



TIEDONSIIRRON VAIKUTUS LÄHIVERKOSSA KÄYTTÖJÄRJESTELMÄLLÄ WINDOWS 10

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tietotekniikan kandidaatintyö

2024

Jericho Koskinen

Tarkastaja: Professori Ari Happonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Tietotekniikan koulutusohjelma

Jericho Koskinen

Tiedonsiirron vaikutus lähiverkossa käyttöjärjestelmällä Windows 10

Tietotekniikan kandidaatintyö

2024

32 sivua, 6 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastaja(t): Professori Ari Happonen

Avainsanat: Lähiverkko, tiedonsiirto, kaista, pakettikoot, laitteiston kuormitus, käyttöjärjestelmä

Sovellusten, ohjelmistojen ja laitteiden tiedonsiirron kulutus on kasvanut. Tämä tarkoittaa sitä, että korkeakaistaisia verkkoyhteyksiä tarvitaan enemmän kuin koskaan. Suomen markkinoilla on aloitettu 10-gigabitin valokuituliittymien myynti asuntoihin. Kuitenkin 10Gbits/s tiedonsiirto vaatii paljon suoritusnopeutta ja oikeat laitteistot. Tässä kandidaatintyössä selvitämme tiedonsiirron vaikutusta lähiverkossa hyödyntäen markkinoiden suosituinta käyttöjärjestelmää Windows 10.

Tutkimuksessa selviää, että ilman tehokasta laitteistoa on jopa vaikea saavuttaa gigabitin tiedonsiirto langallisessa lähiverkossa. Tutkimuksessa hyödynnetään erilaisia verkon konfiguraatiokeinoja, joilla on todettu aiemmissä tutkimuksissa tiedonsiirron parannusta. Jumbo-paketinkoot ovat yksi keinoista, jolla saadaan maksimoitua tiedonsiirron tehokkuutta.

Tässä työssä selviää tarkemmin tarvittavat verkkokonfiguraatiot, laitteet, oheislaitteet sekä työkalut, joita tarvitaan optimaalisen tiedonsiirron toteutukseen. Työn tulosten perusteella Windows -käyttöjärjestelmän jumbo-paketinkokojen implementoinnissa ilmenee vaihtelevia tuloksia. Tutkimuksessa vertaillaan myös tuoreinta Wifi7 -teknologiaa langalliseen lähiverkkoyhteyteen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Software Engineering

Jericho Koskinen

How data transmission affects Windows 10 in local area network

Bachelor's thesis 2024

32 pages, 6 figures, 3 tables

Examiners: Professor Ari Happonen

Keywords: Local area network, data transmission, bandwidth, maximum transmission unit, hardware stress, operating system

The consumption of data transmission in applications, software, and devices has increased, meaning that high-bandwidth network connections are more necessary than ever. In the Finnish market, the sale of 10-gigabit fiber optic connections to residences has begun. However, achieving 10Gbits/s transmission requires significant processing power and the right hardware. In this bachelor's thesis, we investigate the impact of data transmission on a local area network utilizing the most popular operating system in the market, Windows 10.

The research reveals that without efficient hardware, achieving gigabit transmission in a wired local area network can be challenging. Various network configuration methods are utilized in the study, which have been proven in previous research to improve data transmission. Jumbo frames are one of the methods used to maximize data transmission efficiency.

This work dives deeper into the necessary network configurations, devices, peripherals, and tools required for optimal data transmission implementation. Based on the results of the study, jumbo packet sizes in data transmission give mixed results. The study also compares the latest Wifi7 technology to wired local area network connection.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto	3
1.1	Tausta	3
1.2	Tavoitteet ja rajaukset	3
1.3	Toteutus	4
2	Kirjallisuuskatsaus.....	5
2.1	Standardit.....	5
2.1.1	Kaapelointi	6
2.1.2	IEEE-Standardit	7
2.1.3	Pakettikoot ja Jumbo-ikkunat	7
2.2	Kehitys tutkimuksissa	8
2.3	Tutkimusten pääpiirteet.....	10
2.4	Laajakaistan kysyntä.....	11
3	Ratkaisumenetelmät	13
3.1	Pöytätietokoneet	13
3.2	Verkkokortit	14
3.3	iPerf3- työkalun hyödyntäminen.....	14
3.4	Windows 10- käyttöjärjestelmän konfigurointi	15
3.5	Tehtävienhallinnan hyödyntäminen	16
4	Tulokset	18
4.1	Oletuslaitteistolla testiajot.....	18
4.2	Tehokkaampien verkkokorttien testaus.....	19
4.2.1	Palvelintietokoneen vaihtaminen ja sen vaikutus	20
4.3	Reitittimien vaikutus lähiverkossa	21
5	Tulosten analysointi.....	23
6	Johtopäätökset	26
	Lähdeluettelo	27

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

FTTH	Fiber-to-the-home (Kuitu Kotiin-verkko)
Gbits/s	Gigabittiä sekunnissa
Gb	Gigabitti
IB	Infiband
IPoIB	IP over Infiband (Infiband IP-protokollassa)
I/O	input/output -moduuli
Jumbo	Tiedonsisällön määrä enemmän kuin 1500 MTU
Mb	Megabitti
Mbits/s	Megabittiä sekunnissa
MHz	Megahertsi
MTU	Maximum transmission unit (Maksimi tiedonlähetyksen määrä)

1 Johdanto

Tässä luvussa käsitellään kandidaatintyön taustaa, tavoitteita ja rajoituksia sekä toteutusta. Taustassa käsitellään tutkimuksen motivaattoreita, jotka inspiroivat tutkimuksen tekemiseen. Tavoitteet ja rajaukset osiossa käsitellään tutkimuksen tarkempia tavoitteita, joita tutkimuksen aikana käsitellään. Rajauksissa käsitellään tutkimuksen kannalta tarkemmin osalualueita, joita käsitellään tai ei oteta huomioon. Viimeisenä toteutuksessa käsitellään tutkimuksen toteutusta, jossa käydään läpi tutkimusympäristöä sekä teknologioita.

1.1 Tausta

Teknologian kehityksen yhteydessä tarve tiedonsiirrolle yleensä kasvaa. Sovellukset, ohjelmistot sekä laitteet tarvitsevat enemmän kaistaa kuin aiemmin toimiakseen optimaalisesti. Vuonna 2024 tietokoneiden käyttöjärjestelmistä yli 70 % markkinaosuuden omistaa Microsoftin Windows (StatCounter, 2024). Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, onko korkea-kaistaisen laajakaistan hankinta kannattavaa Pk-yritysten tai pienasuntojen tiloihin. Lisäksi pyritään ymmärtämään, mitä hyötyä tällaisesta hankinnasta voisi olla. Korkean tiedonsiirron kulutuksen myötä on tärkeä miettiä markkinoiden nopeimpia ratkaisuja ja miten ne saadaan toteutettua käytännössä ja miten niistä hyötyy. Tutkimuksessa selviää Windows 10 -käyttöjärjestelmällä toimivien tietokoneiden rajoitteet tiedonsiirrossa ja kuinka se vaikuttaa eri laitteistolla varustettujen tietokoneiden toimintakykyyn. Tutkimuksessa tarkemmin vertaillaan modernin pöytätietokoneen ja poistoikkää lähellä olevan pöytätietokoneen skaalautuvuutta erityisesti prosessorin kuormituksessa. Tutkimus on ajankohtainen, sillä erityisesti heikon laitteiston kanssa voi syntyä ongelmia jopa gigabitin tiedonsiirrossa. Tällaisia tilanteita voi esiintyä esimerkiksi yrityksissä, jotka eivät ole päivittäneet laitteistoansa tarpeeksi modernille standardille. Tutkimus antaa hyödyllistä tietoa tiedonsiirron vaikutuksista, joka voi auttaa mm. yritysten johtoa saavuttamaan potentiaalinsa laitteiston kanssa.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Työn tavoitteena on saada hyvä käsitys siitä, voiko Windows 10 Home / Pro -käyttöjärjestelmä versiolla varustetulla tietokoneella saada toimivan ratkaisun tiedonsiirron suhteen. Tietoteknisissä artikkeleissa ja aiemmissä tutkimuksissa on tavoiteltu saavuttaa

mahdollisimman korkea tiedonsiirto, mutta tietokoneen toiminnallisuutta tämän ohella ei olla varsinaisesti kuvailtu. Tutkimuksemme avainasemassa on käyttökokemus tiedonsiirron yhteydessä ja miten se voidaan saavuttaa ja kuinka saavutettavissa se on.

Suomen teleoperaattorimarkkinoilla myydään jo entistä tehokkaampia laajakaistaliittymiä. Valokuituoperaattori Lounnea myy jo 10G -valokuituliittymiä pari- ja omakotitaloihin (Lounnea). Tämän liittymän avulla voidaan siis saada tiedonsiirron nopeudeksi 10Gbits/s. Myös valokuituoperaattori Valoo on tuomassa 20G -valokuituliittymiä markkinoille, jotka ovat tällä hetkellä jo ennakkotilattavissa (Valoo, 2023). Näiden liittymien nopeudet kiehtovat, mutta näiden nopeuksien toteuttamisessa on omat haasteensa. Tässä tutkimuksessa on tavoitteena tuoda läpinäkyvyyttä ja asiantuntemusta näiden kaltaisten tiedonsiirtojen toteuttamiseen ja miten tämä korreloituu laitteiston suorituskykyyn.

Empiirisen tutkimuksen myötä, selviää korkean kaistan priorisointi sekä realiteetti kotitalouksissa tai Pk-yrityksien tiloissa. Tutkimuksen tavoitteena ei ole paneutua sen enempää itse internet-topologiaan tai kehityskeinoihin verkkoprotokollien suhteen. Empiirisessä tutkimuksessa keskitytään sisäverkon toimintaan. Tutkimustuloksilla analysoidaan kriittisesti mitä, milloin ja miten yritystilat ja kotitaloudet hyötyvät korkeasta tiedonsiirrosta lähiverkossa. Tutkimuksessa erityisesti tarkkaillaan Windows 10 -käyttöjärjestelmän toimintaa ja skaalautuvuutta tiedonsiirron suhteen.

1.3 Toteutus

Tutkimuksessa mittaukset tehdään kahden pöytätietokoneen muodostaman yhteyden välillä. Tutkimuksessa hyödynnetään erilaisia laitteistoja sekä työkaluja, jonka avulla saadaan mitattua tietoa tiedonsiirron nopeudesta tietokoneen kuormitukseen asti. Tällä halutaan osoittaa todellinen näkemys siitä, mitä voidaan saada aikaiseksi Windows 10 -käyttöjärjestelmän ja erilaisten laitteistojen ohella.

Käyttöjärjestelmän suhteen, testit tehdään nopeusluokkaan suhteutuvilla optimoinneilla ja oletuskonfiguraatioilla. Tämä tarkoittaa sitä, että kuka tahansa Windows 10 -lisenssin omaava pääsee testaamaan tiedonsiirron sujuvuutta tietokoneessa. Tutkimuksessa testataan lähiverkon toimintaa lähtökohtaisesti Ethernet-teknologiaa hyödyntäen, mutta otannan vuoksi testataan myös tuoreinta Wifi7-teknologiaa. Langattoman lähiverkon testaamisen avulla, näemme tiedonsiirrossa eroavaisuuksia myös eri työympäristöissä.

2 Kirjallisuuskatsaus

Yleensä tämän kaltaisissa tutkimuksissa on testattu maksimaalista tiedonsiirron nopeutta. Vuonna 2003 on jo testattu 10.3gb/s siirtonopeutta ja paljon tästä saadaan irti (Hurwitz, 2003). Tällöin selvisi, että kyseiseen potentiaaliin ei päästy, koska I/O-viive sekä prosessorien kyky siirtää dataa ei ollut vielä tarvittavalla tasolla. Kuitenkin tämän jälkeen laitteistot ovat kehittyneet merkittävästi ohjelmistojen, ajureiden sekä verkkoalgoritmien lisäksi. Myöhemmin on myös harkittu viiveen vaikutusta tiedonsiirrossa liikkuvien pakettien kulkuun ja tehty tästä tutkimusta. Infinibandin eli IB:n myötä on havaittu, että mahdolliset viiveet voidaan eliminoida eri I/O testauksissa (Koehler, 2014). IB ei kuitenkaan ole vielä yleinen kuluttajakeskeinen lähiverkkoprotokolla. Tämä kuitenkin osoittaa, että pelkästään verkon protokollaa vaihtamalla pystymme eliminoimaan suurimman osan viiveistä. Ethernet-perusteisia ratkaisuja on myös kriittisesti testattu ja käsitelty. On esimerkiksi huomattu Ethernet-ratkaisuiden heikkous All-To-One-tietoliikenne rakenteissa. (IEEE, 2022). Tällä viitataan artikkelissa siihen, että kaikkien yhteyksien kaistanopeus on yhtenäinen.

Kaikki kyseiset konseptit ovat läsnä meidän tutkimuksessamme, mutta tutkimuksen tavoitteena on saada teoreettinen ajatus siitä, millainen on lähiverkon toiminta ja mitkä ovat realiteetit kyseiselle teknologialle. Tässä luvussa analysoidaan aiempaa kirjallisuutta sekä standardeja lähiverkolla toteutettua tiedonsiirtoa kohtaan. Kirjallisuutta ja standardeja hyödynnetään empiirisessä tutkimuksessa. Aiempien tuloksien ja standardien myötä pystymme vertailemaan empiirisen tutkimuksen tuloksia aiempiin tuloksiin.

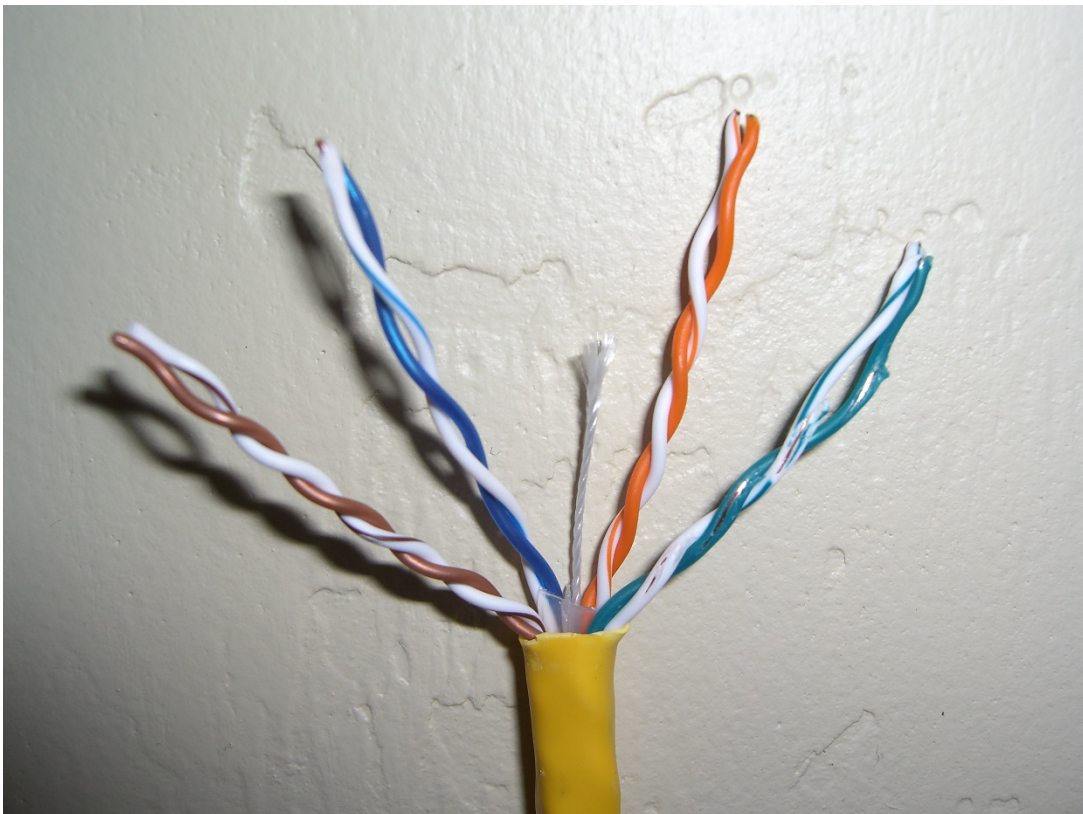
2.1 Standardit

Tutkimuksen oikeudellisuuden myötä on tärkeä kertoa tutkimukseen kohdistuvista standardeista. Tulokset tutkimuksesta tulevat tarkalleen perustumaan standardeihin, jota laitteet, oheislaitteet sekä protokollat noudattavat. Standardit asettavat teoreettisen potentiaalin, mutta on toinen asia päästä siihen potentiaaliin.

2.1.1 Kaapelointi

Tutkimuksessa käytetään enimmäkseen Ethernet-teknoologiaan perustuvaa ratkaisua. Tämä on yleisin lähiverkkotekniikka. Kaapeloinnin osalta käytetään CAT-kaapeleita, jotka ovat standardisoituja kuparikaapeleita sekä valokuitukaapeleita. Kyseisiä kaapeleita käytetään Ethernet-yhteyksissä lähtökohtaisesti. Kuvassa 1 näkee, miltä CAT-6-kaapeli näyttää ilman RJ-45-liitintä. Kupariset kierretyt parikaapelit aiheuttavat TEM-aaltomuodon kaapelin sisällä, jonka avulla tietoa siirryy (Souza, 2019). Tutkimuksessa tullaan yhdistämään CAT-kaapeleiden avulla laitteet yhteen. Tämä luo langallisen lähiverkon kahden tietokoneen välille. Käydään läpi nyt tarkemmin CAT-kaapelien määritelmiä sekä standardeja.

Tutkimuksessa toteutetaan lähiverkossa ANSI/TIA-568-C standardia. Tämä on 1980-luvulla perustettu standardi telekommunikaatio -määritelmistä (Woodward, 2014). Tutkimuksessa käytetään standardin tukemaa kaapelia, joka on standardia ANSI/TIA-568-C.2 noudattava *Category 8* -kaapeli (CAT-8). Kyseistä kaapelia käytetään, koska se tukee 2000MHz:n kaistanleveyttä. Tämä on tutkimuksen kannalta hyvä ratkaisu. Tämä johtuu siitä, että tämä tukee tiedonsiirtoa nopeuteen 40Gb/s asti.



Kuva 1: CAT6-kaapelin kierretyt parikaapelit (Agott, 2009)

2.1.2 IEEE-Standardit

IEEE-standardit ovat teollisuuden ja teknologian keskeisiä standardeja (IEEE Standards). Tutkimuksessa tutkitaan Ethernet-teknologiaan perustuvaa langallista lähiverkkoyhteyttä. IEEE sertifioi IEEE 802.3 -standardin vuonna 1985 (Fontana, Nuvolari & Verspagen, 2009). IEEE 802.3 on keskeisin Ethernet-lähiverkkoyhteyksien standardi. Tähän kuuluvat Ethernet kortit sekä kaapelit (Toy & Cankaya, 2017). Teknologisen kehittymisen myötä on IEEE 802.3 kehittynyt vuosien varrella. Vuonna 1995 standardisoitiin jo IEEE 802.3u, jossa pystyttiin jo CAT-5-kaapeleilla saavuttamaan nopeudeltaan 100mb/s fyysinen signaali (IEEE Standards 802.3u). Tutkimuksessa on käytössä eri nopeuksia tukevia verkkokortteja, jotka noudattavat kuitenkin IEEE 802.3ba -standardia. Standardin arkkitehtuurilla voidaan saavuttaa tiedonsiirrolla nopeus 40gb/s ja 100gb/s (Law & D'Ambrosia, 2009). IEEE-standardien myötä on pystytty tiedonsiirron suurinta kapasiteettia kasvattamaan. Tutkimuksessa standardit ovat läsnä, sillä erilaisten standardisoitujen laitteistojen myötä pystytään Ethernet lähiverkkoyhteydellä muodostamaan mahdollisimman korkean tiedonsiirron työympäristössä.

2.1.3 Pakettikoot ja Jumbo-ikkunat

Tiedonsiirrossa voidaan määritellä pakettienkokoja eri kokoisiksi. Pakettikokojen optimointi parantaa tiedonsiirtoa, viivettä sekä suorituskykyä tietokoneessa. Tämä perustuu siihen, että tiedonsiirrossa jokainen paketti sisältää enemmän tietoa pitäessään verkon viiveen samantapaisena (Ethernet Alliance, 2009). Alkuperäisessä IEEE 802.3 -standardissa määritettiin Ethernet-ikkunan kooksi 1500 tavua. Tähän standardiin on kehitetty uusia standardeja saada lisää tavuja Ethernet-ikkunaan.

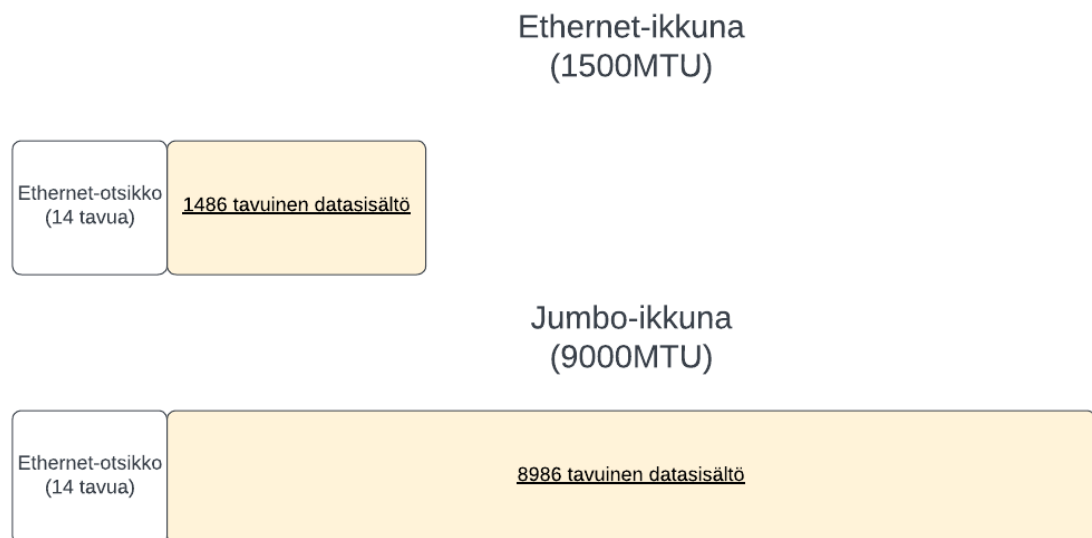
Jumbo-ikkunoissa pakettikoko on yli IEEE 802.3 -standardin eli 1500 tavua ja maksimissaan 9000 tavua (Narayan & Lutui, 2013). Artikkelissa puhutaan tämän olevan ratkaisu tiedonsiirron maksimointiin ja tämä todetaan heidän tekemissään testeissä. Tutkimuksessa huomioidaan kuitenkin, että vanhimmalla Windows -palvelinlisenssillä saatiin IPv4 -protokollaa hyödyntäen tasaisesti alhaisia tiedonsiirron läpisyöttöjä.

Kuvassa 2 nähdään normaalin Ethernet-ikkunan ja Jumbo-ikkunan eroavaisuudet. Tämän lisäksi Ethernet-otsikko on pakollinen osio, jokaista ikkunaa kohden. Jumbo-ikkunan ideana on prosentuaalisesti saada enemmän tiedonsiirtoa, kun Ethernet-otsikoita tulee vähemmän.

Tämän lisäksi jokaisen ikkunan lähetyksen jälkeen kaikilla ikkunoilla on oma taukonsa, joten taukojakin tulee vähemmän Jumbo-ikkunoissa. MTU:lla viitataan yhden ikkunan maksimaaliseen siirtoon. MTU sisältää kaikki otsikot sekä datasisällön.

Voidaan laskea pakettien määrät sekunnissa hyödyntäen kuvaa 2. Yksi paketti sisältää Ethernet-otsikon sekä datasisällön. Kuvassa 2 yhden ikkunan kokonaiskoko siirrossa eli MTU on Ethernet-ikkunoilla 1500 tavua ja Jumbo-ikkunoilla 9000 tavua. Voidaan kuvitella kaistan nopeudeksi tarkalleen 100Mbps/s. Tämä olisi $10 \cdot 10^6$ bittiä sekunnissa (Kaava 1). Tässä vaiheessa pitää määritellä paketinkoko bitteinä. Ethernet-ikkunoilla se on $1500 \cdot 8 = 12000$ bittiä (Kaava 2). Tällöin saadaan paketit sekunnissa laskettua Ethernet-ikkunalta kaavalla $\frac{100 \cdot 10^6}{12000} = 8333.33$ pakettia sekunnissa (Kaava 3).

Samalla menetelmällä lasketaan Jumbo-ikkunoilla paketit sekunnissa. Tällöin saadaan se laskettua kaavalla: $\frac{100 \cdot 10^6}{72000} = 1388.89$ pakettia sekunnissa (Kaava 4). Tästä seuraakin kysymys, miksi pakettien määrä on hyvä olla vähäistä? Tämä johtuu siitä, että prosessorin kuormitukseen vaikuttaa sen käytettyjen syklien määrä. Pakettien määrän laskiessa, prosessorin ei tarvitse hyödyntää niin montaa sykliä. (Ethernet Alliance, 2019).



Kuva 2: Yksinkertaistettu versio Ethernet-ikkunasta sekä Jumbo-ikkunasta

2.2 Kehitys tutkimuksissa

Ethernet-tekniikan tutkimuksissa on huomattu jatkuvasti kehitystä myös teknologian osalta. Prosessorit ja muut oheislaitteet ovat kehittyneet tasoon, jossa tiedonsiirron määrää voidaan

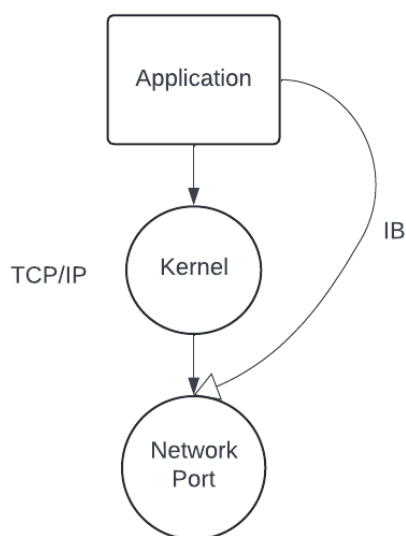
kasvattaa. Jo vuoden 2006 tehdyissä tutkimuksissa on huomattu kotitalouksien verkkojen siirtonopeuksien ero vain CAT-6-kaapelin implementoinnilla (Les, 2006). Artikkelissa on kaavio, jossa vertaillaan CAT-5e- sekä CAT6 -kaapeleita keskenään. Artikkelissa tiivistetään tarkemmin kahden kaapeloinnin vertailua seuraavanlaisesti: “CAT-6 kaapeloinnissa on 2,5 kertaa enemmän kaistaa, puolet vähemmän signaalin heikkenemistä sekä kymmenesosa vähemmän ristiinhäiriötä”. Ennätyksiäkin korkeasta laajakaistasta on tehty. Nokia ja Orange saavuttivat 250Gb/s kaistan Puolassa vuonna 2016 (Nokia, 2016). Artikkelin mukaan tämä saatiin aikaiseksi käyttäen kuusi kantaista superkanavaa, joka käytti 300Ghz kaistanleveyttä tavallisen kuituoptysen kaapelin kautta. Artikkelissa kuvaillaan Orange yritystä edelläkävijänä kasvavassa laajakaistan kysynnässä (Nokia, 2016)

Suurteholaskentajärjestelmien kasvaessa on huomattu skaalautuvuuden tärkeys. Tämän vuoksi on koitettu löytää ratkaisua, jotta tiedonsiirrossa voitaisiin nähdä samanlainen kehitys laitteistojen kuten prosessorien suoritustehossa. Tämän vuoksi kehitettiin SDP-protokolla, joka on tavuvirtainen siirtokanava, joka on hybridiverkostoinen (Balaji, Bhagvat, Thakur, Panda, 2008). SDP-protokolla on suunniteltu IB:n tueksi. Artikkelin mukaan SDP-protokolla yhdistää tavallisen TCP/IP-protokollan erilaisilla optimoinneilla, jotka auttavat korkea nopeuksissa tiedonsiirroissa. Artikkelissa mainitaan myös, että SDP-protokolla on optimaalinen suurteholaskennalle, koska tällä voidaan saada vähemmän viivettä, enemmän läpisyötöä ja tasapainotusta laitteistolle. Tämä protokolla käytännössä pystyy tasapainoittamaan erilaisia verkossa tapahtuvia tehtäviä esimerkiksi verkkokorteille, kun perinteisesti kaikki tietojenkäsittely tapahtuu vain prosessorin puolella.

IB-teknologiassa isoin hyöty löytyy sen ominaisuudesta oikosiirtää tietoa tietokoneen laitteistolta toiselle. Tämä tarkoittaa sitä, että IB-protokollaa hyödyntäen esimerkiksi näytönohjaimet voivat siirtää tietoa keskenään ilman sen olevan vaikutuksessa käyttöjärjestelmään. Tätä teknologiaa hyödyntäen vertailtiin virtuaali-näytönohjainten ja paikallisten näytönohjainten toimivuutta 100 gigabittisessä IB-verkossa (Reaño, Silla, Shainer, Schultz, 2015). Tuloksista huomattiin, että tiedonsiirto pysyi monissa tapauksissa hyvin samanlaisena paikallisiin näytönohjaimiin verrattuna. Virtuaali-näytönohjaimissa tunnistettiin, että suorituskyky on joissain ohjelmistoissa parempi verrattuna paikalliseen näytönohjaimeen. Artikkelissa havaitut tulokset ovat innovatiivisia, sillä se todistaa sen, että esimerkiksi suurten palvelinten hallinnointiin ei tarvita investoida todella moneen fyysiseen näytönohjaimeen. Sen

sijaan voidaan investoida yhteen virtuaali-näyttöohjaimen, jota monet palvelintietokoneet käyttävät ja tällä tavalla säästetään resursseja.

TCP/IP-protokollan ja IB-protokollan ero havaitaan RDMA- teknologiassa, joka on tapa päästä suoraan vastakkaisen laitteen luokse tiedonsiirrossa ilman, että tietokoneen ytimen kautta tarvitsee mennä. Perinteisesti TCP/IP-protokollassa, tieto siirtyy koneelta toiselle tietokoneen ytimen kautta. Kuvassa 3 on havainnollistettu näiden eroa paremmin.



Kuva 3: Havainnollistava kuva TCP/IP- ja IB-protokollien eroavaisuuksista

2.3 Tutkimusten pääpiirteet

Mitä useammin Ethernet-tekniikkaan ja korkeisiin siirtonopeuksiin liittyvissä tutkimuksissa on selvitetty korkeaa lopputulosta tai tehokasta toimintaa. Kuten esimerkiksi kuinka paljon siirtonopeutta on saatu toteutettua suurissa määrissä serveri koneilla (Super Micro Computer Inc., 2015). Artikkelissa todetaan, että Super Micron innovaatiot ovat tulevaisuus teknologisen tehokkuuden, tiheyden sekä siirtonopeuksien kannalta. Kuitenkin tässä tutkimuksessa käsitellään ”normaalin” tietokoneen toimintaa. Tämä tarkoittaa tietokonetta, jossa on käyttöjärjestelmänä Windows 10 ja laitteistot tietokoneissa ovat lähtökohtaisesti saatavilla. On tärkeää tutkia käyttöjärjestelmän mahdolliset ongelmat korkeissa tiedonsiirtomäärissä.

2.4 Laajakaistan kysyntä

Ethernet lähiverkkoyhteys on tunnetuimpia ja käytetyimpiä lähiverkkoyhteyksiä maailmanlaajuisesti. Kuitu kotiin (FTTH) -verkot ovat aina olleet lopullinen ratkaisu tulevaisuudenkestävälle laajakaistaverkolle (Effenberger & Lu, 1996). Artikkelin on viime vuosituhanelta, mutta silti tämä on ollut jo keskustelun aiheena jo pitkään. Isoimmat esteet ennen ovat olleet hinta sekä kaistapohjaiset applikaatiot (Effenberger & Lu, 1996). On kuitenkin pystytty pääsemään pisteeseen, jossa on nähty FTTH-verkkojen hyöty. Teknologian kehittyessä kaistan kysyntä on ollut suuressa kasvussa (Janjua & Khan, 2007). Artikkelissa kuvailtiin jo vuonna 2007, että kaistan kysyntä tulee olemaan isommassa tarpeessa tulevaisuudessa. Tämähän pitää paikkansa, jos katsotaan nykypäivää. Kontekstina Espanjassa 76 %:a talouksista omistaa yli 100Mbits/s (Arvantinos, E. et al., 2021)

Ruotsissa on katsottu FTTH-verkkoa tarkoin silmin jo pitkään. Jo vuonna 2006, 20 % kaikista laajakaista ratkaisuista ovat olleet FTTH-verkkoa, mikä oli aikoinaan maailman suurin osa (Mattson & Jacobsen, 2006). Samoina aikoina Ruotsissa oli maailman isoin osa yli 2mb/s yhteyksiä. Jos kuvitellaan, että tämä perustuu Ruotsiin ja vuoteen 2006 niin voidaan kuvitella kuinka paljon kysyntä ja tarve laajakaistaratkaisuille erityisesti FTTH-verkoille on kasvanut miltei 20 vuodessa. Voidaan tehdä oletus, että kysyntä on raketoinut maailmanlaajuisesti vuosituhanen alusta asti.

Miksi tarvitaan lisää kaistaa? Kuten on jo mainittu aiemmin, applikaatiot ja resurssit vaativat nykyään enemmän kaistaa toimiakseen paremmin. Kuitenkin vuosituhanen alussa videot ovat olleet huonolaatuisimpia, tiedostot pienempiä ja teknologia heikompa. Varsinkin 2020-luvun aikoina on huomattu kuitenkin, että kaistaa tarvitaan enemmän jopa perus verkko toiminnallisuuksien saavuttamiseksi. Vuoden 2021 Telekommunikaatiopolitiikan artikkelissa kerrotaan erittäin korkean kaistan kysynnästä vuonna 2025 (Martins & Wernick, 2021). Artikkelissa on mm. listattu yleisimpiä kaistan kulutuksen resursseja ja niiden optimaalista tiedonsiirron määrää. Arvioiden mukaan esimerkiksi mediasisältö (4k, 3D, HD) vaatii noin 150mbit/s latausnopeuden vuonna 2025, missä mainitaan viiveen ja pakettihäviö merkittävyys myös. Tästä arviosta voidaan päätellä, että monelle ihmiselle tutuksi tullut suoratoistopalveluiden käyttö vaatii jo paljon kaistaa. Kontekstina tätä tiedonsiirtoa ei saada toteutettua kiinteässä lähiverkossa edes Category 5- kaapeloinnilla (Cat5), koska niiden tuki kattaa vain nopeuteen 100mbit/s asti. Jos vertaillaan tiedonsiirron tarvetta Euroopan suurlaajakaista

tilauksiin (≥ 100 Mbit/s) vuonna 2020 huomataan, että tarve on jo silloin ollut suuri. Artikkelissa arvioidaan, että vuonna 2019 Euroopan kaikista laajakaistatilauksista yli 50 % ovat 100mbits/s tai nopeampia yhteyksiä. Tämä kertoo, että yli puolet laajakaistatilauksista Euroopassa luokitellaan ”supernopea” laajakaista kategoriaan.

3 Ratkaisumenetelmät

Tutkimuksessa selvitettiin siirtonopeuden vaikutusta Windows 10- käyttöjärjestelmän toiminnassa. Windows 10 -käyttöjärjestelmä valikoitui tutkimukseen, koska se on yleisin tietokoneiden käyttöjärjestelmä versio markkinoilla (Statcounter, 2024). Työympäristö oli palvelintietokoneen ja asiakastietokoneen muodostama, joiden välissä oli Ethernet-kaapeli. Tutkimuksessa pystyttiin pelkistämään työympäristö yksinkertaiseen kahden tietokoneen väliseen lähiverkkoon hyödyntämällä iPerf3- ohjelmistoa. iPerf3 toimii empiirisen tutkimuksen tilastollisena työkaluna. Tämän avulla saadaan selville esimerkiksi intervallit, siirretyt tavut sekä kaista yksittäisille paketeille (Udayakumar N., Khera A., Suri L., Gupta C. and Subbulakshmi T., 2018). Työympäristön tietokoneet olivat esirakennettuja ja tietokoneen osista vaihdettiin vain verkkokortteja. Tutkimuksessa testattiin myös langatonta lähiverkkoyhteyttä hyödyntäen kahta Deco BE85- reititintä. Langattoman lähiverkon testauksella pystytään vertailemaan kiinteän ja langattoman lähiverkon eroja tiedonsiirrossa.

3.1 Pöytätietokoneet

Tutkimuksessa käytetyt pöytätietokoneet olivat lähtökohtaisesti samanlaiset. Ensimmäiseksi testattiin kahden vanhemman pöytätietokoneen välistä toimintaa. Pöytätietokoneina toimi kaksi kappaletta Dell Optiplex 7010- pöytätietokonetta, joiden spesifikaatiot löytyvät taulukosta 1. Ensimmäiset testit tehtiin Dell Optiplex 7010- pöytätietokoneiden normaaleilla verkkokorteilla. Tutkimuksessa testattiin myös toista esirakennettua tietokonetta. Työympäristössä testattiin hieman tehokkaampaa tietokonetta tulosten vaihtelevuuden vuoksi. Kyseinen esirakennettu tietokone oli Lenovo Legion T7 34IMZ5- mallinen. Tutkimuksessa ei vaihdettu tänäkään tietokoneen osalta muita osia paitsi verkkokortti. Tämän pöytätietokoneen spesifikaatiot löytyvät taulukosta 2.

Malli	Dell OptiPlex 7010
Proessori	Intel® Core™ i5 3470 / 3.20GHz
Muisti	2x 4GB 1600 MHz DDR3
Näytönohjain	1GB AMD Radeon HD 7470
Kovalevy	1TB 3.5inch Serial ATA III

Taulukko 1: Dell OptiPlex 7010 -pöytätietokoneen spesifikaatiot

Malli	Lenovo Legion T7 34IMZ5
Proessori	Intel® Core™ i9-10900K / 5.3GHz
Muisti	2x 16GB UDIMM ARMOR DDR4-3200
Näytönohjain	NVIDIA® GeForce RTX™ 3080 10GB GDDR6X
Kovalevy	1TB SSD M.2 2280 PCIe® 3.0 NVMe®

Taulukko 2: Lenovo Legion T7 34IMZ5 -pöytätietokoneen spesifikaatiot

3.2 Verkkokortit

Tutkimuksen avainasemassa olivat verkkokortit, jotka antavat potentiaalisen päästä tiettyyn siirtonopeuteen. Taulukon 1 pöytätietokoneissa on Intel R 82579LM Gigabitin- verkkokortit esirakennettuna. Luonnollisesti tämä tarkoittaa sitä, että isoin arvo, johon päästään siirtonopeuden osalta on noin 1 Gbits/s. Tutkimuksessa testattiin tehokkaampia verkkokortteja, saadakseen selville, kuinka paljon tiedonsiirtoa saadaan toteutettua lähiverkossa. Tutkimuksessa käytettiin samaan nopeuteen kuuluvia verkkokortteja palvelintietokoneessa sekä asiakastietokoneessa. Taulukossa 3 löytyy kaikkien testattujen verkkokorttien spesifikaatiot.

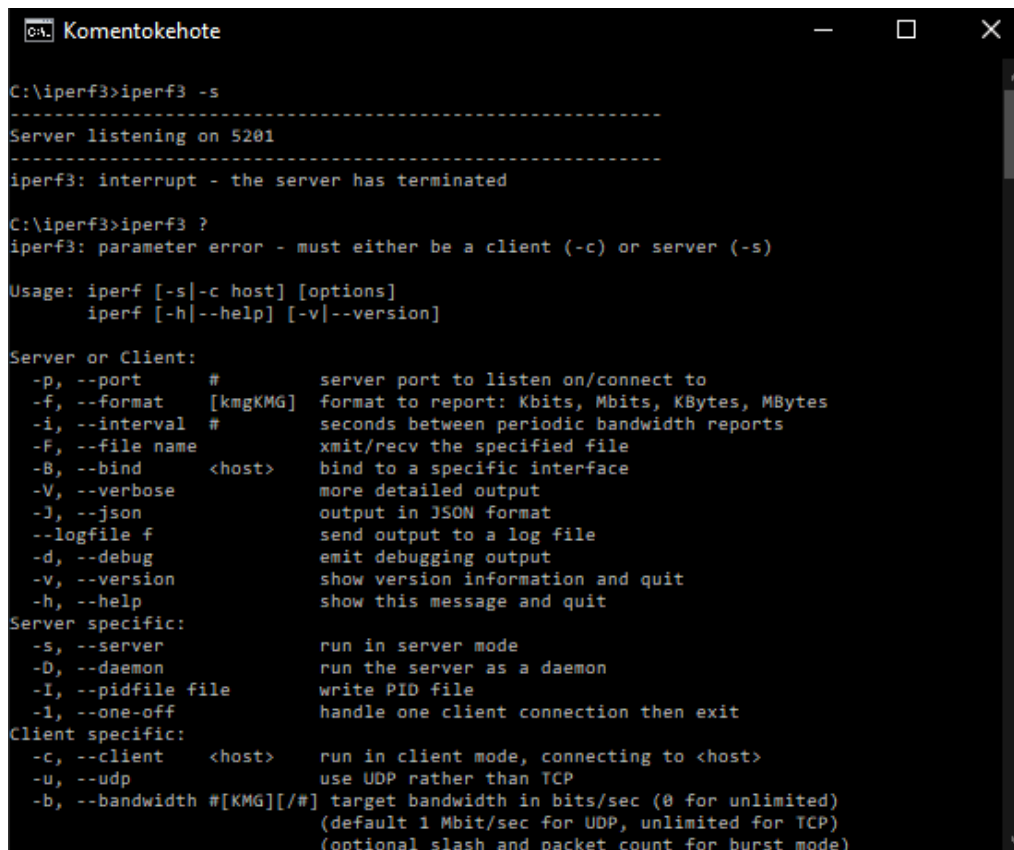
Testaukset	Asiakastietokoneen verkkokortti	Palvelintietokoneen verkkokortti
1Gb	Intel R 82579LM	Intel R 82579LM
10Gb	Marvell Aqction 10Gb Ethernet Card	Qlogic BCM57810 10Gb Ethernet Card
10Gb	Mellanox ConnectX-3 IpoIB Adapter	Mellanox ConnectX-3 IpoIB Adapter
200Gb	NVIDIA BlueField-2 DPU	NVIDIA BlueField-2 DPU

Taulukko 3: Verkkokorttien testaukset

3.3 iPerf3- työkalun hyödyntäminen.

Tutkimuksessa lähiverkkoyhteyksien tehokkuutta käsiteltiin iPerf3- työkalulla. Tällä työkalulla pystyttiin saamaan eri testiajojen avulla paljon lokitietoja siirtonopeuden ja kaistan suhteen. Testiajoja pystyttiin myös muokkaamaan työkalun sisäisistä valinnoista. iPerf3- työkalun avulla pystyttiin muodostamaan palvelin toiselle pöytätietokoneelle ja toinen pöytätietokone toimi asiakastietokoneena, josta testiajot palvelimelle suoritettiin. iPerf3- työkalun ohjelmistoversio tutkimuksessa oli iPerf-3.1.3. On tärkeä huomioida, että iPerf3- työkalu hyödyntää vain yhtä ydintä prosessorista. Kaikissa testiajoissa on siis vain yksi prosessorin ydin

käytössä, joka tietenkin vaikuttaa siihen, että kuormitusta ei tasapainoteta prosessorien ydinten välillä. Tämän lisäksi testiajojen intervalleiksi valittiin 30 sekuntia, koska tämä antaa tasaisemman lopputuloksen tiedonsiirrosta.



```

C:\iperf3>iperf3 -s
-----
Server listening on 5201
-----
iperf3: interrupt - the server has terminated

C:\iperf3>iperf3 ?
iperf3: parameter error - must either be a client (-c) or server (-s)

Usage: iperf [-s|-c host] [options]
       iperf [-h|--help] [-v|--version]

Server or Client:
  -p, --port #                server port to listen on/connect to
  -f, --format [kmgKMG]      format to report: Kbits, Mbits, KBytes, MBytes
  -i, --interval #           seconds between periodic bandwidth reports
  -F, --file name            xmit/recv the specified file
  -B, --bind <host>         bind to a specific interface
  -V, --verbose              more detailed output
  -J, --json                 output in JSON format
  --logfile f                send output to a log file
  -d, --debug                emit debugging output
  -v, --version              show version information and quit
  -h, --help                 show this message and quit

Server specific:
  -s, --server                run in server mode
  -D, --daemon                run the server as a daemon
  -I, --pidfile file         write PID file
  -l, --one-off               handle one client connection then exit

Client specific:
  -c, --client <host>       run in client mode, connecting to <host>
  -u, --udp                  use UDP rather than TCP
  -b, --bandwidth #[KMG][/#] target bandwidth in bits/sec (0 for unlimited)
                             (default 1 Mbit/sec for UDP, unlimited for TCP)
                             (optional slash and packet count for burst mode)

```

Kuva 4: iPerf3 -työkalun komentokehote palvelintietokoneella

3.4 Windows 10- käyttöjärjestelmän konfigurointi

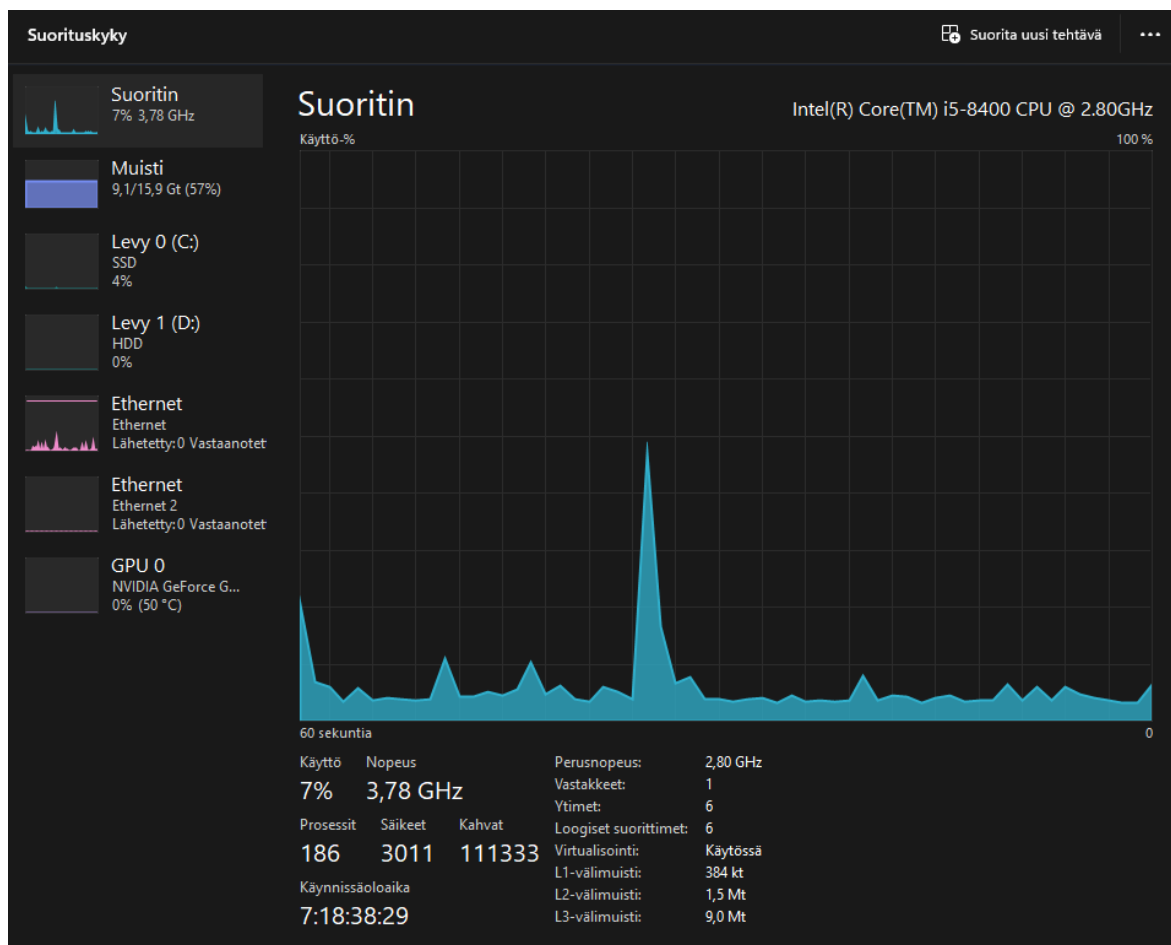
Tutkimuksessa käytetyt Windows 10- käyttöjärjestelmä lisenssit olivat oletustilassa tutkimuksen alkaessa. Kyseiset lisenssit olivat myös standardi lisenssit kuluttaja-asiakas käyttöön. Tutkimuksessa muodostettiin siis lähiverkkoyhteys Windows 10- käyttöjärjestelmien avulla, jotka eivät olleet Windows palvelinlisenssejä. Tutkimuksessa oli tärkeää saada selville, minkälaisia muokkauksia oletus Windows 10- käyttöjärjestelmään tarvitsee tehdä, että se pystyisi toimimaan palvelimena. Tutkimuksen kannalta tämä on tärkeä huomata, sillä esimerkiksi Pk-yritykset eivät välttämättä halua investoida palvelinlisensseihin, jotka maksavat paljon enemmän, kun kuluttaja-asiakas lisenssit. Tämän vuoksi selvitettiin, miten Windows 10- käyttöjärjestelmänä voisi toimia tämän kaltaisessa lähiverkossa.

Windows 10- käyttöjärjestelmä on suunniteltu helppokäyttöiseksi ja ymmärrettäväksi. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että verkkoprotokollat noudattavat yleisimpiä standardeja ja käyttöjärjestelmänä Windows 10 panostaa enemmän turvallisuuteen ja yleiseen toimintakykyyn, kun suoritustehoon. Tutkimuksessa haluttiin kuitenkin manipuloida tätä käyttöjärjestelmää, jotta se suoriutuisi mahdollisimman hyvin tiedonsiirrossa. Työympäristön vuoksi jouduimme aloittamaan konfiguraation muokkaamalla Windowsin Ethernet-yhteyden asetuksia. Vaihdoin IPv4- asetuksia niin, että palvelintietokone käyttää asiakastietokoneen IP-osoitetta ja päinvastoin. Tämän lisäksi Windowsin palomuuriasetuksia vaihdettiin, jonka avulla saatiin se pois järjestelmän toiminnasta. Tämä mahdollistaa sen, että tiedonsiirto kahden tietokoneen kautta tapahtuu vain määritetyiden IP-osoitteiden kautta. Tämänlainen työympäristö on hyvin tyypillinen esimerkiksi yrityksissä, jossa työkoneet on yhdistetty palvelintietokoneisiin.

3.5 Tehtävienhallinnan hyödyntäminen

Windows -käyttöjärjestelmissä on käytössä tehtävienhallinta, jolla voidaan monitoroida ohjelmistoja ja tarkkailla tietokoneen resurssien käyttöä. Tutkimuksessa hyödynnettiin tehtävienhallintaa tiedonsiirto vaiheessa tarkkaillakseen prosessin vaikutusta tietokoneessa. Merkittävimmät tietokoneen osat, jotka ovat vaikutuksen alaisia tiedonsiirrossa ovat prosessori sekä muisti. Tehtävienhallinnan kautta saadaan esimerkiksi 30 sekunnin testiajolle paljon prosessorin ja muistin kuormitus on. Testiajojen aikana tutkimuksessa ei suoritettu muita toimenpiteitä, jotka vaikuttaisivat merkittävästi tietokoneen suorituskykyyn.

Tehtävienhallinta on monille Windows -käyttöjärjestelmää käyttäneille tuttu työkalu. Tutkimuksessa olisi voinut käyttää kolmannen osapuolen työkalua, jonka avulla saataisiin tarkka kuormitus vain tiedonsiirrosta. Tutkimuksessa tärkeää on kuitenkin selvittää Windows -käyttöjärjestelmän toiminta tiedonsiirrossa ja taustaohjelmat, joita löytyy pakostakin ovat osa kuormitusta. Tehtävienhallintaa havainnollistetaan kuvassa 5, jossa näkyy tehtävienhallinnan suoritusosio, jossa näkyy prosessorin sekä muiden laitteistojen kuormitukset. Mittaamisen puolesta prosentuaaliset luvut testiajojen ajalta ovat kuitenkin arvio. Tällä tarkoitetaan sitä, että täysin tarkkoja kuormitusmääriä tietokoneessa on edes turha aloittaa spekuloidaan. Tärkeimpänä asteikkona tutkimuksessa on otettu merkittävät erot ja ailahtelevuus suorituskyvyssä. Tehtävienhallinnassa näkyvä kuormitus korreloituu tietokoneen käyttökokemukseen tavalla tai toisella.



Kuva 5: Windows -käyttöjärjestelmän tehtävienhallinnan näkymä

4 Tulokset

Tässä luvussa selviää empiirisen tutkimuksen tulokset. Tämän luvun tavoitteena on olla objektiivinen ja suoraviivainen tulosten ilmaisussa sekä tutkimuksen tuloksista eri vaiheissa. Tuloksissa käydään läpi merkittävimmät tulokset, jotka ovat tutkimuksen kannalta oleellisia. Tämän lisäksi tulokset, joita käsitellään luvussa ovat useaan kertaan testattu. Tämän avulla vältetään sattumanvaraisuudelta näissä tuloksissa.

4.1 Oletuslaitteistolla testiajot

Tutkimus alkoi selvittämällä lähiverkon toiminta. Ensimmäiseksi laitettiin työympäristö kuntoon, jonka avulla kaikki testit pystyttiin tekemään. Ensimmäisissä ajoissa testattiin Dellin pöytätietokoneita niiden mukana tulleiden Gigabittisten verkkokorttien kanssa. Oletuksena ajateltiin, että tietokoneilla ei pitäisi olla ongelmia 1Gb:n tiedonsiirrossa, sillä se on hyvin pieni määrä tutkimuksen kontekstissa ja vanhemmankin laitteiston pitäisi suoriutua tästä ongelmitta. Tässä testauksessa tärkein oli selvittää Windows-verkkoasetuksista määritettyjen Jumbo-pakettikokojen vaikutusta tiedonsiirrossa.

Oletusasetuksilla tehty testaus iPerf3- työkalulla nettosi muutaman testiajon jälkeen karkeasti nopeutta 942 Mb/s 30 sekunnin ajalta. Tarkoittaen siis sitä, että tietokoneiden välinen tiedonsiirto ei ollut optimaalinen. Tärkeää huomioitavaa on se, että iPerf3- työkalussa oletusasetuksilla tehdyllä testiajolla pakettikoko on 128 kilotavua. Paketinkoolla on vaikutus tiedonsiirtoon, koska parhaimpaan tulokseen päästään mahdollisimman isolla paketinkoolla, jossa viive ei muutu. Oletusajoilla tehdyissä testeissä palvelintietokoneen ja asiakastietokoneen prosessorin kuormitus oli noin 15 %. Kuormituksen määrä ei ollut merkittävä vielä tässä vaiheessa.

Tämän jälkeen testiajoja tehtiin muokkaamalla Jumbo-pakettienkokoja. Tässä vaiheessa haluttiin saada selville, millaisia eroja tulee, jos käytämme isointa Jumbo-pakettikokoja, joka on 9014 kilotavua. Muutaman testiajon jälkeen tiedonsiirron nopeudeksi saatiin noin 837 Mb/s. Tämä on noin 11 % vähemmän kuin oletusasetuksilla tehty testi. Tutkimuksessa ei osattu tarkalleen selittää mistä tämä johtui tässä vaiheessa. Prosessorin kuormituksessakin havaittiin merkittäviä eroja oletusasetuksilla tehtyyn testiin. Palvelintietokoneella kuormitus oli noin 23 % ja asiakastietokoneella noin 10 %.

Viimeiseksi testattiin pienempää Jumbo-pakettikokoa, jos sillä olisi positiivisempi vaikutus tiedonsiirtoon sekä tietokoneen kuormitukseen. Jumbo-paketinkoko oli näissä testeissä 4088 kilotavua. Tällä muutoksella oli positiivinen vaikutus, sillä tiedonsiirron nopeus testiajojen jälkeen oli noin 978 Mbits/s ja palvelintietokoneen kuormitus väheni 18 %:iin. Siirtonopeudeltaan tulos on ennako-oletuksien mukainen ja prosessorin kuormitus palvelintietokoneella on hyvä.

4.2 Tehokkaampien verkkokorttien testaus

Tutkimuksessa siirryttiin vaiheeseen, jossa haluttiin testata tehokkaampia verkkokortteja Dellin esirakennetuissa pöytätietokoneissa. Tässä vaiheessa käytettiin kahta Mellanox:in valmistamia IPoIB-kortteja. IPoIB-kortit eroavat normaaleista verkkokorteista siten, että ne tukevat myös IB:tä eli Infinibandia, mikä on erilainen verkkoprotokolla verrattuna Ethernet-protokollaan. Kyseisiä kortteja käytettiin kuitenkin hyödyntäen vain Ethernet-teknologiaa. Näissä korteissa on erikseen omat porttinsa Ethernet-teknologian käyttöön ja yhdestä portista oli potentiaalia saada 10Gb/s siirtonopeutta. Nämä kortit olivat yhteensopivuuden ja tutkimuksen kannalta järkevin ratkaisu tilanteessa. Kortit saatiin asennettua tietokoneisiin ja aloitettiin tiedonsiirron testaus.

Tutkimuksen aikana oltiin tietoisia Dellin esirakennettujen pöytätietokoneiden iästä sekä laitteistosta ja tiedettiin, että Ethernet-teknologiaa hyödyntäen odotukset eivät olleet korkealla. Ensimmäisissä testiajoissa testattiin oletusasetuksilla tiedonsiirtoa. Testiajosta saatiin tiedonsiirron nopeudeksi noin 3.68Gbits/s, mutta tiedonsiirto 30 sekunnin ajalta oli hyvin ailahtelevaa. Testin aikana tapahtuvissa intervalleissa tiedonsiirron nopeus oli ajoittain alle 2Gbits/s ja taas jossain tapauksissa lähempänä 5Gbit/s. Ensisilmäykseltä huomaa, että testiajoissa ei saatu edes puoliakaan mahdollisesta potentiaalista. Isoin huolenaihe kuitenkin ilmeni prosessorin kuormituksessa. Prosessorin kuormitus oli keskimäärin noin 48 % koko testiajon ajan palvelintietokoneella ja asiakastietokoneella noin 23 %.

Tässä vaiheessa tutkimusta aloitettiin iPerf3- työkalun avulla mukauttamaan testiajoja, jotta saataisiin selville, miten saadaan tällä laitteistolla korkein tiedonsiirto. iPerf3- työkalun avulla pystyi manipuloimaan esimerkiksi samanaikaisten asiakasvirtojen määrää sekä TCP-ikkunoiden skaalautuvuutta työkalun sisäلتä. Samanaikaisten asiakasvirtojen määrän muokkaaminen auttoi tiedonsiirrossa. Neljän samanaikaisen asiakasvirran testiajossa saatiin tiedonsiirron nopeudeksi n. 4.41Gbits/s ja tiedonsiirto oli paljon tasaisempaa. Prosessorin

kuormitus pysyi asiakastietokoneella ja palvelintietokoneella miltei samana, vaikka tiedonsiirtoa saatiin paljon enemmän. TCP-ikkunoiden muuttaminen iPerf3- ohjelmistosta paransi tiedonsiirtoa. Testiajossa, jossa vain muokattiin TCP-ikkunan kokoa 256 megatavuun, saatiin tiedonsiirron nopeudeksi keskimäärin 5.14Gbits/s. Prosessorin kuormitus näiden testien aikana oli noin 56 % palvelintietokoneella ja 30 % asiakastietokoneella.

Viimeisenä vaiheena oli testata Jumbo-paketinkoon vaikutus tiedonsiirtoon tässä ympäristössä. Testiajoja tehtiin aluksi 9014 kilotavuisella paketinkoolla ja testiajot antoivat tiedonsiirtonopeudeksi noin 590 Mbits/s. Vaikuttava tekijä heikkoon tiedonsiirtoon oli intervallit, jolloin tiedonsiirtoa ei tapahtunut. 30 sekunnin testiajossa vain 10 sekunnin ajan tiedonsiirtoa tapahtui. Palvelintietokoneella prosessorin kuormitus testien aikana oli myös noin 30 % ja asiakastietokoneilla noin 7 %.

4.2.1 Palvelintietokoneen vaihtaminen ja sen vaikutus

Tutkimuksen aikaisempien tuloksien perusteella tehtiin päätös vaihtaa palvelintietokone uudempaan esirakennettuun pöytäkoneeseen. Palvelintietokoneena toimi nyt Lenovo -merkkinen modernimpi tietokone, jossa kaikki tietokoneen osat olivat tuoreimpia kuin aiemmissa pöytä tietokoneissa, mitä kokeiltiin testien aikana. Tässä vaiheessa vaihdettiin myös verkkokortit vain Ethernet-teknologiaa tukeviin, jotka tukevat tiedonsiirtoa nopeuteen 10Gb/s asti. Asiakastietokoneena toimi edelleen sama pöytä tietokone kuin aiemmin. Tehokkaamman palvelintietokoneen avulla uskottiin saavan parempia tuloksia tiedonsiirrossa sekä kuormituksessa. Tiedonsiirrossa palvelin tarvitsee enemmän resursseja kuin asiakastietokone.

iPerf3 -työkalussa on asetus, jolla pystyy vaihtamaan tiedonsiirron suunnan. Tämän asetuksen avulla testattiin aluksi mitä tapahtuu, jos vanhempi tietokone toimii palvelimena ja uudempi tietokone toimii asiakastietokoneena. Näistä testiajoista selvisi, että tiedonsiirto ei muuttunut miltei ollenkaan edellisistä testeistä. Merkittävin muutos tapahtui asiakastietokoneen kuormituksessa, jossa kuormitus väheni noin 3 %:iin. Kuitenkin tavoitteena oli käyttää uudempaa tietokonetta palvelimena, jotta saataisiin parempi tiedonsiirto ja aloitettiin sen mukaiset testiajot.

Uuden palvelintietokoneen myötä tiedonsiirto ja kuormitus parani molemmilla tietokoneilla. iPerf3 -työkalun oletusasetuksilla saatiin tiedonsiirron nopeudeksi 5.9 Gbit/s. Prosessorin kuormitus palvelintietokoneella oli noin 5 % ja asiakastietokoneella 35 %. iPerf3- työkalun

asetuksia mukautettiin, jossa samanaikaisten asiakasvirtojen määrä oli kaksi ja TCP-ikkunoiden koko oli 256 megatavua selvittääkseen tulisiko näillä muutoksilla lisää tiedonsiirtoa. Näiden muutosten myötä saatiin tiedonsiirron nopeudeksi noin 9.6 Gbits/s. Palvelintietokoneen prosessorin kuormitus näissä testeissä oli noin 10 % ja asiakastietokoneissa noin 48 %. Viimeisenä testattiin Jumbo-paketinkokojen vaikutuksia uudella laitteistolla. Näistä tuloksista selvisi, että 9014 kilotavuisella paketinkoolla tiedonsiirto väheni keskimäärin nopeuteen 5 Gbits/s ja 4088 kilotavuisella paketinkoolla tiedonsiirto väheni noin 6Gbits/s. Merkittävää kuormituseroa ei syntynyt, mutta asiakastietokoneessa kuormitus laski noin 8 %.

4.3 Reitittimien vaikutus lähiverkossa

Tutkimuksen yhteydessä ilmeni mahdollisuus testata Decon BE85- mallisia mesh-reitittimiä. Kyseiset reitittimet tukevat tuoreinta Wifi7- teknologiaa ja reitittimissä on kaksi 10 gigabittistä porttia. Reitittimet tukevat myös langattomia runkoliityntäyhteyksiä, joka tarkoittaa sitä, että reitittimet voivat langattomasti siirtää keskenään tietoa. Tämän avulla pystyttiin muodostamaan langattoman lähiverkon testaus manuaalisella IP-osoitteella, jossa yhteys muodostettiin langallisesti tietokoneista reitittimiin ja verkkoyhteys vastakkaisten reitittimien IP-osoitteiden avulla. Kuvassa 6 on havainnollistettu kaavio langattoman lähiverkon työympäristöstä.



Kuva 6: Langattoman lähiverkon työympäristö

Tutkimuksessa tehdyt testit toteutettiin muuten samalla tavalla kuin aiemmin. iPerf3 -työkalulla aloitettiin testiajojen tekeminen ja selvitettiin, kuinka paljon tiedonsiirtoa saadaan aikaiseksi ja kuinka kuormittavaa se on tietokoneille. iPerf3 -työkalulla tehdyissä erilaisissa testeissä saatiin tiedonsiirron nopeudeksi keskimäärin 3.8Gbits/s. Tietokoneiden kuormituksessa huomasi selkeän eron, sillä prosessorin kuormitus asiakastietokoneessa oli noin 25 % ja palvelintietokoneessa noin 5 %.

Tutkimuksessa haluttiin testata tiedonsiirron eroavaisuuksia kytkemällä reitittimet langallisesti kiinni toisiinsa. Tämä on käytännössä samanlainen työympäristö kuin langallisen

lähiverkon testeissä, mutta reitittimet ovat langallisesti kiinni tietokoneessa sekä toisissaan. Näillä testauksilla haluttiin testata, miten reitittimen lisäys langallisen lähiverkon väliin vaikuttaa tiedonsiirtoon. Useilla eri testiajoilla huomattiin, että tiedonsiirto ei ollut lähelläkään puhtaan langallisen lähiverkon tiedonsiirtoa. Tiedonsiirron nopeudeksi saatiin keskimäärin 6.7 Gbit/s, jossa tietokoneiden kuormitus oli kuitenkin merkittävästi vähäisempää kuin langallisissa testauksissa. Prosessorin kuormitus asiakastietokoneessa oli keskimäärin 31 % ja palvelintietokoneessa 5 %. Jumbo-paketinkoilla huomattiin isoin eroavaisuus puhtaaseen langalliseen lähiverkkoon verrattuna. 4088 kilotavuisella sekä 9014 kilotavuisella paketinkoolla oli vähäisin merkitys tiedonsiirtoon tähän asti. Tiedonsiirron nopeus molemmilla paketinkoilla oli noin 6 Gbit/s, jossa tietokoneiden kuormitukseen ei merkittävästi muuttunut viime testauksista.

5 Tulosten analysointi

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Windows 10- käyttöjärjestelmän toimintaa tiedonsiirrossa. Tarkemmin haluttiin selvittää, pystyykö Pk-yritykset ja isommat kotitaloudet hyödyntämään Windows 10- käyttöjärjestelmää optimaalisella tavalla ja kuinka saavutettava potentiaalinen tiedonsiirto on toteuttaa.

Ensimmäisistä testiajoista alkaen oli huomattavissa, että erinomaisiin tiedonsiirron nopeuksiin ei pääse ilman tehokasta laitteistoa tai jonkinlaista verkonkonfiguraatiota. Gigabittisillä verkkokorteilla ei päästy edes optimaaliseen tiedonsiirtoon ilman pakettikokojen muuttamista. Tällöinkin prosessorin kuormitus oli liian korkea näin pieneen tiedonsiirtoon. Tähän tietenkin vaikuttaa se, että laitteisto ei ollut moderneilla standardeilla tehokasta. Yleisesti Jumbo-pakettikokojen negatiivinen vaikutus tiedonsiirtoon on tutkimuksessa asia, joka jäi ihmetyttämään. Loogisesti ajateltuna tämän pitäisi helpottaa prosessorin kuormaa ja tällöin tiedonsiirtoa, mutta nähtävästi Jumbo-pakettikoot eivät ole vielä niin selkeitä. Iloisena yllätyksenä kuitenkin saatiin miltei 10Gbits/s tiedonsiirron nopeus, kun ainoastaan palvelintietokonetta vaihdettiin. Asiakastietokoneen pysyessä samana testien ajan, voi tämän saavutuksen ottaa positiivisena yllätyksenä, vaikka asiakastietokone oli todella kuormittunut näinä aikoina. Mielenkiintoista oli myös testata langattoman lähiverkon toiminta langalliseen verrattuna. Näistä testeistä huomasi, että langaton lähiverkko edes uusimmalla Wifi7- teknologialla ei kykene tehokkaasti suorittamaan korkeita tiedonsiirtoja. Mielenkiintoisena asiana ilmeni kuitenkin kuormituksen muutos asiakastietokoneessa, kun langalliseen lähiverkkoon lisättiin reititin väliin.

Aiemmissa tiedonsiirron testauksissa havaittiin, että laitteisto ei ole ollut tarpeeksi tehokasta suorittamaan korkeita määriä tiedonsiirtoa tehokkaasti. Sama tapaus oli tutkimuksessa tehdyissä testeissä. Tutkimuksessa pelkästään palvelintietokoneen vaihto vaikutti merkittävästi kaikkeen tiedonsiirtoon. Tämä johtuu siitä, että vaihdettu tietokone oli kaikilla tavoilla tehokkaampi, mutta erityisesti suoritusteho on merkittävästi suurempi uudemmassa tietokoneessa verrattuna aiempaan tietokoneeseen, jota käytettiin tutkimuksessa.

Jumbo-pakettikokojen vaikutukset aiemmissa tutkimuksissa ovat olleet positiivisia. Yleensä Jumbo-paketinkoilla on saatu parempia tuloksia kaikissa tiedonsiirtoon vaikuttavissa asioissa. Kuitenkin tässä tutkimuksessa Jumbo-paketinkoista ei ollut lähtökohtaisesti muuta,

kuin negatiivisia vaikutuksia tiedonsiirtoon ja tietokoneen toimintaan. Yhtä tapausta lukuun ottamatta tiedonsiirto laski aina Jumbo-pakettikokojen implementoinnin jälkeen ja tietokoneen kuormitus ei laskenut merkittäväällä tasolla myöskään.

Saadut tulokset ovat odotettavat, kun otetaan laitteisto huomioon. Tutkimuksessa olisi voinut käyttää parempaa laitteistoa, jotta olisi voinut tarkalleen selvittää tiedonsiirron määrän varsinkin tehokkaammilla verkkokorteilla. Tutkimuksessa ei päästy kokeilemaan 200Gb -verkkokorttia, koska se ei ollut yhteensopiva vanhemman tietokoneen kanssa. Työympäristö itsessään oli selkeä ja hyvin toistettava konsepti, jossa kaksi pöytätietokonetta kiinnitetään yhteen verkkokaapelilla. Tutkimuksen luotettavuuteen vaikuttaa laitteiston heikkous, koska tutkimuksessa ei käytetty laitteistoa, joka olisi mahdollisimman yhteensopiva tehokkaampien verkkokorttien kanssa. Toisaalta tämä entisestään vastaa kysymykseen kuinka saata-villa potentiaalinen tiedonsiirto on. Tutkimuksen luotettavuuteen vaikuttaa positiivisesti se, että käytettiin esirakennettuja tietokoneita, joiden spesifikaatiot olivat tiedossa. Voisi kuvitella, että suurin osa tietokoneista maailmassa ovat esirakennettuja. Tällöin ihmiset, jotka ovat ostaneet esimerkiksi erittäin nopean laajakaistan ymmärtävät, että suoritustehoa vaaditaan sen toteuttamiseen.

Tutkimuksessa toteutettiin nopeudeltaan miltei 10Gbits/s tiedonsiirto hyvin halvalla laitteistolla. Tämän saavuttamiseen kuitenkin tarvittiin paljon hakuammuntaa, jossa testattiin useita eri verkkoon vaikuttavaa tekijää selvittääkseen, miten päästään parhaimpaan lopputulokseen. Tiedonsiirron määrä korreloitu langallisessa lähiverkossa tietokoneen kuormitukseen. Varsinkin heikomman laitteiston kanssa tämä oli huomattavissa, kun tiedonsiirtoon menee helposti yli puolet prosessorin kuormituksesta. Paremmalla laitteistolla olisi mahdollisesti voinut selvittää helpottaako tietokoneen kuormitusta Jumbo-paketinkoot niin kuin sen teoriassa pitäisi. Reitittimien lisääminen lähiverkkoon auttoi kuitenkin kuormituksessa merkittävästi. Tästä voisi olettaa, että reitittimet auttavat lähiverkossa tasapainottamaan tiedonsiir-
rosta siirtyvää kuormaa muualle kuin vain tietokoneisiin.

Tutkimuksessa avainasemassa ollut Windows 10 -käyttöjärjestelmä aiheuttaa omat haasteensa. Kuluttaja-asiakkaille tarkoitettu käyttöjärjestelmä yleisesti rajoittaa verkkoasetusten täydellistä hallinnointia. Hallinnoinnilla tarkoitetaan tässä tapauksessa sitä, että kuinka paljon erilaisia muutoksia verkkoon voidaan tehdä. Tutkimuksessa käytännössä muutettiin hie-man palomuuriasetuksia sekä pakettikokojen suuruutta käyttöjärjestelmän omista asetuk-sista. Kuitenkin iPerf3 -työkalua hyödyntäen huomattiin, että asiakasvirtojen määrällä sekä

TCP-ikkunoiden skaalaamisella saatiin miltei poikkeuksetta parempia tuloksia tiedonsiirrossa. Tutkimuksessa huomattiin kuitenkin, että heikot tulokset eivät olleet käyttöjärjestelmästä johtuvia. Suurissa tiedonmäärissä selviäisi paremmin käyttöjärjestelmän oikeat rajoitukset verrattuna esimerkiksi Windows -palvelinlisenssiin. Siitä huolimatta uskoisin, että tehokkaalla laitteistolla voitaisiin toteuttaa hyvin toimiva ympäristö, jossa olisi käytössä vain Windows 10 -käyttöjärjestelmiä esimerkiksi Pk-yritys käyttöön. Tämä tietenkin vie paljon kustannuksia laitteistossa ja asiantuntemusta tarvitaan.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksessa käsiteltiin tiedonsiirron vaikutusta lähiverkossa hyödyntäen Windows 10 -käyttöjärjestelmää. Tutkimuksen avulla haluttiin saada selville, onko Pk-yritysten ja kotitalouksien järkevä investoida korkeakaistaiseen laajakaistaan. Tutkimuksessa oli tärkeää myös selvittää Windows 10 -käyttöjärjestelmän toimintakyky korkeissa tiedonsiirroissa ja kuinka toistettava se on. Pelkästään applikaatioiden, ohjelmistojen ja erilaisten pelien vaativa kaista rupeaa olemaan jo sellaista luokkaa, että paremmasta laajakaistasta kannattaa maksaa. Kuitenkin, jos satut ostamaan esimerkiksi 10-gigabittisen valokuitulaajakaistan internet-palveluntarjoajalta, miten pystyt hyödyntämään tämän kaistan potentiaaliinsa. Tutkimuksessa selvisi, että Windows 10 -käyttöjärjestelmä rajoituksista huolimatta pystyy toimimaan hyvin korkeissa tiedonsiirroissa. Tärkeimpänä tekijänä on laitteisto ja oheislaitteisto. 10-gigabittisen tiedonsiirron saavuttamiseen tarvitaan hyvin tehokasta laitteistoa, välttämättömät oheislaitteet kuten oikean standardin kaapelit sekä verkon konfigurointia käyttöjärjestelmästä. Tällöinkään ei välttämättä saavuteta tavoitetta.

Elektroniikka- ja tietotekniikka-alalla hyvin usein koitetaan saada tehokkaampaa ja parempaa teknologiaa markkinoille. Tutkimuksessa selvitettiin ääripään laitteistoa Windows 10 -käyttöjärjestelmässä, selvittääkseen markkinoiden yleisimmän käyttöjärjestelmän toiminta erilaisissa tiedonsiirron tilanteissa. Kuten tutkimuksesta sekä aiemmasta kirjallisuudesta on selvinnyt, laitteisto on yleisin pullonkaula tiedonsiirron potentiaalinen saavuttamisessa. Paremman laitteiston avulla saadaan toteutettua verkkokorttien potentiaalinen tiedonsiirto lähiverkossa. Tiedonsiirtoon on kehitetty paljon keinoja, joita sitä voi parantaa ja yksi niistä on Jumbo-paketinkoot. Tehdyt kokeet antavat osviittaa sille, että vanhojen ja modernien koneiden käyttö samassa lähiverkossa haettaessa merkittäviä tiedonsiirtokapasiteetteja, ei johda pelkästään suorituskyvyn heikohkoon skaalautumiseen. Haasteena ilmenee myös helposti odottamattomat käytösmallit, siihen nähden mitä teoriassa voisi olettaa. Aiemmassa kirjallisuudessa on todettu teoreettinen hyöty Jumbo-paketinkokojen asettamisella.

Tutkimusta olisi hyvä jatkaa samanlaisella laitteistolla vertailemalla Windows -palvelinlisenssiä ja asiakaslisenssiä keskenään, jossa oikeasti nähtäisiin, millainen pullonkaula käyttöjärjestelmästä syntyy. Tärkeää olisi myös tehdä jatkotutkimuksia jumbo-pakettikoista ja saada tarkempi rajapinta siitä, missä paketinkoon hyöty on suurin ilman haittavaikutuksia. Myös ääripään laitteiston vertailua jumbo-pakettikoista voisi tutkia paremmin.

Lähdeluettelo

Agott (2009) Category 6 twisted pair Ethernet cable. Tarjolla: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CAT6_twisted_pair.JPG (Luettu 17 Huhti-2024).

Aravantinos, E. et al. (2021) Determinants of FTTH tariffs evolution in EU: A panel data analysis. *Telecommunications policy*. [Online] 45 (10), 102218-. Tarjolla: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102218> (Luettu 18 Huhti-2024)

Balaji, P. et al. (2008) "Sockets direct protocol for hybrid network stacks: a case study with iWARP over 10G Ethernet," in *High Performance Computing - HiPC 2008*. [Online]. 2008 Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. pp. 478–490. DOI: 10.1007/978-3-540-89894-8_42 (Luettu 16 Huhti-2024).

Baxter, L. & Pryma, J. (2006) *Make homes future-ready with Category 6 cabling*. Vol. 14. Tulsa: Endeavor Business Media. ISSN: 1073-3108 (Luettu: 08 Maalis-2024).

D. D. Souza et al. (2019) "Evaluation of Copper Cables as Waveguides in Next-generation Wire-line Technologies," *2019 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aveiro, Portugal, pp. 1-3. doi: 10.1109/IMOC43827.2019.9317425. (Luettu 17 Huhti-2024).

Effenberger, F. J. and Lu, K. W. (1996) 'Overview of FTTH networks: past history, current status, and future designs', Proc. SPIE 2917, Broadband Access Systems. Tarjolla: <https://doi.org/10.1117/12.257337> (Luettu: 17 Maalis-2024).

Ethernet Alliance (2009) Ethernet Jumbo Frames Tarjolla: <https://www.ethernetalliance.org/wp-content/uploads/2011/10/EA-Ethernet-Jumbo-Frames-v0-1.pdf> (Luettu 14 Huhti-2024)

Fontana, R., Nuvolari, A. and Verspagen, B. (2009) 'Mapping technological trajectories as patent citation networks. An application to data communication standards', *Economics of Innovation and New Technology*. Tarjolla: <https://doi.org/10.1080/10438590801969073> (Luettu: 12 Maalis-2024).

Krawczyk, R. et al. (2022) Ethernet for High-Throughput Computing at CERN. *IEEE transactions on parallel and distributed systems*. 33 (12), 3640–3650. Doi: 10.1109/TPDS.2022.3163472 (Luettu: 08 Maalis-2024).

IEEE Standards (n.d.) Tarjolla: <https://standards.ieee.org/ieee/802.3u/1079/> (Luettu: 12 Maalis-2024).

IEEE Standards (n.d.) Tarjolla: <https://www.ieee.org/standards/> (Luettu: 12 Maalis-2024).

Hurwitz, J. (2003) Initial End-to-End Performance Evaluation of 10-Gigabit Ethernet, Computer and Computational Sciences Division Tarjolla: https://cs.uwaterloo.ca/~brecht/servers/readings-new/HotI11_Hurwitz_10GbE.pdf (Luettu: 08 Maalis-2024).

K. A. Janjua and S. A. Khan, "A Comparative Economic Analysis of different FTTH Architectures," *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Shanghai, China, 2007, pp. 4979-4982, doi: 10.1109/WICOM.2007.1220.

Koehler, P. (2014) Testing infiniband in the home lab with pernixdata FVP, Testing Infini-Band in the home lab with PernixData FVP. Tarjolla: <https://vmpete.com/2014/04/09/testing-infiniband-in-the-home-lab-with-pernixdata-fvp/> (Luettu: 08 Maalis-2024).

Law D., D'Ambrosia. (2009) IEE P802.3ba Architecture Overview, "Version 1.0 IEEE 802.3 Time Synchronization Protocol Study Group – May 2009 Interim Tarjolla: https://www.ieee802.org/3/time_adhoc/public/apr09/dambrosia_03_0509.pdf (Luettu 12 Maalis-2024).

Lounea (n.d) 10G kaikkiin kotien tarpeisiin Tarjolla: <https://lounea.fi/yksityisille/valokuitu/10G> (Luettu 16 Huhti-2024)

Narayan, S. & Lutui, P.R. (2013) "Network Performance Evaluation of Jumbo Frames on a Network," *2013 6th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, Nagpur, India, pp. 69-72. doi: 10.1109/ICETET.2013.16 (Luettu 14 Huhti-2024).

Nokia (2016) Orange Poland and Nokia set new capacity-distance record with 1.5 Terabits per second (Tb/s) superchannel transmitted over 870km between Warsaw and Wroclaw Tarjolla: <http://www.prnewswire.com/news-releases/orange-poland-and-nokia-set-new-capacity-distance-record-with-15-terabits-per-second-tbs-superchannel-transmitted-over-870km-between-warsaw-and-wroclaw-300302201.html> (Luettu: 08 Maalis-2024).

Reaño, C., Silla, F., Shainer, G., & Schultz, S. (2015). Local and Remote GPUs Perform Similar with EDR 100G InfiniBand. In Proceedings of the Industrial Track of the 16th International Middleware Conference (pp. 4-7). Vancouver, BC, Canada: Association for Computing Machinery. Tarjolla: <https://doi.org/10.1145/2830013.2830015> (Luettu 18 Huhti-2024)

StatCounter Global Stats (2024) Desktop Operating System Market Share Worldwide Tarjolla: <https://gs.statcounter.com/os-market-share/desktop/worldwide> (Luettu 16 Huhti-2024)

StatCounter Global Stats (2024) Desktop Windows Version Market Share Worldwide. Tarjolla: <https://gs.statcounter.com/os-version-market-share/windows/desktop/worldwide> (Luettu 16 Huhti-2024)

Super Micro Computer, Inc. (2015) Supermicro® Exhibits 1U 4X GPU/Xeon Phi SuperServer® and high bandwidth 2U twinpro2TM, 7u SuperBlade® servers featuring EDR 100gb/S infiniband at ISC 2015. Tarjolla: <http://www.prnewswire.com/news-releases/super-micro-exhibits-1u-4x-gpuxeon-phi-superserver-and-high-bandwidth-2u-twinpro-7u-super-blade-servers-featuring-edr-100gbs-infiniband-at-isc-2015-300111886.html> (Luettu: 08 Maalis-2024).

Valoo (2023) Valoo kiihdyttää Euroopan nopeimmaksi operaattoriksi Nokian ympäristöystävällisellä teknologialla. Tarjolla: <https://www.valoo.fi/valoo-kiihdyttaa-euroopan-nopeimmaksi-operaattoriksi-nokian-ymparistoystavallisella-teknologialla/> (Luettu 16 Huhti-2024)

Oliviero, A., & Woodward, B. (2014). Cabling: The Complete Guide to Copper and Fiber-Optic Networking. Germany: Wiley. Tarjolla: <https://www.google.fi/books/edition/Cabling/BjYKAwAAQBAJ?hl=en&gbpv=0> (Luettu: 11 Maalis-2024).

Toy, MT, & Cankaya, HC 2017, Third Networks and Services, Artech House, Norwood. Tarjolla: ProQuest Ebook Central. (Luettu: 12 Maalis-2024).

N. Udayakumar, A. Khera, L. Suri, C. Gupta and T. Subbulakshmi, "Bandwidth Analysis of File Transfer Protocol," 2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), Chennai, India, 2018, pp. 0791-0795, doi: 10.1109/ICCSP.2018.8524583 (Luettu 18 Huhti-2024)