympäristön monimutkaisuus tekee haasteesta monitahoisen. [Su 2013, Chochliouros 2021]

Teknologiset innovaatiot, kuten hajautettu verkkoarkkitehtuuri, Ohjelmallisesti määritetyt verkot (SDN) ja verkkotoimintojen virtualisointi (NFV), tarjoavat keinoja optimoida energiankäyttöä ja vähentää hukkaenergiaa. Myös älykkäät virransäästömekanismit, kuten tukiasemien dynaaminen lepotila (sleep-mode) ja taajuusalueiden mukautuva hallinnalla voidaan vähentää tukiaseman energiankulutusta aiheuttamatta suurta haittaa sen suorituskykyyn [Chochliouros 2021, Hijjawi 2023, Liu 2023]

Kasvava tarve nopealle ja tasaiselle verkolle toi 5G-verkon, mutta sen käyttöönotto toi uusia haasteita energiankulutukseen, mitä ei olla vielä onnistuttu ratkaisemaan. Uuden sukupolven matkapuhelinverkot käyttävät tiheämpää solurakennetta, jossa perinteisten makrotukiasemien rinnalle on otettu käyttöön pienempiä soluja, kuten

femtosolut ja picotukiasemat. Näiden avulla voidaan tehostaa verkon kapasiteettia ja parantaa signaalinlaatua, mutta samalla ne lisäävät energiankulutusta, mikäli energiatehokkaita ratkaisuja ei oteta käyttöön. [Chochliouros 2021]

Tulevaisuuden kestävät matkapuhelinverkot tarvitsevat laajamittaista optimointia, jossa hyödynnetään tekoälyä ja koneoppimista energiankulutuksen hallintaan. Ennakoiva analytiikka voi tehostaa dynaamisen lepotilan säätelyä, jotta saataisiin ylläpidettyä tasainen verkko käyttäjällä sekä vähennettyä turhaa energiankulutusta vielä enemmän**.** Uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman, käyttö matkapuhelinverkkojen ylläpitämiseen voi olla ratkaiseva tekijä hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä, erityisesti kehittyvillä alueilla, joissa sähköverkkojen päästöt voivat olla hyvin korkeita. [Liu 2023, Li 2023, Lee 2021]

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan matkapuhelinverkkojen hiilijalanjälkeä, analysoidaan suurimpia päästölähteitä ja arvioidaan, miten laajasti käytämme jo keksittyjä ratkaisuja vihreämmän verkon luomiseksi. Tutkimuksessa myös tarkastellaan miten uudet todennäköiset teknologiat ja ratkaisut voivat auttaa vähentämään ympäristövaikutuksia. Erityisesti keskitytään verkkoarkkitehtuurin optimointiin ja energiatehokkaisiin radioteknologioihin, jotka voivat tarjota konkreettisia ratkaisuja hiilijalanjäljen pienentämiseksi ylläpitäen sen suorituskyvyn.

2. Tämänhetkisien ratkaisujen aiheuttama hiilijalanjälki

Matkapuhelinverkkojen infrastruktuuri rakentuu suuresta määrästä tukiasemia, siirtoväyliä ja verkonhallintajärjestelmiä, joiden ylläpito ja toiminta kuluttavat merkittävästi energiaa. Matkapuhelinverkkojen hiilijalanjälki muodostuu kokonaisuudessaan sähköenergian käytöstä, laitteistojen valmistuksesta ja huollosta sekä verkkojen operatiivisista päästöistä. Matkapuhelinverkkojen energiankulutus koostuu pääasiassa tukiasemien energiankulutuksesta, jotka muodostavat tutkimuksien mukaan jopa 60%–80 % koko verkon energiankulutuksesta. [Su 2013, Chochliouros 2021]

Kiinassa tehdyn tutkimuksen mukaan, keskimäärin yksi makro 5G-tukiaseman energiankulutus tuottaa arviolta 30 tonnia CO_2-päästöjä vuodessa. Vuositasolla Kiinan laskettiin tuottavan 60 megatonnia CO_2-päästöjä 5G tukiasemien vuoksi. Vielä vuonna 2022 Kiinan omatessa 60% koko maailman 5G-tukiasemista, voidaan laskea arviolta, että koko maailmassa tukiasemien käyttämän energian hiilidioksidipäästöt vuositasolla ovat 100 megatonnin luokkaa. Päästöt kokonaisuudessaan ovat kuitenkin paljon suuremmat, sillä tutkimus ei ottanut ollenkaan huomioon tukiasemien rakentamisesta, asentamisesta tai huoltamisesta aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. [Li 2023]

2.1 Tukiasemien materiaalit

Matkapuhelinverkkojentukiasemat tyypillisesti koostuvat kahdesta osasta, viestintäjärjestelmästä (RAN) ja sen tukijärjestelmästä (OSS). Tukijärjestelmän tarkoitus on jäähdyttää viestintäjärjestelmää. Viestintäjärjestelmä taas vastaa itse lähetyksestä ja vastaanotosta. Tukiasemat koostuvat monimutkaisista sähköisistä ja mekaanisista komponenteista, joiden valmistus ja ylläpito vaikuttavat merkittävästi niiden hiilijalanjälkeen. Tarkemmat komponentit, mitä tukiasemissa käytetään ovat yrityssalaisuuksia, mitä mobiilioperaattorit eivät paljasta. Tutkimalla fyysisenkerroksen teknologioita, voidaan kuitenkin päätellä, että tukiasemat sisältävät metalleja, kuten alumiinia, kuparia ja terästä. Näiden materiaalien louhinta, jalostus ja kuljetus ovat energiaintensiivisiä prosesseja, jotka lisäävät tukiasemien elinkaarenaikaisia hiilidioksidipäästöjä. [Li 2023, Chien 2025, Yan 2023, Min 22]

Erityisesti 5G-tukiasemissa käytetään kehittyneitä antennitekniikoita, kuten massiivisia MIMO-antennijärjestelmiä, jotka vaativat enemmän elektroniikkaa ja materiaaleja kuin aiempien sukupolvien tukiasemat. Uusien tukiasemien komponenttien määrän kasvaessa, tarvitaan myös vahvempia runkorakenteita ja tehokkaampia jäähdytysjärjestelmiä. Myös 5G-verkon korkeampi taajuusalue kasvattaa lämpökuormitusta rakenteissa. Näiden rakenteiden materiaalivalinnat vaikuttavat sekä energiatehokkuuteen että ympäristövaikutuksiin. [Williams 2022]

Tukiasemien jäähdytysjärjestelmät ovat keskeinen osa suunnittelua ja materiaalivalintoja. Perinteiset ilmajäähdytykset kuluttavat runsaasti sähköä, mutta ovat vielä silti yleisempiä kuin materiaalipohjaiset ratkaisut, kuten lämpöä johtavien

komposiittien käyttö. Materiaalien valinta on myös tärkeä tukiaseman kierrätettävyyden ja elinkaaren kannalta. Tukiasemat sisältävät harvinaisia maametalleja ja muita vaikeasti kierrätettäviä materiaaleja. Kestävän kehityksen kannalta tarvittaisiin tehokkaampia ratkaisuja tukiasemien kierrätettävyyteen. Tukiasemat suunnitellaan yleensä kestämään kymmenen vuotta, mikä perustuu teknologian vanhenemiseen, käytännön huoltotarpeisiin ja taloudelliseen optimointiin. [Li 2023, Williams 2022, Garroussi 2023]

Tukiasemien valmistamiseen, kuljettamiseen ja huoltamiseen liittyy paljon muuttujia, minkä vuoksi en löytänyt tarpeeksi ajankohtaista ja kattavaa tutkimusta näiden aiheuttamista hiilidioksidi päästöistä. Päästöihin vaikuttaa suuresti missä komponentit valmistetaan ja minne tukiasema rakennetaan. Kuitenkin Ruotsissa tehdyn tutkimuksen mukaan 3G-tukiaseman valmistuksesta aiheutuvat päästöt olivat vuositasolla 250 % suuremmat kuin tukiaseman käyttämän sähköenergian tuotannosta aiheutuvat päästöt. Tämä osoittaa, että tukiasemien kierrätettävyydessä on kyllä tilaa parannukselle. [Williams 2022]

2.2 Energialähteet

Matkapuhelinverkkojen hiilidioksidipäästöihin vaikuttaa keskeisesti se, millaisista energialähteistä sähkö tuotetaan. Nykytilanteessa suurin osa maailman sähköenergiasta tuotetaan yhä fossiilisilla polttoaineilla, kuten kivihiilellä, maakaasulla ja öljyllä, mikä tekee energiantuotannosta merkittävimmän yksittäisen ympäristökuormituksen lähteen mobiiliverkkojen toiminnassa. Kiinassa suoritetussa tutkimuksessa selvisi, että yksi 5G-tukiasema kuluttaa noin 4,3 kWh energiaa vuorokaudessa, mikä vastaa lähes neljän 4G-tukiaseman sähkönkulutusta. Tämä osoittaa, kuinka suuri merkitys energialähteillä on kokonaispäästöjen kannalta erityisesti alueilla, joissa tukiasemaverkostot ovat tiheitä ja sähkön tuotanto on hiili-intensiivistä [Li 2023].

Vaikka 5G-teknologian energiatehokkuus on 4G-teknologiaan verrattuna paljon parempi siirrettyä datayksikköä kohden, kuitenkinkin kokonaisenergiankulutus on kasvanut merkittävästi. Tämä johtuu ennen kaikkea 5G-verkon rakenteesta, mikä perustuu paljon tiheämpään tukiasemaverkkoon. Kattavan peiton saavuttamiseksi tarvitaan makrotukiasemien lisäksi myös mikro- ja pikoasemia. Makrotukiasemat toimivat tyypillisesti 1–2 kW teholla, kun taas pienemmät asemat kuluttavat vähemmän, mutta niiden suuri lukumäärä kasvattaa kokonaiskuormitusta. Lisäksi dataliikenteen määrä on kasvanut nopeasti, mikä entisestään lisää energiankulutusta. Näin ollen pelkkä tekninen energiatehokkuus ei riitä päästöjen hillitsemiseksi, vaan rinnalle tarvitaan ratkaisuja, jotka vähentävät tarpeetonta tiedonsiirtoa ja tehostavat datankäsittelyä verkon eri osissa [Li 2023, Chochliouros 2021, Masoudi 2019]

Matkapuhelinverkkojen energialähteiden hiilijalanjälki vaihtelee merkittävästi eri maiden ja alueiden mukaan. Kehittyvissä maissa, joissa sähkö tuotetaan usein dieselgeneraattoreilla tai hiilipohjaisilla lähteillä, tukiasemien hiilipäästöt voivat olla moninkertaisia verrattuna alueisiin, joissa hyödynnetään enemmän uusiutuvaa energiaa. Esimerkiksi Saharan eteläpuolisessa Afrikassa monia verkkoja ylläpidetään edelleen polttomoottorigeneraattorien avulla, koska sähköverkko on epäluotettava tai kokonaan puuttuva. Tämän vuoksi paikallisesti tuotetun uusiutuvan energian, kuten

aurinkosähkön, käyttöönotto voi merkittävästi pienentää ympäristövaikutuksia ja parantaa verkon toimintavarmuutta. [Israr 2023]

Aurinkoenergiaa pidetään lupaavana keinona vähentää matkapuhelinverkkojen aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä. Teknologian kehitys on tehnyt aurinkopaneeleista entistä tehokkaampia ja taloudellisesti kannattavampaa. Kuitenkin yhä suurella osaa alueista fossiiliset polttoaineet ovat parempi vaihtoehto niiden säännöllisyyden ja edullisuuden vuoksi. Aurinkopaneeleilla varustetut tukiasemat eivät nykyisillä energia- ja laitehinnoilla ole operaattoreille taloudellisesti järkevä vaihtoehto. Maailmanlaajuisesti huomattavasti suurempi hiilivero voisi vaikuttaa uusiutuvien energianlähteiden kannattavuuteen. [Garroussi 2023]

Tieto- ja viestintäteknologia-alalla energiatehokkuus on noussut keskeiseksi suorituskyvyn mittariksi ja suunnittelun reunaehdoksi, sillä kasvava energiankulutus ja siitä seuraavat päästöt ovat merkittävä taloudellinen ja ympäristöllinen huolenaihe. Tulevaisuudessa, erityisesti 5G-verkkojen kehittyessä, on odotettavissa, että energiatehokkuuden merkitys korostuu entisestään osana verkkojen kokonaisvaltaista kestävää kehitystä [Chochliouros 2021]

3. Hiilijalanjäljen vähentäminen matkapuhelinverkoissa

Suurin vaikutus hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen on mobiilioperaattoreiden tekemät säästöpäätökset. Mobiilioperaattoreiden päätöksiä ohjaa pääasiassa taloudellinen kannattavuus, minkä vuoksi kaikki energiankulutusta vähentävät ratkaisut on laajalti otettu jo käyttöön. Kuitenkin tukimastojen rakenteellisessa toteutuksessa sekä materiaalivalinnoissa on paljon kehitettävää, jotta voidaan saavuttaa kierrätettävämpiä ja luontoystävällisempiä ratkaisuja. Mikro- ja femtosolujen käyttöönotto sekä energiatehokkaat radioteknologiat, ovat esimerkkejä keinoista energiatehokkuuden parantamiseksi. Tukiasemien energiankulutus muodostaa valtaosan matkapuhelinverkkojen energiankulutuksesta, minkä vuoksi sitä pyritään aktiivisesti vähentämään. Lisäksi tukiasemien toiminnan dynaaminen ohjaus liikennetilanteen mukaan mahdollistaa huomattavat energiansäästöt ilman palvelun laadun heikkenemistä [Williams 2022, Lee 2021, Su 2013, Chochliouros 2021].

Uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinkoenergian, integroiminen tukiasemien energianhankintaan on keskeinen menetelmä vähentää verkkojen hiilidioksidipäästöjä ja riippuvuutta fossiilisista polttoaineista, erityisesti syrjäseuduilla ja heikon sähköverkon alueilla. Toinen potentiaalinen lähestymistapa on kompensoida päästöjä ilmastoteoilla, kuten puunistutuksilla ja muilla biopohjaisilla hiilinieluilla, mikä voi teknisesti mahdollistaa hiilineutraalisuuden heterogeenisissä verkoissa. Vaikka tekniset mahdollisuudet merkittäviin CO2-päästövähennyksiin ovat olemassa, niiden taloudellinen kannattavuus vaatii edelleen lisäselvityksiä ja kannustimia. [Garroussi 2023, Gonçalves 2016]

3.1 Energiatehokkuuden parantaminen

Energiatehokkuuden parantaminen matkapuhelinverkoissa ei ole vain pyrkimys kohti hiilineutraalimpaa matkapuhelinverkkoa, vaan myös taloudellinen helpotus mobiilioperaattoreille. Tukiasemien energiankulutus voi olla jopa 80% kaikesta matkapuhelinverkkojen kuluttamasta energiasta. Näin ollen tukiasemien energiankulutuksen optimointi on keskeinen tavoite. Tämä voidaan toteuttaa monin eri keinoin, kuten tukiasemien energiankulutuksen optimoinnilla tai paremmalla verkkoarkkitehtuurilla. Yksi ratkaisuista on myös femtosolujen lisääminen mobiiliverkossa. Femtosolut ovat sisäkäyttöön tarkoitettuja tukiasemia, joilla on huomattavasti pienempi tehonkulutus, kuin makrosoluilla. Femtosolujen käyttö mahdollistaa kapasiteetin lisäämisen juuri sinne missä sitä on eniten. Tämä vähentää ylitehokkaiden tukiasemien käytön maksimiteholla ja pienentää verkon kulutusta. [Chochliouros 2021, Gonçalves 2016, Lee 2021, Su 2013]

Energiankulutusta vähentäviä toimenpiteitä on myös tukiasemien dynaaminen ohjaus liikennetilanteen mukaan. Kerätyn kulutustiedon pohjalta voidaan ennakoida matalan liikenteen ajat ja laittaa tukiasemia nukkumistilaan ilman, että palvelun laatu kärsii. Kehitettyjen algoritmien pohjalta kyetään optimoimaan kymmenien tuhansien solujen

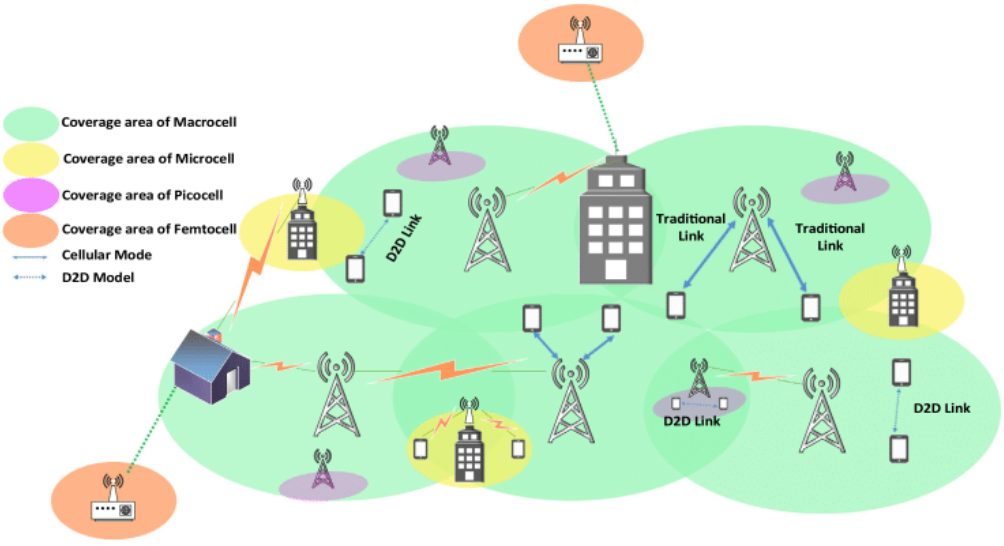
toimintaa reaaliajassa, ja niiden avulla on saavutettu jopa 53% energiansäästö tiheästi asutetuilla kaupunkialueilla. [Lee 2021]

Hiilineutraalisuutta voidaan myös saavuttaa uusilla radioteknologioilla. Esimerkki tästä on CoMP-teknologia, jolla yhdistetään useampi tukiasema yhteistyöhön. Tukiasemat koordinoivat lähetys- ja vastaanottotoimintojaan palvellakseen yhteistä käyttäjää. Yhteistyö vähentää tarpeetonta signaalien päällekkäisyyttä ja häiriötä solujen reuna-alueilla. Kehittyneiden radioteknologioiden, kuten MIMO ja OFDM avulla voidaan tarjota suurempi kapasiteetti pienemmällä energiankulutuksella etenkin kaupunkialueella. Tehokkaamman signaalinsiirron ansiosta tukiasemat voivat käyttää pienempää lähetystehoa, mikä vähentää verkon energiankulutusta. [Su 2013]

3.1.1 Verkkoarkkitehtuurin kehitys

Perinteiset mobiiliverkkojen ydinverkot on suunniteltu hierarkkisella ajatuksella. Tämä aiheuttaa tehottomuutta reitityksessä ja viiveiden hallinnassa, mikä johtaa ylimääräiseen energiankulutukseen. Uuden sukupolven 5G-verkot siirtyvät hajautettuihin ydinverkkoratkaisuihin, jotka mahdollistavat nopeamman datansiirron, pienemmän latenssin ja tehokkaamman energiankäytön [Hijjawi 2022].

Energiankulutusta voidaan vähentää lisäämällä femtosoluja ja hyödyntää niitä heterogeenisessä verkossa (HetNet). Tästä on mallinnus kuvassa 1. Vaikka yleensä pienien tukiasemien lisääminen juuri lisää energiankulutusta verkossa, heterogeeniset verkot pyrkivät vähentämään isojen makrotukiasemien energiankäyttöä hyödyntämällä pienitehoisia femtosoluja kaikista ruuhkaisimmilla alueilla. Tämä hajauttaminen parantaa myös kattavuutta ja signaalin laatua erityisesti tiheästi asutetuilla alueilla. Heterogeeniset verkot hyödyntävät myös aktiivista tehonsäätöä (APC) ja koordinoitua keilamuodostusta (beamforming), joiden avulla myös vähennetään solujen välistä interferenssiä ja optimoidaan signaali-kohinasuhdetta (SINR). Simulaatioilla pystyttiin todentamaan, että näillä menetelmillä onnistuttiin parantamaan SINR-arvoja jopa 80% ja vähentämään viivettä 33% erilaisissa olosuhteissa. [Rose 2021]



Kuva 1: Kuvaus heterogeenisestä verkosta *(Mathur 2017)*

Kokonaisuudessaan verkkoarkkitehtuurin kehitys kohti hajautettuja ja heterogeenisia ratkaisuja tarjoaa huomattavan potentiaalin vähentää mobiiliverkkojen energiankulutusta ja siten pienentää niiden aiheuttamaa hiilijalanjälkeä.

3.1.2 Resurssien hallinta ja optimointi

Resurssien tehokas hallinta ja optimointi sisältää tukiasemien ja verkkolaitteiden toiminnan dynaamisen lepotilan säätämisen sekä tarpeettomien resurssien käytön minimoinnin. Dynaamisella lepotilalla voidaan verkon vähäisen kulutuksen aikana sammuttaa tukiasemia tai niiden komponentteja kuten tehonvahvistimia tai antennielementtejä. Tämän optimointiin voidaan käyttää erilaisia koneoppimismalleja verkon ohjaukseen, jotta voidaan saavuttaa vielä optimaalisempi energiankulutus, ilman että palvelun laatu heikkenee. [Liu 2023]

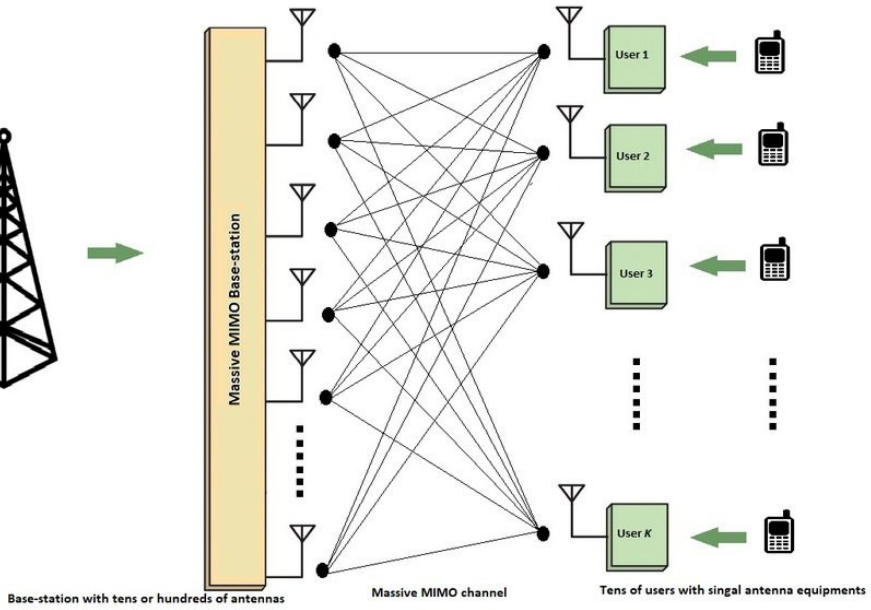
Ohjelmisto-ohjatut verkot (SDN) ovat verkkoteknologiaa, jossa ohjaustaso (control plane) erotetaan datapolusta (data plane), mikä mahdollistaa verkon hallinnan keskitetysti ohjelmallisesti. SDN mahdollistaa verkon toimintojen, kuten reitityksen ja resurssien hallintaa, mitä voidaan säätää dynaamisesti käyttämällä avoimia rajapintoja, kuten OpenFlow-protokollaa. Tämä arkkitehtuurinen muutos mahdollistaa joustavan ja tehokkaan verkon hallinnan, erityisesti monimutkaisissa 5G-ympäristöissä, joissa liikkuvuus, palvelun laatu ja laitteiden määrä vaihtelevat nopeasti. [Hijjawi 2022, Gerasimenko 2015]

Yksi tekoälypohjainen dynaamisen sammuttamisen malli on DeepEnergy, jonka toimintaa tutkittiin Kiinan 5G-tukiasemille. Tutkimuksen pohjalta todettiin, että DeepEnergy onnistui vähentämään energian ja dataliikenteen välistä epäsuhtaa (Misalignment factor). Tuloksista kävi ilmi, että dynaamisella lepotilalla saavutettiin kaksinkertainen hiilitehokkuus, kuin ilman energiansäästöstrategiaa [Li 2023]

Erityisen lupaava lähestymistapa resurssien hallintaan on digitaalisten kaksosten (Digital Twin) hyödyntäminen, joiden avulla voidaan mallintaa, simuloida ja hallita tukiasemien toimintaa tarkasti. Digitaalisten kaksosten avulla voidaan vertailla eri säätöstrategioita ja tunnistaa optimaalinen toimintatila dynaamisissa liikennetilanteissa. Tämä mahdollistaa energiankulutuksen merkittävän vähentämisen ilman, että verkon suorituskyky heikkenee. Käyttämällä reaaliaikaista tietoa sekä koneoppimista, digitaalinen kaksonen voi jatkuvasti päivittää verkkomallia ja tarjota verkonhallinnalle tarkkoja toimenpide-ehdotuksia energiansäästöksi. [Elwesemy 2025]

3.1.3 Energiatehokkaammat radioteknologiat

Tärkeä osa 5G-teknologian laajenemisessa ja suorituskyvyn parantamisessa on Massive MIMO. Massive MIMO mahdollistaa suuren määrän antennielementtejä, kuten näkyy kuvasta 2. Antennit voivat ohjata signaaleja dynaamisesti ja tehokkaasti kohti käyttäjiä, mikä vähentää häiriöitä ja energianhukkaa. Massive MIMO on tehokkaimmillaan keski- ja alataajuuksien yhteiskäytössä, millä voidaan maksimoida sen kattavuus ja kapasiteetti energiatehokkaasti. Suuren antennimäärän vuoksi tukiasema kykenee käyttämään hyödykseen koordinoitua keilamuodostusta. Tämä parantaa sekä spektrin että energiatehokkuuden suhdetta, mahdollistaen jopa 55% energiansäästön verrattuna perinteisiin moniantennitekniikoihin, samalla nelinkertaistaen liikenteen määrän. [Su 2013, Jonsson 2024, Williams 2022]



Kuva 2: Massive MIMOn toimintamalli kuvastettuna *(Albreem 2019)*

Ortogonaalisella taajuusjakodiversiteettimonikertamuodostuksella voidaan jakaa signaali useisiin kapeakaistaisiin alikanaviin, jotka ovat ortogonaalisia keskenään. Tämä mahdollistaa tehokkaamman spektrin käytön ja vähentää intersymbolihäiriötä, mikä puolestaan yksinkertaistaa vastaanottimen rakennetta ja vähentää laskentatehoa, kasvattaen energiatehokkuutta. OFDM parantaa siirtotehokkuutta ja vähentää energiankulutusta, erityisesti suurilla tiedonsiirtonopeuksilla. OFDM voidaan käyttää muissa energiatehokkuutta parantavissa teknologioissa, kuten MIMO-järjestelmissä. Tämän vuoksi OFDM on tunnistettu lupaavaksi tekniikaksi energiaa säästävissä radioteknologiaratkaisuissa tulevaisuuden matkapuhelinverkoissa [Su 2013]

Tulevaisuuden radioteknologioissa keskitytään myös laitteiden käyttöiän pidentämiseen ja niiden ohjelmistopohjaiseen päivitettävyyteen, mikä vähentää tarvetta uusien, energiaintensiivisten laitteistojen valmistukseen. Lisäksi kehittyneillä virransyöttöjärjestelmillä, kuten sähköä säästävillä vahvistimilla (Doherty amplifiers) ja dynaamisilla jännitteen säätöjärjestelmillä, voidaan edelleen pienentää kokonaiskulutusta. Näiden ratkaisujen yhdistäminen älykkäisiin

verkonhallintaprosesseihin mahdollistaa radioteknologioiden suorituskyvyn ja energiatehokkuuden optimoinnin koko elinkaaren ajan. [Masoudi 2019]

Verkkotoimintojen virtualisointi (NFV) siirtää perinteisesti laitteistopohjaisesti toteutetut verkkofunktiot, kuten palomuurit, reitittimet ja liikkuvuudenhallintayksiköt, ohjelmistopohjaisiksi ratkaisuiksi, joita ajetaan yleiskäyttöisillä palvelimilla virtualisointiympäristössä. Tämä mahdollistaa verkon toiminnallisuuden nopean skaalaamisen ja muokkaamisen ilman fyysisiä laitteistomuutoksia. NFV tukee verkkoelementtien sammuttamista tarpeen mukaan ja vähentää täten turhaa energiankulutusta. [Hijjawi 2022]

3.2 Uusiutuvien energialähteiden käyttö

Puhtaampien energialähteiden käyttöönotto on avainasemassa matkapuhelinverkkojen aiheuttamien hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Erityisesti aurinko- ja tuulivoiman hyödyntäminen tukiasemien sähköistämisessä tarjoaa huomattavan potentiaalin fossiilisen energian käytön vähentämiseen. Pienikokoiset tukiasemat voidaan varustaa paikallisilla aurinkopaneeleilla tai ne voidaan kytkeä keskitettyyn uusiutuvan energian mikroverkkoon, mikä mahdollistaa merkittävän päästövähennyksen varsinkin alueilla, joilla sähköverkon kattavuus on rajallinen. Tällaiset uusiutuvan energian ratkaisut vähentävät riippuvuutta pitkiin sähkölinjoihin perustuvasta energiansiirrosta ja parantavat verkon omavaraisuutta syrjäisillä alueilla. Kiinassa suoritetuissa simuloinneissa havaittiin, että aurinkosähkön käyttö yhdessä energiatehokkuustoimenpiteiden, kuten tekoälyavusteisen tukiasemien virrankäytön hallinnan kanssa, voi vähentää merkittävästi 5G-verkkojen hiilipäästöjä. Vuoteen 2023 mennessä arvioitiin, että tämänkaltaisten ratkaisujen avulla voitaisiin vähentää jopa yli 20 miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä kansallisella tasolla [Garroussi 2023, Chochliouros 2021, Li 2023, Gyimah 2024]

Erityisesti 5G- ja tulevien B5G-verkkojen tiheä tukiasemarakentaminen kasvattaa merkittävästi energiantarvetta, ja näin ollen energiantuotannon lähteillä on kriittinen merkitys verkkojen ympäristövaikutusten kannalta. Tutkimuksissa on kehitetty keskitettyjä ja hajautettuja uusiutuvan energian tuotantoratkaisuja pienisolutukiasemien (small cell BS) käyttöön. Näissä ratkaisuissa hyödynnetään esimerkiksi paikallisia aurinkopaneeleita ja energiavarastoja, joita voidaan hallita liikenteen kuormitukseen perustuvalla resurssien optimoinnilla. Simulaatiot osoittavat, että keskitetty uusiutuvan energian jakeluratkaisu voi merkittävästi parantaa verkon kustannus- ja energiatehokkuutta verrattuna hajautettuihin järjestelmiin. [Israr 2023]

Uusiutuvien energialähteiden tehokkaampi hyödyntäminen edellyttää myös älykkäitä energiavarastointiratkaisuja. Akustojen ja sähkövarastojen avulla voidaan varastoida päivällä tuotettua aurinkoenergiaa, joka voidaan käyttää illalla tai yöllä tukiasemien sähköntarpeeseen. Näin varmistetaan katkeamaton verkkopalvelu samalla kun fossiilisen energiankäytön tarve vähenee. Lisäksi näitä varastoja voidaan hyödyntää energian tasapainotukseen, esimerkiksi silloin kun kulutuspiikkejä esiintyy tai verkko tarvitsee varatehoa poikkeustilanteissa. [Israr 2023]

Uusiutuvan energian hyödyntämisen lisäksi taloudellista toteutettavuutta arvioitaessa tulee huomioida kokonaiskustannukset ja käyttökustannukset (OPEX). Vaikka aurinkoenergialla toimivat tukiasemat ovat teknisesti toteutettavissa, nykyiset laitteistokustannukset ja sähkön hinnat eivät useimmiten tee niistä taloudellisesti kannattavia ilman ulkoisia ohjausmekanismeja. Esimerkiksi mallinnustutkimuksessa todettiin, että aurinkoenergian käyttö verkon sähköistämisessä olisi taloudellisesti mielekästä vasta, jos hiilidioksidipäästöihin asetettaisiin merkittävästi nykyistä korkeampi verotus. Tämä tekisi vihreistä tukiasemista kilpailukykyisiä perinteisiin, fossiilisilla polttoaineilla toimiviin ratkaisuihin nähden [Garroussi 2023].

3.3 Mobiilimastoihin käytetyt raaka-aineet

Tämänhetkiset matkapuhelinverkkojen tukiasemat vaativat jatkuvaa jäähdytystä, joka yleensä toteutetaan aktiivisilla jäähdytyslaitteilla, kuten tuulettimilla. Jäähdytystarpeen vähentämiseksi voidaan hyödyntää uusia, lämpöä tehokkaasti johtavia komposiittimateriaaleja, jotka vähentävät merkittävästi lämpöhäviöitä tukiasemissa. Samalla kehittyneet passiiviset jäähdytysratkaisut, kuten lämpöputkijärjestelmät tai luonnollista ilmanvaihtoa hyödyntävät rakenteet, voivat korvata energiaa kuluttavat mekaaniset jäähdytyslaitteet. Tämä johtaa huomattavaan energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen vähenemiseen tukiaseman koko elinkaaren aikana, minkä lisäksi passiiviset jäähdytysratkaisut myös pidentävät laitteiden käyttöikää ja vähentävät ylläpitotarvetta. Hyödyntämällä tukiasemien valmistuksessa myös kestäviä ja säänkestäviä materiaaleja voidaan varmistaa laitteiden pitkäikäisyys, vähintään suositellun 10 vuoden toiminta-ajan saavuttaminen sekä helpottaa komponenttien purkamista ja kierrättämistä teknologian vanhetessa. [Masoudi 2019, Williams 2022]

Matkapuhelinverkkojen laiteympäristöjen suunnittelussa ollaan siirtymässä kohti ekologisesti kestävämpää toimintamallia, jossa painotetaan kiertotalouden periaatteita. Tämä näkyy erityisesti modulaaristen ja uudelleenkäytettävien rakenteiden suosimisessa. Moduulirakenteen avulla tukiaseman komponentteja, kuten lähetinvahvistimia tai prosessointiyksiköitä, voidaan vaihtaa ja päivittää ilman, että koko laite joudutaan korvaamaan uudella. Tämä vähentää sekä materiaalitarvetta että siihen liittyvää valmistuksen ja hävittämisen ympäristökuormitusta. Uudelleenkäytettävien komponenttien integrointi suunnitteluvaiheessa mahdollistaa myös laitteiden tehokkaamman huollettavuuden ja pidemmän käyttöiän, mikä pienentää koko infrastruktuurin hiilijalanjälkeä ajan myötä. [Williams 2022]

Syrjäseutujen yhteyksien parantamiseksi on pyritty kehittämään kestäviä ja edullisia ratkaisuja. Yksi näistä toteutuksista on bambusta valmistetut tornit tukiasemille. Bambulla on luonnostaan matala hiilijalanjälki verrattuna teräkseen, ja se soveltuu hyvin tukiasemarunkojen materiaaliksi etenkin kehittyvillä alueilla, joissa bambua on saatavilla paikallisesti. Tämä vähentää kuljetuksen ja materiaalien tuotannon aiheuttamia päästöjä merkittävästi. Tukiasemien sähköistämisessä voidaan hyödyntää aurinkopaneeleja, jotka yhdessä akustojen kanssa mahdollistavat täysin verkosta riippumattoman toiminnan. Lisäksi nämä tukiasemat voidaan verkottaa keskenään langattomasti, mikä muodostaa hajautetun ja resilientin viestintäverkon. Tällainen yhdistelmä bamburakenteita ja aurinkoenergiaa tarjoaa vähäpäästöisen ja

kustannustehokkaan ratkaisun alueille, joilla sähköverkkojen laajentaminen ei ole taloudellisesti tai teknisesti toteutettavissa. [Ghosh 2021, Garroussi 2023]

Aikaisemmin esiin nousi ongelma tukiasemien koteloiden ja tukirakenteiden kierrätettävyydessä. Hiilidioksidipäästöjä voitaisiin vähentää suunnittelemalla tukiasemat käyttämään uudelleenkäytettyä alumiinia tai muovia, mikä vähentää neitseellisten raaka-aineiden käyttöä ja niihin liittyviä päästöjä. Kevyempien materiaalien, kuten kevytrakenteisten komposiittien, käyttö puolestaan pienentää kuljetukseen ja asennukseen liittyvää energiankulutusta. Tämä on erityisen merkittävää silloin, kun tukiasemia kuljetetaan vaikeakulkuisiin maastoihin tai korkeille asennuspaikoille, kuten mastoihin tai katoille. Yhdessä nämä ratkaisut tukevat materiaalitehokkuutta ja pienentävät koko toimitusketjun ympäristökuormitusta. [Williams 2022, Ghosh 2021]

4. Todennäköiset muutokset tulevaisuudessa

Tulevaisuudessa mobiiliverkot tulevat kehittymään, niin että ne pystyvät käsittelemään kasvavaa kysyntää tietoliikenteelle. Ilmastotavoitteet ja energiantehokkuusvaatimukset asettavat painetta uudistaa nykyisiä ratkaisuja kokonaisvaltaisesti. Vaikka 5G-verkon käyttöönotolla odotettiin olevan merkittäviä parannuksia energiatehokkuuteen, niin todellisuudessa tarve tiheälle infrastruktuurille on lisännyt verkkojen kokonaiskulutusta monilla paikoilla. Tämän kehityksen valossa seuraavan sukupolven teknologioilta, kuten 6G:ltä ja tekoälypohjaisilta hallintajärjestelmiltä, odotetaan huomattavasti kokonaisvaltaisempaa lähestymistapaa, jossa energiankulutusta ei ainoastaan optimoida teknisin ratkaisuin vaan myös verkkojen koko toimintalogiikkaa uudistetaan. [Williams 2022, Zhang 2024]

Energiatehokkuuden parantaminen ei kuitenkaan rajoitu vain yksittäisiin komponentteihin, kuten tukiasemiin tai päätelaitteisiin, vaan edellyttää koko verkkoarkkitehtuurin uudelleenajattelua. Tulevaisuuden todennäköisiä muutoksia ovat älykkäät verkonohjausmenetelmät, kuten koneoppimiseen perustuvat lepotilaratkaisut, digital twin -teknologian integrointi verkon hallintaan sekä uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen paikallisesti. Lisäksi palveluiden personointi, generatiivisen tekoälyn kehittyminen ja laitteiden energiavaatimusten kasvu tuovat mukanaan uusia reunaehtoja, joihin verkkojen on pystyttävä mukautumaan dynaamisesti. Näiden teknologisten ja toiminnallisten murrosten kautta mobiiliverkot voivat muuttua merkittävästi kohti hiilineutraalia ja joustavaa infrastruktuuria. ["Williams 2022", "Zhang 2024", "Elwesemy 2025", "Hijjawi 2022"]

4.1 Verkkoteknologian kehitys

Tulevaisuudessa verkkoteknologian kehitys keskittyy yhä enemmän energiatehokkuuden parantamiseen ja siten hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. Kehittyvät ratkaisut, tukiasemien älykäs ohjaus, verkon komponenttien lepotilat (sleep-modes) ja solualueen dynaaminen säätö (cell zooming), mahdollistavat verkon sopeutumisen reaaliaikaisen liikennemäärän mukaan, mikä vähentää tarpeetonta energiankulutusta ilman palvelutason heikkenemistä. [Williams 2022]

Digitaalisten kaksosten (Digital Twins) hyödyntäminen suuremmassa skaalassa verkkojen suunnitteluun ja hallintaan mahdollistaa fyysisten komponenttien optimoinnin, huoltotoimenpiteiden ennakoinnin ja energiatehokkaan infrastruktuuripäivitysten suunnittelun. Uusien ratkaisujen yleistyminen edellyttää kuitenkin verkkoarkkitehtuurien uudistamista, kuten hajautettuja tai pilvipohjaisia 5G-ytimiä, joilla pyritään vähentämään redundanssia ja siirtoviiveitä sekä pienentämään operatiivista energiankulutusta [Elwesemy 2025, Hijjawi 2022]

4.2 6G

6G-verkkojen odotetaan tuovan mukanaan merkittäviä parannuksia energiatehokkuuteen ja kestävyyteen. Uuden sukupolven verkkoteknologiat pyrkivät entistä matalampaan energiankulutukseen, mikä auttaa vähentämään verkkojen ympäristövaikutuksia edelleen. Siinä missä 5G-verkoissa energiatehokkuutta parannettiin Massive MIMO ja femtotukiasemien avulla, 6G keskittyy älylliseen hallintaan ja elinkaariajatteluun. Kuitenkin kapasiteetin ja nopeuksien kasvaminen tuo omia haasteitaan. Vaikka mobiilioperaattorit lupaavatkin 6G-verkkojen tavoitteeksi saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä, pitää muistaa, että 5G-verkko ei ollut ratkaisu 4G-verkkojen tuomiin päästöihin vaan päinvastoin kasvatti energiankulutusta. [Hijjawi 2022, Zhang 2024]

Väitettä 6G-verkkojen tuomaa hiilineutraalisuutta kuitenkin tukee ratkaisut kuten älykäs energiakauppa ja dynaaminen tehtävien jakaminen (DETA). Näillä menetelmillä voidaan vähentää huomattavasti hiilidioksidipäästöjä, jopa 74,9 prosenttia verrattuna nykyisiin ratkaisuihin. 6G-verkkojen energiankulutuksen suurimmat lähteet tulevat olemaan päätelaitteiden lataaminen ja valmistusprosessit sekä verkkoinfrastruktuurin ylläpito ja pilvi- sekä reunalaskentapalvelut. DETA-ratkaisun kaltaiset älykkäät energianhallintajärjestelmät ovat kriittisiä hiilineutraaliuden tavoittelussa ja tarjoavat keinon saavuttaa energian ja resurssien tehokkaampi käyttö myös huippukuormituksen aikana. [Zhang 2024]

4.3 Generatiivinen tekoäly

Generatiivisen tekoälyn yleistyminen laitteissa ja verkoissa tuo mukanaan uusia haasteita ja mahdollisuuksia energiatehokkuuden näkökulmasta. Ensimmäisessä vaiheessa generatiivinen tekoäly toimii pääosin päätelaitteissa, mutta sen siirtyminen pilvipohjaiseksi ja aikakriittiseksi palveluksi lisää merkittävästi liikenteen määrää ja siten energiantarvetta verkkoinfrastruktuurissa. Tämän vuoksi operaattorit ovat alkaneet kehittää laatu kysynnän mukaan (QoD) rajapintoihin perustuvia verkkosiivutusratkaisuja (network slicing), joilla voidaan dynaamisesti allokoida resurssit tekoälymalli-sovellusten tarpeiden mukaisesti. Vaikka tekoälymallit voi kasvattaa energiankulutusta lyhyellä aikavälillä, sen hyödyntäminen verkonhallinnassa, kuten liikenteen ennakoinnissa, energiansäästöstrategioiden ohjauksessa tai vikojen ennustamisessa. Tarkoitus on pitkällä aikavälillä saavuttaa suuria energiasäästöjä [Jonsson 2024, Zhang 2024]

Tulevaisuudessa tullaan todennäköisesti myös hyödyntämään generatiivista tekoälyä tukiasemien dynaamisen lepotilan optimoinnilla. Tekoälymallit voivat hyödyntää paremmin historiallista dataa, kuten liikennekuormaa, kellonaikaa, säätilaa ja tapahtumatietoja, ennustaakseen tulevan liikenteen. Näiden mallien avulla järjestelmä voi ennakoida matalan kuormituksen ajankohdat ja optimoida tukiasemien virransäästötoiminnot, kuten taajuuskaistojen, kanavien tai symbolien sulkemisen, ilman että palvelutaso [Chochliouros 2021]

5. Yhteenveto

Tämä kandidaatintyö käsitteli syitä, mistä matkapuhelinverkkojen aiheuttama hiilijalanjälki johtuu, käytössä olevia ratkaisuja sen vähentämiseksi ja mitä realistisia ratkaisuja on lähitulevaisuudessa luvassa. Kirjallisuuskatsausta tehdessä kävi ilmi, että vaikka moni energiatehokkuutta kasvattava ja hiilidioksidipäästöjä laskeva menetelmä on jo olemassa laajasti käytössä, niiden käyttöönottoa ohjaa vahvasti taloudellinen kannattavuus, eikä niinkään ympäristötavoitteet. Tämä oli minulla tiedossa jo ennen katsauksen aloittamista, mutta kuitenkin korosti ilmastotoimien sidonnaisuutta liiketoimietuihin.

Tutkimus osoitti, että vaikka matkapuhelinverkot kuluttavat jatkuvasti valtavan määrän energiaa, niin silti suurin syy päästöille oli matkapuhelinverkkojen kuljetuksesta ja kasauksesta aiheutuvat päästöt. Valmistukseen käytetyn energian päästöjen ollessa kaksi ja puoli kertaa korkeampi, kuin tukiaseman käyttämä energia, sen koko elinkaaren aikana on aika huolestuttavaa ja osoittaa varaa kehitykselle materiaalivalinnoille, kuljetuksen suunnittelulle ja tehtaiden sijoittelulle.

Energiankulutuksen vähentämiselle löytyi useita ratkaisuja, mitä 5G-teknologia on tuonut. Suurimpana Massive MIMO ja OFDM-teknologia, joilla saavutetaan suuria energiasäästöjä ilman että verkon suorituskyky heikkenisi. Näiden lisäksi tehokkaiksi ratkaisuiksi energian säästämiseksi osoittautui digitaalisten kaksosten ja dynaamisen sammuttamisen hyödyntäminen entistä tarkemman ja reaaliaikaisen energiahallinnan.

Uusiutuvien energianlähteiden käyttäminen käyttö matkapuhelinverkoissa tarjoaa potentiaalin huomattaviin hiilidioksidipäästö vähennyksiin. Erityisesti alueilla, jossa ei ole tarjolla suurta sähköverkkoa ja energianlähteet perustuvat päästelijäisiin polttoaineisiin. Kuitenkin nykyisillä energia- ja laitehinnoilla uusiutuviin energianlähteisiin pohjautuvat ratkaisut eivät vain ole vielä taloudellisesti kannattavia mobiilioperaattoreille. Tämän korjaamiseen todennäköisesti tarvitaan poliittisia ohjauskeinoja, kuten hiiliverotusta tai uusiutuvan energian käyttökannustumia.

6G teknologia ja generatiivisen tekoälyn käyttö matkapuhelinverkkoja varten ovat vielä kehityksen alla. Ne kuitenkin tarjoavat lupaavia keinoja verkkojen optimointiin. Tämä vaatii kuitenkin uutta infrastruktuuria ja todennäköisesti kaikki mitä nyt luvataan, esittäytyy toisenlaisena, kun nämä teknologiat tulevat vihdoin tavalliseen käyttöön.

Kokonaisuudessaan tutkimus osoitti, että vaikka teknisiä ja rakenteellisia ratkaisuja matkapuhelinverkkojen hiilijalanjäljen pienentämiseksi on runsaasti, niiden vaikutus on usein rajallinen ilman taloudellisesti kannattavia toteutustapoja tai poliittisia ohjauskeinoja. Kestävämpi mobiiliverkko edellyttää kokonaisvaltaista lähestymistapaa, jossa yhdistyvät teknologia, talous ja politiikka.

6. Lähteet

1 Albreem, M. A. M., Juntti, M. ja Shahabuddin, S. Massive MIMO Detection Techniques: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials,* 2019, vol. 21, nro 4, s. 3109–3132. DOI: 10.1109/COMST.2019.2935810

2 Chien, W.-C., Jeon, G. ja Cho, H.-H. Multi-objective optimization of 3D cell deployment in sustainable B5G/6G networks: Balancing performance and sustainability. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2025. DOI: 10.1109/TNSM.2025.3545622.

3 Chochliouros, I. P., Kourtis, M.-A., Spiliopoulou, A. S., Lazaridis, P., Zaharis, Z., Zarakovitis, C. ja Kourtis, A. Energy Efficiency Concerns and Trends in Future 5G Network Infrastructures. *Energies*, 2021, vol. 14, nro 17, s. 5392. DOI: 10.3390/en14175392.

4 Elwesemy, S. E. A., Ali, A. W., Riyad, M. E., Ahmed, B. A. ja Elbadawy, H. M. Enhancements of digital twinning in reducing the carbon footprint of mobile communication networks. Teoksessa: *IEEE 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 2025. IEEE, 2025. DOI: 10.1109/REEPE63962.2025.10971127.

5 Garroussi, Z., Badirou, A. W., D'Amours, M., Girard, A. ja Sansò, B. On the economic viability of solar energy when upgrading cellular networks. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2023, vol. 7, nro 2, s. 744–758. DOI: 10.1109/TGCN.2022.3223622.

6 Gerasimenko, M., Moltchanov, D. et al. Cooperative radio resource management in heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Access*, 2015, vol. 3, s. 397–406. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2422266.

7 Ghosh, S., Marbaniang, A. L. et al. Bamboo towers: A low-cost and sustainable technology for connecting the unconnected regions. Teoksessa: *IEEE 4th 5G World Forum (5GWF)*, 2021. IEEE, 2021, s. 523–528. DOI: 10.1109/5GWF52925.2021.00098.

8 Gonçalves, L. C., Sebastião, P., Souto, N. ja Correia, A. 5G mobile challenges: A feasibility study on achieving carbon neutrality. Teoksessa: *23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, Thessaloniki, Kreikka. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ICT.2016.7500443.

9 Gyimah, J., Nyantakyi, G. ja Isaac, S. H. The effect of renewable energy on carbon emissions through globalization. *Heliyon*, 2024, vol. 10. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26894.

10 Hijjawi, M., Al Shinwan, M., Qutqut, M. H., Alomoush, W., Khashan, O. A., Alshdaifat, M., Alsokkar, A. ja Abualigah, L. Improved flat mobile core network architecture for 5G mobile communication systems. *International Journal of Data and Network Science*, 2023, vol. 7, nro 3, s. 1421–1434. DOI: 10.5267/j.ijdns.2023.3.021.

11 Israr, A., Yang, Q. ja Israr, A. Emission-aware sustainable energy provision for 5G and B5G mobile networks. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2023, vol. 8, nro 4, s. 670–681. DOI: 10.1109/TSUSC.2023.3271789.

12 Jonsson, P. *Ericsson Mobility Report: November 2024*. Verkkodokumentti. Ericsson, 2024. Viitattu 10.3.2025. Saatavissa: https://www.ericsson.com/4adb7e/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2024/ericsson-mobility-report-november-2024.pdf

13 Lee, D., Jang, G., Ha, T., Oh, J. ja Cho, S. BS deployment strategy and energy efficient BS switching in heterogeneous networks for 5G. Teoksessa: *International Conference on Information Networking (ICOIN),* Jeju, Etelä-Korea. IEEE, 2021, s. 727–729. DOI: 10.1109/ICOIN50884.2021.9333890.

14 Li, T., Yu, L., Ma, Y., Duan, T., Huang, W., Zhou, Y., Jin, D., Li, Y. ja Jiang, T. Carbon emissions and sustainability of launching 5G mobile networks in China. *ArXiv preprint arXiv:2306.08337v1*, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.08337.

15 Liu, Y.-H. ja Kung, B.-C. Energy saving in 5G cellular networks using machine learning based cell sleep strategy. Teoksessa: *Proceedings of the Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS),* 2023, IEEE.

16 Masoudi, M., Khafagy, M. G. et al. Green mobile networks for 5G and beyond. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, s. 107270–107299. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932777.

17 Mathur, R. P., Pratap, A. ja Misra, R. Distributed Algorithm for Resource Allocation in Uplink 5G Networks. Teoksessa: *Proceedings of the 7th ACM International Workshop on Mobility, Interference, and Middleware Management in HetNets (MobiMWareHN'17*). ACM, 2017, DOI: 10.1145/3083201.3083204.

18 Min, Y. ja Jiaji, Z. Key technologies of physical layer of radio and television wireless network based on 5G wireless communication network. Teoksessa: *2022 World Automation Congress (WAC)*, San Antonio, Texas, USA. IEEE, 2022, DOI: 10.23919/WAC55640.2022.9934135

19 Rose, L. S. G. ja Roseline, A. A. A Survey on HetNet to Enhance QoS in 5G Network Using Various Techniques. *Smart Intelligent Computing and Communication Technology*, 2021, vol. 38, s. 506–510. DOI: 10.3233/APC210092.

20 Su, X., Sun, E., Li, M., Yu, F. R. ja Zhang, Y. A survey on energy efficiency in cellular networks. *Communications and Network*, 2013, vol. 5, s. 654–660. DOI: 10.4236/cn.2013.53B2117.

21 Yan, X., Xuan, X., Wang, P., Tai, X. ja Liu, L. Design and Implementation of 5G NR Physical Layer Signal Simulation Software. Teoksessa: *2023 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Qingdao, Kiina, IEEE, 2023. DOI: 10.1109/ICMMT58241.2023.10276389.

22 Williams, L., Sovacool, B. K. ja Foxon, T. J. The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 157, artikkeli 112033. DOI: 10.1016/j.rser.2021.112033.

23 Zhang, P., Xiao, Y., Li, Y., Ge, X., Shi, G. ja Yang, Y. Toward net-zero carbon emissions in network AI for 6G and beyond. *IEEE Communications Magazine*, 2024, vol. 62, nro 4, s. 58–64. DOI: 10.1109/MCOM.003.2300175.