

Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden korkeakoulu
Insinööritieteiden kandidaattiohjelma

Kandidaatintyö

Lastuavan työstön energiankulutus

29.4.2022

Miikka Matikainen

Tekijä Miikka Matikainen

Työn nimi Lastuavan työstön energiankulutus

Koulutusohjelma Insinööritieteiden kandidaattiohjelma

Pääaine Kone- ja rakennustekniikka

Pääaineen koodi ENG3043

Vastuupettaja Raine Viitala

Työn ohjaaja TkT Jaakko Peltokorpi

Päivämäärä 29.4.2022

Sivumäärä 23

Kieli suomi

Tiivistelmä

Korkeiden energiahintojen hintojen seurauksena konepajateollisuudessa on kiinnitettävä entistä enemmän huomiota energiatehokkuuteen. Lastuavat työstökoneet vievät merkittävän osan konepajan energiankulutuksesta. Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää lastuavan työstön energiankulutusta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi selvitetään energiansäästö mahdollisuuksia. Työ suoritettiin kirjallisuustutkielmana ja se pohjautuu aiempiin tutkimuksiin ja kirjallisuuteen. Työssä perehdytään lastuavan työstön menetelmistä erityisesti sorvauksen ja jyrsinnän energiankulutukseen.

Energiankulutukseen vaikuttavat useat eri tekijät, joiden merkittävyys vaihtelee. Energiansäästöjä voidaan saavuttaa joko hankkimalla uusia energiatehokkaita koneita tai päivittämällä vanhojen koneiden komponentteja energiatehokkaammiksi. Myös koneiden ohjauksella on merkitystä ja merkittäviä parannuksia on mahdollista saada käyttämällä viimeisimpiä CAM-ohjelmia ja työstökoneiden ohjausjärjestelmiä.

Energiankulutuksen selvittämiseksi voidaan mitata joko yksittäisen työstöliikkeen tai kappale kohtainen kulutus. Mittauksia voidaan suorittaa myös pidemmällä aikavälillä, kuten vuorokausi- tai vuosikulutusta seuraamalla. Tulevaisuudessa laite- ja työkaluvalmistajat joutuvat panostamaan uusiin tekniikoihin, kuten konenäköön ja lasermittalaitteisiin. Tässä työssä ilmeni, että energiatehokkuus ja säästöt syntyvät useasta eri tekijästä.

Avainsanat lastuava työstö, työstökone, energiankulutus, energiansäästö, energiatehokkuus

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	1
2 Lastuavat työstökoneet	2
2.1 Sorvi	2
2.2 Jyrsinkone	3
2.3 NC-kone	4
3 Energiankulutukseen vaikuttavat tekijät lastuavassa työstössä	5
3.1 Koneen osat	5
3.2 Materiaalit.....	7
3.3 Terät ja lastuamisneste.....	8
3.4 Terägeometrian ja lastuamisparametrien vaikutus	9
3.4.1 Lastuamisnopeuden vaikutus.....	11
3.4.2 Rintakulman vaikutus	12
3.4.3 Nirkonsäteen vaikutus	12
3.4.4 Leikkaavan särmän säteen vaikutus	13
4 Energiankulutuksen mittaaminen	15
5 Energian säästö	16
5.1 Työstökone	16
5.2 Energiankulutuksen huomioiminen suunnittelussa	17
5.3 Tulevaisuuden näkymät.....	18
6 Yhteenveto.....	20
Lähteet	22

1 Johdanto

Konepajateollisuudessa joudutaan nykyään kiinnittämään huomiota energiankulutukseen energian korkean hinnan ja ympäristön säästämisen vuoksi. Energian kulutuksella on suuri vaikutus yrityksen kuluihin, minkä takia yritykset kiinnittävät enenevässä määrin huomiota siihen. Energiankulutuksen huomioiminen voi tuoda yritykselle merkittäviä säästöjä ja etuja. Nykypäivänä pyritään minimoimaan hukkaan menevä aika ja energia. Myös työstökone- ja työkaluvalmistajat pyrkivät valmistamaan mahdollisimman energia- tehokkaita laitteita ja työkaluja.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään lastuavan työstön energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä. Tutkielmassa keskitytään pääasiassa sorvaukseen ja jyrsintään lastuavan työstön menetelminä. Työssä tutustutaan energiankulutuksen mittauksiin ja eri tekijöiden vaikutukseen energiankulutuksen suuruuteen lastuavassa työstössä. Lisäksi arvioidaan energiansäästömahdollisuuksia ja tulevaisuuden näkymiä.

Tämä työ toteutetaan kirjallisuustutkielmana. Työ pohjautuu pääasiassa aikaisempiin tutkimuksiin aiheesta. Luvussa kaksi selvitetään, millaisia lastuavia työstökoneita on ja mihin näistä tässä tutkielmassa perehdytään tarkemmin. Luvussa kolme työssä perehdytään energiankulutukseen vaikuttaviin tekijöihin ja ilmiöihin. Luvussa neljä tutkitaan, miten energian kulutusta pystytään mittaamaan ja arvioimaan. Lopuksi luvussa viisi selvitetään mahdollisia energian säästötapoja.

Tämän työn tavoitteena on luoda kattava kuva yleisimmistä lastuavista työstötekniikoista, niiden energiankulutuksesta ja säästöpotentiaalista. Lisäksi luoda kuva energiaa säästäväistä toimenpiteistä käyttäjille ja suunnittelijoille. Työssä tutustutaan aikaisempiin tutkimuksiin, joiden pohjalta tuodaan esiin mahdollisia parannus ja energiansäästö mahdollisuuksia. Sekä tuodaan esille myös tarve huomioida energiatehokkuus ja säästötoimenpiteet kokonaisvaltaisesti yrityksien toiminnassa ja ajatusmaailmassa.

2 Lastuavat työstökoneet

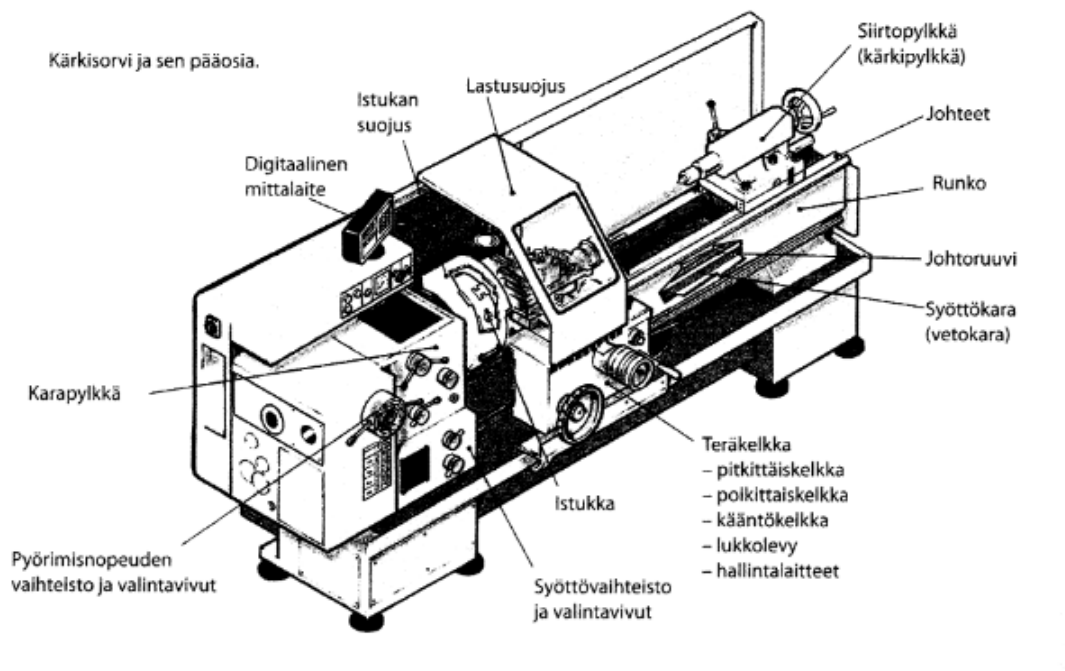
Tässä luvussa esitellään työssä käsiteltäviä lastuavan työstön koneita. Esiteltävät koneet ovat sorvi ja jyrsinkone, jotka ovat konepajoissa yleisimmin käytössä olevat lastuavat työstökoneet. Sorvaamisen ja jyrsimisen lisäksi muita lastuavia työstömenetelmiä ovat esimerkiksi poraaminen, hiominen, sahaaminen ja aventaminen. Tässä työssä ei käsitellä näitä menetelmiä. (Maaranen 2012, s. 11-16.)

2.1 Sorvi

Sorvi on yksi teollisuudessa eniten käytettävistä lastuavista työstökoneista, jolla valmistetaan pyörähdyskappaleita. Sorvit jaetaan manuaali- ja NC-ohjattuihin (Numerical Control) sorveihin. Manuaalisorvia (kuva 1) käytetään teollisuudessa yleensä sarjakooltaan pienissä valmistusmäärissä ja prototyyppien valmistamiseen. NC-ohjatuilla sorveilla valmistetaan suuria sarjoja ja vaikeasti toteutettavia muotoja.

Sorvi koostuu yleensä tukevasta valurautarungosta, sähkömoottorista ja vaihteistosta, joiden avulla saadaan haluttu pyörimisnopeus ja syöttöliike. Sorvattava kappale kiinnitetään yleensä kolmi- tai nelileukaistukkaan. Terät kiinnitetään teräpitimeen, joka liikkuu johteita myöten. Pidempien kappaleiden tukemiseen käytetään tukikärkeä ja -laakereita.

Manuaalisorvauksessa sorvin ohjaus ja käyttö tapahtuu manuaalisesti sorvaajan säätelemänä. NC-sorvin ohjaus tapahtuu automaattisesti numeerisesti ohjattuna. NC-ohjelma tehdään käsin ohjelmoimalla tai CAM-ohjelmalla (Computer Aided Manufacturing) eli tietokoneavusteisella valmistusohjelmalla. Uusimmissa sorveissa voidaan käyttää pyöriviä työkaluja ja useamman akselin työstöä. Pääasialliset sorvattavat materiaalit ovat metallit, muovit ja puu. (Maaranen 2012, s. 129-142.)



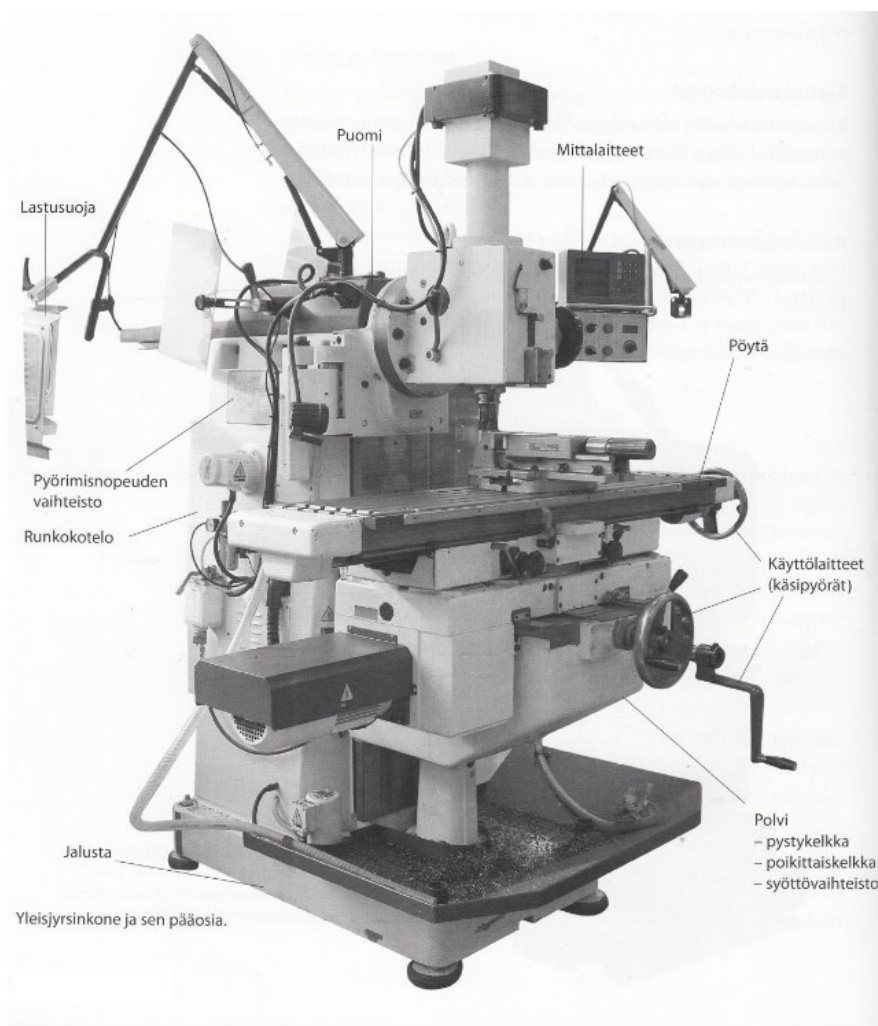
Kuva 1 Manuaalisorvin rakenne ja osat (Maaranen 2012, s. 132)

2.2 Jyrsinkone

Jyrsinkone on toinen yleisesti teollisuudessa käytettävä lastuava työstökone, jolla voidaan valmistaa tasomaisia kappaleita, uria, reikiä ja reikäpiirejä. Jyrsinkoneetkin voidaan jakaa manuaalikäyttöisiin (kuva 2) ja NC-ohjattuihin työstökeskuksiin.

Sorvista poiketen työkalu pyörii ja työstettävä kappale on kiinnitetty koneen pöytään, pöydällä olevaan kiinnittimeen tai kiinnityspalettiin. Kuten sorvauksessakin myös jyrsinnässä käytetään manuaalikoneita pienten sarjojen ja prototyyppien valmistamiseen ja NC-koneita käytetään suurten sarjojen ja vaikeiden muotojen, esimerkiksi kaksoiskaarevien pintojen valmistamiseen.

Yleisesti jyrsinkoneet ovat kolmeakselisia, mutta nykyisin useissa NC-ohjatuissa työstökeskuksissa on useampi akseli. Lisäakseleita saadaan esimerkiksi pyöröpöydällä ja kalistuvilla työstettävän kappaleen kiinnittimillä. (Maaranen 2012, s. 243–299.)



Kuva 2 Jyrsinkoneen rakenne ja osat (Maaranen 2012, s. 248)

2.3 NC-kone

NC-ohjatuissa koneissa vaadittavat toiminnot tapahtuvat automaattisesti työstöohjelmassa kuvatulla tavalla ja järjestyksessä. Manuaali- ja NC-työstökoneilla ei ole merkittäviä eroja lastuamistekniikan osalta. Työstöohjelma ohjaa muun muassa työkalun liikeraata ja vaihtoja, terän sädekompensointeja, karan pyörimisnopeutta, käynnistystä ja pysäytystä, työkalun paikoitusta sekä NC-koneen käyttöliittymää. Ohjelman tekijältä vaaditaan silti hyvää lastuavan työstön tuntemusta. NC-koneiden liikkeet suoritetaan servomootoreilla. Servolla tarkoitetaan asemointiin perustuvaa järjestelmää, jossa asema-anturista on takaisinkytkentä toimilaitteen ohjauspiiriin. Sen tehtävänä on ohjata järjestelmä haluttuun nopeuteen ja paikkaan. NC-ohjattuja koneita sorvin ja työstökeskuksen lisäksi ovat muun muassa levytyökeskukset, särmäyskoneet, lasertyöstökoneet ja robotit. (Maaranen 2012 s. 365–368)

NC-työstössä on paljon etuja verrattuna manuaalityöseen. NC-koneilla pystytään koneistamaan vaikeita muotoja ja pitämään yllä suuria lastuamisnopeuksia, jolloin työstöajat lyhenevät huomattavasti. Hyötynä on lisäksi tarkka ja tasalaatuinen tuote. Michittämätön käyttö on mahdollista käyttämällä esimerkiksi tankoautomaatteja ja robotteja kappaleen vaihdoissa. NC-tekniikka on luonut tarvetta uusille työtehtäville kuten ohjelmoitsijoille ja menetelmäsuunnittelijoille. (Maaranen 2012 s. 365–368)

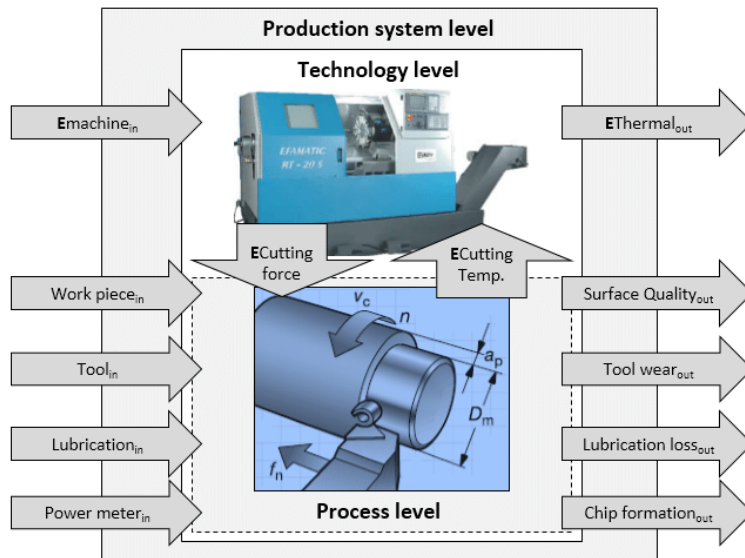
NC-ohjelma voidaan tehdä joko käsin tai CAM-ohjelmalla. Vanhemmissa työstökoneissa on ongelmana muistin riittämättömyys, koska CAM-ohjelmalla luodut ohjelmat ovat usein hyvin pitkiä. Käsin luodut ohjelmat ovat lyhyitä ja sisältävät usein ohjelmaa lyhentäviä työkiertotoimintoja. Ohjelman koodit ja sanat ovat standardisoituja, mutta ohjauksien valmistajia on useita, esimerkiksi Fanuc ja Heidenhain. (Maaranen 2012 s. 365–368)

NC-ohjelmassa työkalun sijaintitiedot määritellään koneen akselien suuntaisessa koordinaatistossa. Koordinaatistossa voidaan käyttää pääakselien, x, y, z, lisäksi myös apuakseleita kuten a, b ja c, jotka ovat pyörähdysakselit pääakselien ympärillä. Koordinaatistoissa liikeradat suoritetaan joko absoluuttisella tai inkrementaalisella ohjelmoinnilla. Ohjelma koostuu G-koodeista, joilla ohjataan liikekäskyjä ja työkiertoja. M-koodeilla ohjataan kytkentöjä kuten leikkuunestettä, tukikärkeä ja karan pysäytyksiä ja käynnistyskäskyjä. Lisäksi T-koodeilla ohjataan työkalutoimintoja. (Maaranen 2012 s. 365–368)

Nykyisin suurin osa NC-ohjelmista tehdään CAM-ohjelmalla, esimerkiksi Mastercam- ja Surfcam-ohjelmalla. CAM-ohjelmalla voidaan muuttaa CAD-malli NC-ohjelmaksi koneistusta varten. CAM-ohjelmalla tehty NC-koodi ei tue kaikkia konekohtaisia ominaisuuksia ilman postprosessoriohjelmaa. Postprosessoriohjelmassa koodi voidaan räätälöidä tukemaan laitekohtaisia ominaisuuksia.

3 Energiankulutukseen vaikuttavat tekijät lastuavassa työstössä

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin työstökoneiden eri osa-alueiden vaikutuksia energiankulutukseen. Tämän lisäksi käsitellään materiaalien, terien, lastuamislaitteiden, työstöparametrien ja terägeometrian vaikutuksia. Kuvassa 3 nähdään sorvauksen energianhal-

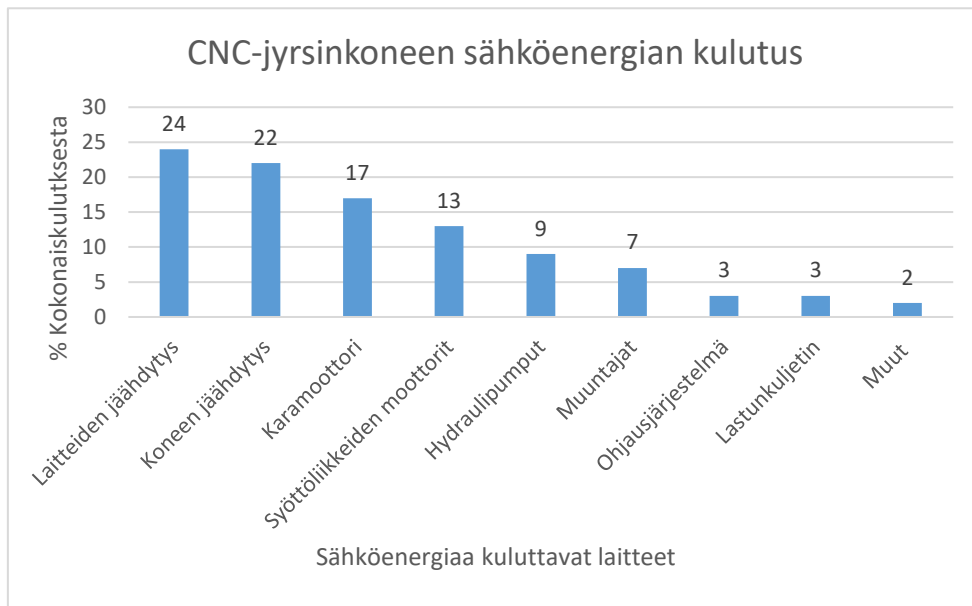


lintaan vaikuttavat tekijät.

Kuva 3 Lastuamisprosessin energiankulutukseen vaikuttavat tekijät. (Tayisepi, 2016)

3.1 Koneen osat

Työstökone koostuu karamoottorin ja syöttöliikemoottorien lisäksi apulaitteista, kuten jäähdytysjärjestelmästä, joka jäähdyttää moottoreita. Apulaitteita ovat myös hydrauliiikka- ja jäähdytysnestepumput, lastunkuljetin ja ohjausjärjestelmä. Lisäksi paineilmaa tuotetaan yleensä laitteen ulkopuolisella kompressorilla. Kokonaisenergiankulutuksesta erityisesti jäähdytys-, hydrauliiikka- ja voitelujärjestelmät muodostavat suuren osan. Yksittäisten komponenttien teknisten hävikkien lisäksi tyypillisiä syitä työstökoneiden energiahukkaan ovat ylituotanto, joutokäyntiajat ja ylimeritoitus, esimerkiksi leikkausnestejärjestelmän liiallinen paineentuotto. Tyypillisen CNC-jyrsinkoneen sähköenergian kulutus jakautuu koneen eri osille kuvan 4 mukaisesti. (Denkena, ym. 2020).



Kuva 4 CNC-jyrsinkoneen sähköenergian kulutus. (de Vos, 2020.)

Kuvan 4 mukaan jyrsinkoneen jäähdytyksiin kuluu lähes puolet (46 %) käytetystä sähköenergiasta. Karamoottori ja syöttöliikkeiden moottorit kuluttavat 30 % sähköenergiasta. Jyrsinkoneen suuresta jäähdytykseen tarvittavan sähköenergian määrästä voidaan päätellä, että sähköenergiaa muuttuu paljon lämpöenergiaksi.

Laakerit ja johteet ohjaavat pyörimis- ja lineaariliikkeitä sekä välittävät voimia. Perusvaatimuksia laakereille ovat korkea tarkkuus, jäykkyys ja minimaalinen kitka. Lisäksi vaatimuksina ovat erinomainen lämmönsiirtokyky, vaimennusominaisuudet ja kulumisen kestävyys. Energiatohokkuuden kannalta on olennaista minimoida kitkahäviöt laakerirakenteilla ja riittävällä voitelulla. Suuret pyörimisnopeudet aiheuttavat laakerissa suurempaa kitkaa, jota pyritään vähentämään öljy-ilma-voitelulla, jossa öljy voitelee ja ilma jäähdyttää syntyvän lämmön. Korkeaa pyörimisnopeutta ja tarkkuutta vaativissa laitteissa voidaan käyttää hydrostaattisia, aerostaattisia tai sähkömagneettisia laakereita, mutta ne tuovat lisäkustannuksia. (Denkena, ym. 2020).

Työstökoneiden jäähdytysjärjestelmien tärkein tehtävä on syntyvän lämmön haihduttaminen. Tärkeimpiä jäähdytettäviä komponentteja ovat esimerkiksi karat, syöttölaiteet, laakerit, johteet ja runko. Lisäksi koneen ohjauselektroniikan kaappi vaatii jäähdytystä. Hyvä jäähdytysjärjestelmä on tärkeä, sillä paikallinen lämmön muodostuminen voi aiheuttaa rakenneosien siirtymistä ja vahingoittaa niitä. Jäähdytysjärjestelmä muodostaa suurimman osan koneen sähköenergian kulutuksesta. Energiankulutuksen kannalta jäähdytysjärjestelmä tulisi optimoida käyttötarpeen mukaan. (Denkena, ym. 2020).

Hydrauliset yksiköt mahdollistavat koneissa useita toimintoja, kuten paletin ja terän vaihdon, työkappaleen kiinnityksen, sekä luovat painetta hydrostaattisille laakereille ja johteille. Hydrauliset yksiköt voivat vastata jopa 10 % työstökoneen sähköenergiankulutuksesta. Suhteellisen korkeat energian tarpeet johtuvat joutokäyntiaikoina tapahtuvasta vuotohäviöistä. (Denkena, ym. 2020).

3.2 Materiaalit

Materiaalin ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi lastuttavuuteen, terämateriaaliin, terägeometriaan ja lastuamisarvoihin. Lastuttavuus on tärkeimpiä ominaisuuksia ja lastuttavuus on hyvä, kun saadaan hyvä pinnanlaatu helposti, lastuamisen tehontarve on pieni, materiaali on tasalaatuista ja lastu muodostuu ja murtuu helposti. Lisäksi hyvä lastuttavuus pidentää terän kestoikää ja saavutetaan mittatarkka lopputulos. Materiaalin ominaisuuksiin vaikuttavat kovuus, seostus ja lämpökäsittely. ISO-standardeissa materiaalit jaetaan kuuteen pääryhmään ominaisuuksiensa perusteella (taulukko 1).

ISO-ryhmä	Materiaali	Ominaislastuamisvoima k_c (N/mm ²)	Lastuttavuus	Tehontarve (kW)
ISO P	Runsas- ja niukkaseosteisia teräksiä	1400–3100	Vaihtelee kovuudesta ja hiilipitoisuudesta riippuen	35–50
ISO M	Ruostumattomat teräkset	1800–2850	Irtosärmän muodostumista, lämpöä ja muokauslujittumista	50–65
ISO K	Valuraudat	790–1350	Helposti lastuttavia ja lyhyt lastuisia	20–35
ISO N	Ei rautametallit (Alumiini, kupari, pronssi, messinki)	350–1350	Helposti lastuttavia	5–20
ISO S	Kuumalujat superseokset ja titaani	2400–3100 superseokset 1300–1400 titaani	Lastunhallinta vaikeaa ja työstökarkenevat helposti	65–85
ISO H	Karkaistu teräs	2550–4870	Lastuamisvoimat ja teho-vaatimukset ovat melko suuret	90–100
0	Määrittelemättömät materiaalit, muovit, komposiitit, kumi, grafiitti			

Taulukko 1. Materiaalien ISO-ryhmät (Sandvik Coromant 2022b)

Taulukossa 1 esitettyjen ISO-standardiluokkien sisällä materiaalien ominaisuuserot voivat olla kuitenkin suuria, joten terävalmistajilla on omia tarkempia materiaalin jakojärjestelmiä. Esimerkiksi Sandvik Coromantilla on tarkempi CMC-koodijärjestelmä, jossa materiaaleja luokitellaan lastuttavuuden mukaan, minkä avulla valmistaja antaa työkalu- ja lastuamisarvosuosituksia. (Sandvik Coromant 2022b)

Eri valmistajat ovat kehittäneet koneistamisen kannalta helposti lastuttavia materiaaleja, jotka kuitenkin täyttävät vaaditut ominaisuudet. Esimerkiksi Ovakon M-steelin on tutkittu vähentävän koneistuskustannuksia 30–40 %. (Ovako 2022)

Materiaalien laaja kirjo ja erilaiset ominaisuudet vaativat suunnittelijalta tietämystä materiaalien lastuttavuudesta ja soveltuvuudesta käyttötarkoitukseen. Materiaalille sopimatomat lastuamisarvot voivat aiheuttaa irtosärmän muodostumista työkaluun ja vaikeuttaa halutun pinnankarheuden saavuttamista sekä aiheuttaa terän nopeaa kulumista.

3.3 Terät ja lastuamisneste

Työkalun kunnolla ja kestävyydellä on lastuamiseen ja energiankulutukseen suuri merkitys. Terien kulumisen ja vaihtaminen pidentää työstöaikoja. Terien kulumistyyppejä ovat viistekuluminen, kuoppakuluminen, irtosärmänmuodostus, lovikuluminen, plastinen muodonmuutos, lämpösäröt ja särmänmurtuminen. (Sandvik Coromant 2022c)

Yleisimmät terämateriaalit ovat kovametallit, pikateräs (HSS, High Speed Steel) ja keraamiset teräaineet. Pikateräksestä valmistetaan esimerkiksi kierukkaporia, jysrintappeja ja muototeriä. Pikateräksen lämmönkestävyys on huono, joten lastuamisarvot ovat huomattavasti pienempiä kuin kovametalliterillä. Teollisuudessa käytetään nykyään kovametallisia poria ja jysrintappeja. Kovametalliterät kestävät korkeita lämpötiloja ja suuria lastuamisarvoja ja -tehoja. Kovametalliterät ovat yleisimmin käytettyjä teriä ja ne ovat yleensä erimuotoisia ja eri varsiin sopivia kääntöpaloja. Keraamisten teräaineiden etuna on korkea lämmönkestävyys, jonka ansiosta voidaan käyttää korkeita lastuamisnopeuksia. Keraamiset terät ovat yleistyneet erityisesti valurautojen ja kovien terästen sarjatuo- tannossa. (Maaranen 2012, s. 25–29.)

Työkaluvalmistajat ovat kehittäneet terän kestoikää pidentäviä pinnoitteita teräpaloihin. Uudet pinnoitteet kestävät paremmin korkeita lämpötiloja ja hakkaavaa työstöä, joten työstössä voidaan käyttää suurempia lastuamisnopeuksia, mikä nopeuttaa työstöaikaa ja vähentää terän vaihtotarvetta. Lastunmurtouralla on suuri vaikutus lastuvirtaukseen ja murtumiseen. Lastunmurtourat on puristettu ja sintrattu kovametallipaloihin eri materiaaleja ja lastunvahvuuksia varten. Lastunmurtaja voi olla myös erillinen ruuvikiinnitteinen pala terän päällä. (Sandvik Coromant 2022c)

Lastuamisnesteen tärkeimpiä tehtäviä on terän ja työstettävän kappaleen jäähdytys ja voitelu sekä lastujen poistaminen. Yleisimmin lastuamisneste on veden ja öljyn emulsio. Lisäksi voidaan käyttää öljyä tai paineilmaa lastunpoistoon ja jäähdytykseen. Lastuamisneste parantaa myös pinnanlaatua ja vaadittujen toleranssien saavuttamista. Nykyisillä teräpalalaaduilla voidaan koneistaa myös ilman lastuamisnestettä ympäristö- ja säästösyistä. Lastuamisnestettä voidaan syöttää teränvarren läpi tai ulkopuolelta. Lastuamisnestepumppujärjestelmiä on matala- ja korkeapaineiset pumput. Matalapainepumppulla

neste syötetään yleensä ulkoisesti. Korkeapainepumput on tarkoitettu sisäiseen leikkuunesteen syöttöön ja ne tuottavat 80–100 baarin paineen. Lastuamisnesteen pumput vievät suhteellisen vähän energiaa laitteen kokonaisenergiankulutuksesta. Joissain tapauksissa sisäinen korkeapainenesteen syöttö voi lisätä kokonaisenergiatehokkuutta, jos sen avulla mahdollistetaan suuremmat materiaalin poistonopeudet. Kustannuksia syntyy nesteen hankinnasta ja ympäristöystävällisestä hävittämisestä. Neste ei saa aiheuttaa terveyshaittaa, eikä siinä saa kasvaa bakteereja. Lastuamisesta ja leikkausnesteestä syntyy savukaasuja ja höyryjä, jotka on poistettava huoneilmasta. Joissakin tapauksissa kaasut on poistettava suodattimien läpi, mikä aiheuttaa lämpö- ja sähköenergian kustannuksia. (Sandvik Coromant 2022c; Denkena, ym. 2020)

3.4 Terägeometrian ja lastuamisparametrien vaikutus

Lastuamisarvot ovat merkittävä tekijä energiankulutuksen ja työstöajan kannalta lastuavassa työstössä. Lastuamisarvot vaikuttavat lastun murtumiseen ja vaaditun pinnan laatuarvon saavuttamiseen.

Lastuavalla työkalulla työstettäessä energia jakaantuu pääasiassa primääriselle ja sekundääriselle leikkausalueelle kuvan 5 mukaisesti. Materiaalin leikkausmuodonmuutos tapahtuu ensin primäärialueella. Tämän jälkeen lastu virtaa terän leikkaavan reunan ja rintapinnan yli sekundäärileikkausalueelle. Primäärialueella kulutettua energiaa pidetään hyödyllisenä energiana, koska siellä tapahtuu varsinainen materiaalin leikkaantuminen. Sekundäärileikkausalueella kulutettua energiaa pidetään tuottamattomana, sillä se kuluu kitkan voittamiseksi.

Kokonaisleikkausenergia, U_c , voidaan määrittää leikkausenergian, U_s ja kitkaenergian, U_f , summana seuraavasti.

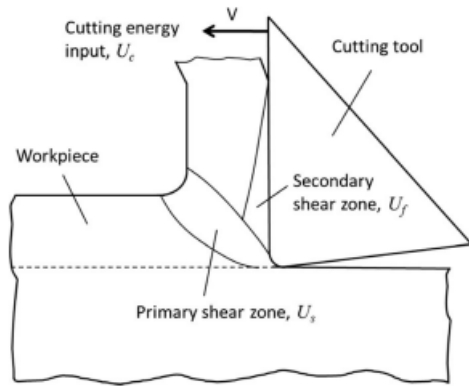
$$U_c = U_s + U_f = F_s V_s + F_f V_c \quad (1)$$

jossa F_s on leikkausvoima, V_s on leikkausnopeus, F_f on kitkavoima ja V_c on lastun nopeus.

Leikkaustehokkuus E_c voidaan määrittää seuraavasti:

$$E_c = \frac{U_s}{U_c} \quad (2)$$

Energioiden yksikkönä on J/mm^3 . (Ma, ym. 2014.)



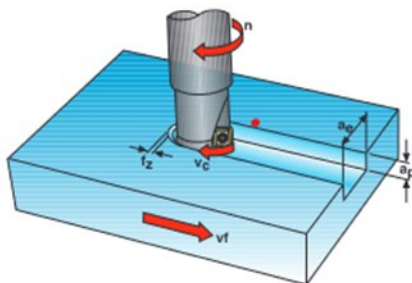
Kuva 5 Leikkausenergiat. (Ma, ym. 2014)

Nettoteholla P_c (kW) voidaan kuvata lastuamiseen tarvittavaa tehoa ja voidaan varmistaa koneen tehon riittävyys. Kaava 3 on nettoteho jyrsinnässä ja kaava 4 sorvauksessa.

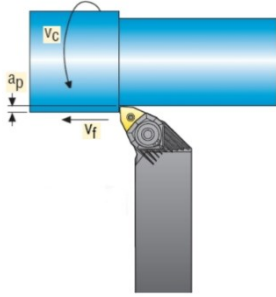
$$P_c = \frac{a_e \cdot a_p \cdot v_f \cdot k_c}{60 \cdot 10^6} \quad (3)$$

$$P_c = \frac{v_c \cdot a_p \cdot f_n \cdot k_c}{60 \cdot 10^3} \quad (4)$$

Nettotehon kaavassa jyrsinnälle (3) a_e (mm) on radiaalinen ja a_p (mm) on aksiaalinen lastuamissyvyys, v_f (mm/min) on pöytäsyöttö ja k_c (N/mm²) ominaislastuamisvoima. Sorvauksen nettotehon kaavassa (4) v_c (m/min) on lastuamisnopeus, a_p (mm) lastuamissyvyys, f_n (mm/r) syöttö/kierros ja k_c (N/mm²) ominaislastuamisvoimaa. Nämä parametrit näkyvät kuvissa 6 ja 7. Ominaislastuamisvoima k_c on materiaalikohtainen vakio.



Kuva 6 (Milling catalog 2021, Seco Tools)



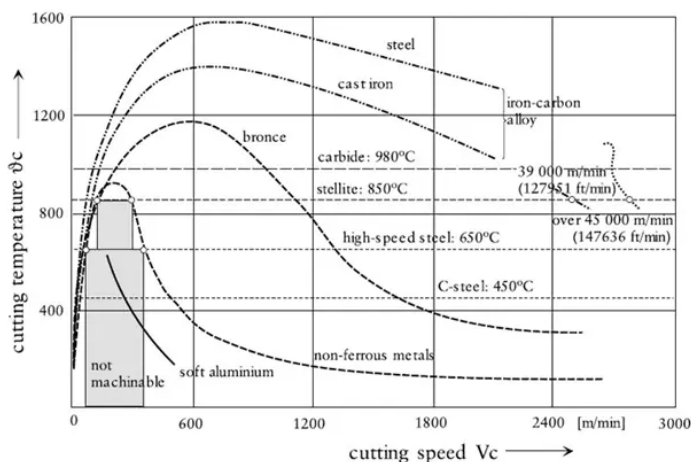
Kuva 7 (Seco Tools 2022)

3.4.1 Lastuamismisnopeuden vaikutus

Lastuamismisnopeudella tarkoitetaan teräsärmän pintaanopeutta suhteessa lastuttavaan kappaleeseen (Sandvik Coromant, 2022b). Sorvissa lastuamismisnopeus on työstettävän kappaleen kehänopeus ja jyrsinnässä lastuamismisnopeus määritetään työkalun halkaisijan mukaan. Lastuamismisnopeuden valintaan vaikuttaa terämateriaali, lastuttavan kappaleen materiaali ja työstökoneen ja kappaleen kiinnityksen tukevuus.

Suurnopeuskoneistuksessa käytetään suuria syöttönopeuksia ja karan pyörimisnopeuksia. Suurella lastuamismisnopeudella lyhennetään työkiertoaikaa ja pidennetään työkalun käyttöikää. Suurnopeustyöstössä lastu poistetaan niin nopeasti, että se siirtää vain vähän lämpöä työstettävään kappaleeseen. Suurnopeustyöstössä saavutetaan hyötyä lyhyellä koneistusajalla ja esimerkiksi samalla työkalulla voidaan suorittaa rouhinta ja viimeistely. Suurnopeustyöstössä pystytään ohjelmoimaan optimaalisia työstöratoja ja -nopeuksia.

Kuvassa 8 havaitaan, että kun tietyn leikkausnopeuden ylityttyä alenee lämpötila leikkausprosessissa. Leikkausnopeus, jossa lämpötila alkaa alenemaan vaihtelee eri materiaaleilla. Lämpötilan muutos lastuamismisnopeuden kasvaessa ei ole lineaarista. Kappaleen lämpötilan muutos lastuamismisnopeuden muuttuessa voi olla suuri, esimerkiksi hiiliteräksellä lämpötila on lähes 1200 °C lastuamismisnopeuden ollessa 600 m/min, kun taas lämpötila on noin 400 °C lastuamismisnopeuden ollessa 1800 m/min. (Keller Technology Corporation 2019.)



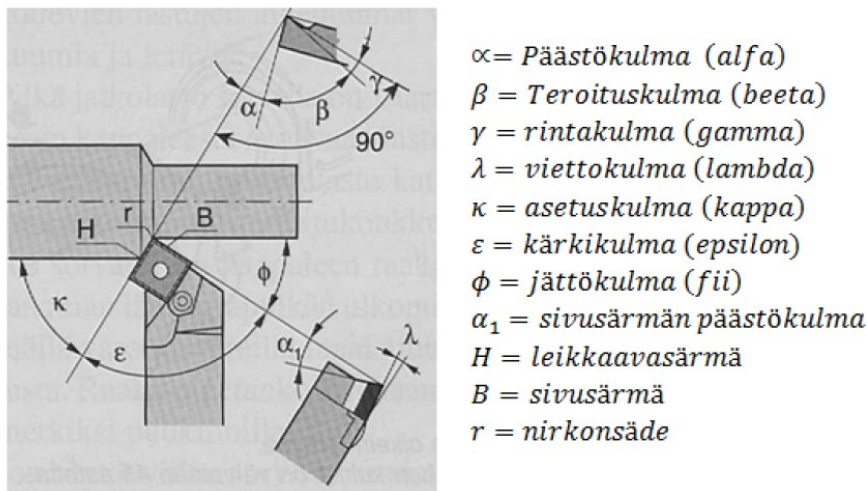
Kuva 8 Koneistuksen lämpötila suurnopeusjyrsinnässä. (Keller Technology Corporation 2019)

Lastuamisnopeuden kasvaessa ja muiden lastuamisparametrien pysyessä vakiona kokonaisleikkaus-, leikkaus- ja kitkaenergia pienenevät. Kitkaenergian suuruus on noin puolet leikkausenergian suuruudesta lastuamisnopeudesta riippumatta. Suurella lastuamisnopeudella lastuttaessa materiaalilla on vähemmän aikaa muotoutua leikkausalueella, mistä johtuen leikkausvoima on pienempi. Suuri leikkausnopeus vaatii paljon tehoa, mutta leikkaukseen kulutettu energia on vastaavasti pienempi, koska tarvitaan lyhyempi aika materiaalin irrottamiseen. Energioiden muutos nopeuden suhteen näkyy kuvassa 10a. (Ma, ym. 2014.)

3.4.2 Rintakulman vaikutus

Rintakulman, (γ , kuva 9), muutoksella on suuri vaikutus kokonaisleikkausenergiaan. Kokonaisleikkausenergia pienenee lähes 30 %, kun rintakulma muuttuu välillä -20° - $+20^\circ$. Leikkausenergia pienenee rintakulman kasvaessa ja muutos nopeutuu kulman muuttuessa positiiviseksi. Kitkaenergia pienenee rintakulman kasvaessa välillä -20° - 0° ja kitkaenergia kasvaa rintakulman kasvaessa välillä 0° - $+20^\circ$. Rintakulman ollessa positiivinen, kitka- ja leikkausenergiat lähestyvät toisiaan kallistuskulman lähestyessä $+20^\circ$:ta. Nämä muutokset on esitetty kuvassa 10b. (Ma, ym. 2014.)

Rintakulman ollessa positiivinen terän leikkaava reuna tulee terävämmäksi, mistä johtuen muodonmuutos leikkausalueella vähenee ja vaatii vähemmän voimaa. Kitkaenergia kasvaa rintakulman ollessa positiivinen, sillä lastun nopeus kasvaa rintakulman kasvaessa. (Ma, ym. 2014.)



Kuva 9 Sorvinterä teräkulmat (Maaranen 2012, s. 140.)

3.4.3 Nirkonsäteen vaikutus

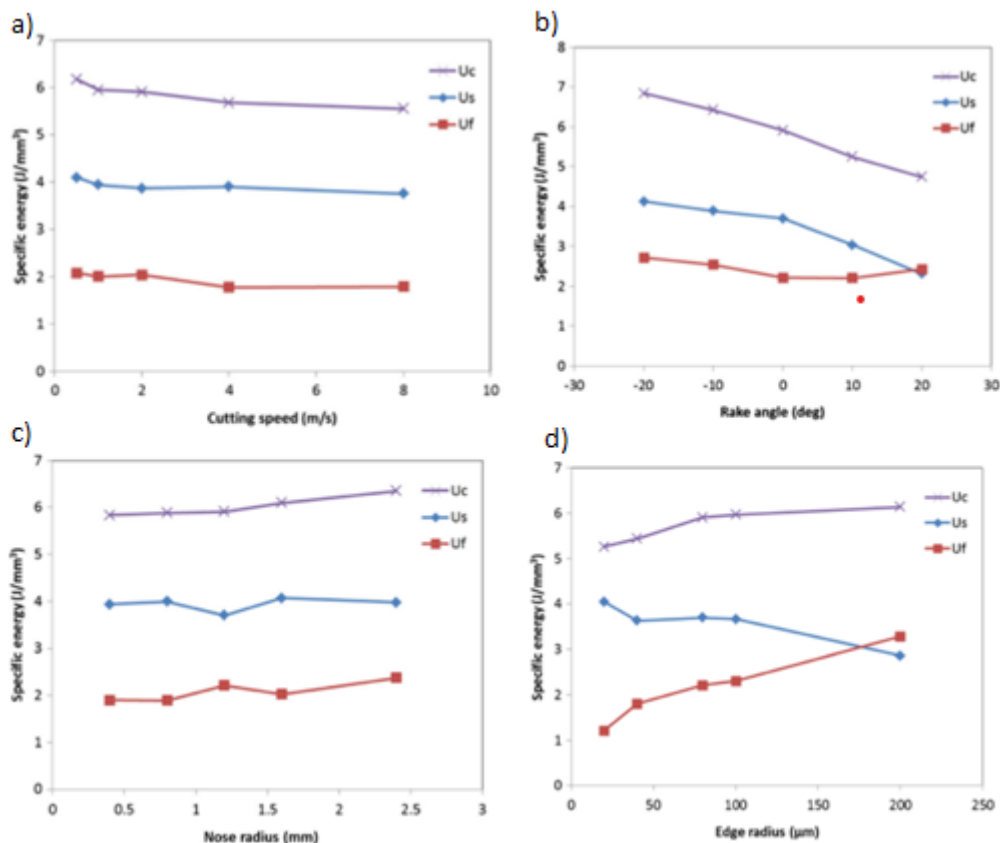
Nirkonsäde, (r kuva 9), on terän kärjessä oleva pyöristys, joka tekee työstöjäljen. Terän nirkonsäteen valintaan vaikuttaa, onko työstössä kyse rouhinnasta vai viimeistelystä. Nirkonsäteen vaikuttaa terän kestoon ja sorvattavan kappaleen pinnanlaatuun. (Maaranen, 2012)

Kokonaisleikkausenergia kasvaa lähes lineaarisesti nirkonsäteen kasvaessa välillä 0,4–2,4 mm. Tämä johtuu kitkaenergian kasvusta nirkonsäteen kasvaessa. Nirkonsäteen muutos ei vaikuta merkittävästi leikkausenergiaan. Energioiden muutokset näkyvät kuvassa 10c. Nirkonsäteen kasvaessa terän kaareva osuus kasvaa ja aiheuttaa enemmän kolmiulotteisuutta muodonmuutokseen, mikä vaikeuttaa lastuamista. (Ma, ym. 2014.)

3.4.4 Leikkaavan särmän säteen vaikutus

Leikkaavan särmän, (h kuva 9), terävyydellä ja kulumisella on suurimerkitys kokonaisleikkausenergian suuruuteen. Reunasäteen kasvaessa 20–200 μm kokonaisleikkausenergia kasvaa 17 %. Kokonaisleikkausenergian kasvu johtuu kitkaenergian suuresta kasvusta reunasäteen kasvaessa. Terän ollessa terävä kokonaisleikkausenergia koostuu pääasiallisesti leikkausenergiasta ja terän tylsyessä kitkaenergian osuus kasvaa ja jopa ylittää leikkausenergian osuuden kokonaisleikkausenergiasta. (Ma, ym. 2014.)

Leikkaus- ja kitkaenergioiden muutos johtuu leikkaus- ja kitkavoimien kasvusta, sillä leikkausnopeus ja lastun nopeus pysyvät lähes vakioina. Tämä eroaa kallistuskulman aiheuttamista energioiden muutoksista, jossa sekä nopeudet ja voimat muuttuvat. Terävällä terällä kokonaisleikkausenergiaa käytetään pääasiallisesti leikkaamiseen eikä kitkavoimaa vastaan. Kokonaisleikkausenergian kannalta on paras käyttää työkalua, jonka reunasäde on pieni, jotta saadaan paras hyötysuhde. Tämä ilmenee kuvassa 10d. (Ma, ym.



2014.)

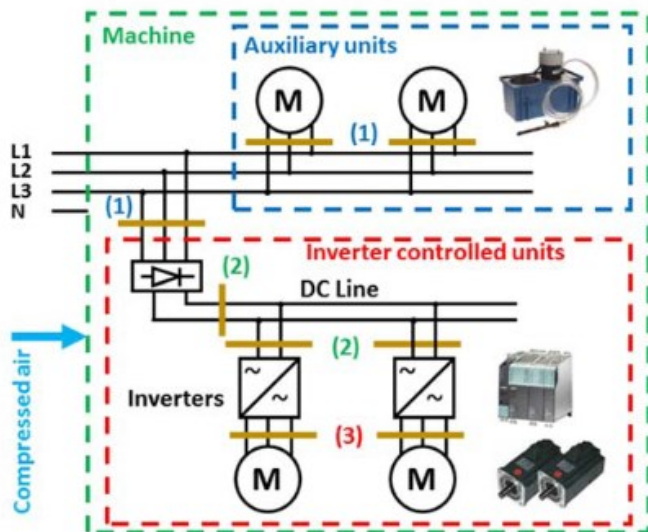
Kuva 10 a) Lastuamisnopeuden, b) rintakulman, c) nirkonsäteen ja d) leikkaavan särmän vaikutus energiankulutukseen. (Ma, ym. 2014)

Yhteenvetona edellä esitetystä voidaan sanoa, että kokonaisleikkausenergiankulutuksen minimoimiseksi tulee käyttää korkeaa leikkausnopeutta, suurta rintakulmaa, pientä nirkonsädettä ja pientä leikkaavan särmän sädettä. Energian säästön kannalta tehokkaat parametrit voivat olla työkalujen keston kannalta haitallisia. Esimerkiksi korkea leikkausnopeus voi aiheuttaa nopeaa työkalun kulumista ja pieni nirkonsäde voi aiheuttaa työkalun kärjen rikkoutumisen ja vaikeuttaa halutun pinnankarheuden saavuttamisen. (Ma, ym. 2014.)

4 Energiankulutuksen mittaaminen

Tässä luvussa käsitellään energian kulutuksen mittaamista ja arviointia. Energiankulutuksen mittaaminen on tärkeää, jotta saadaan totuudenmukainen tieto kulutuksesta, laitteen kunnosta ja eri komponenttien ja parametrien vaikutuksesta. Mittaus voidaan suorittaa yksinkertaisimmillaan yleismittarilla, mutta on olemassa myös suoraan energiankulutuksen mittaavia laitteita, kuten energia-analysaattoreita

Työstökoneiden energianmittausta vaikeuttavat koneiden eri osa-alueiden erilaiset sähköjärjestelmät. Työstökoneiden apulaitteet, kuten pumput ja jäähdyttimet, käyttävät usein kolmivaiheista 50 Hz vaihtovirtaa, kun taas syöttölaitteiden servomoottoreille syötetään invertterien kautta kolmivaiheista 2.5–8.4 kHz vaihtovirtaa. Kuvassa 11 esitetään tyypillinen sähköpiiri työstökoneessa, josta nähdään, miten sähkövirta jakaantuu apulaitteiden ja moottorien välillä. Työstökoneen käyttämä paineilma tuotetaan yleensä ulkopuolisella kompressorilla, jota käytetään usein myös muiden laitteiden paineilman tuottoon. Tällöin työstökoneen kuluttaman paineilman energiankulutusta on vaikea arvioida. (Vyrubal, ym. 2015)



Kuva 11. Työstökoneen sähköpiiri (Vyrubal, ym. 2015)

Energiankulutusta voidaan mitata lyhyen aikavälin tapahtumana, kuten yksittäisen työstöliikkeen tai NC-ohjelman ajon ajalta, tai pidemmän aikavälin mittausjaksolla, kuten vuorokausi- ja vuosikulutus. Työstökoneiden moottoreissa kulutettava sähkövirta vaihtelee suuresti valmiustilasta työstön aikana kulutettavaan sähkövirtaan. Valmiustilassa sähkövirta voi olla 0.2–0.5 A, kun taas työstön aikana kulutus voi olla yli 100 A. Tällöin mittalaitteiden mittausväli ja -tarkkuus pitää olla laaja-alaista. Energiankulutus voidaan mitata kannettavalla ulkopuolisella laitteella, kuten Metrel MI 2883 energia-analysaattorilla tai koneen sähkötauluun sijoitettavalla laitteella, kuten KMB systems SMC 144. (Vyrubal, ym. 2015)

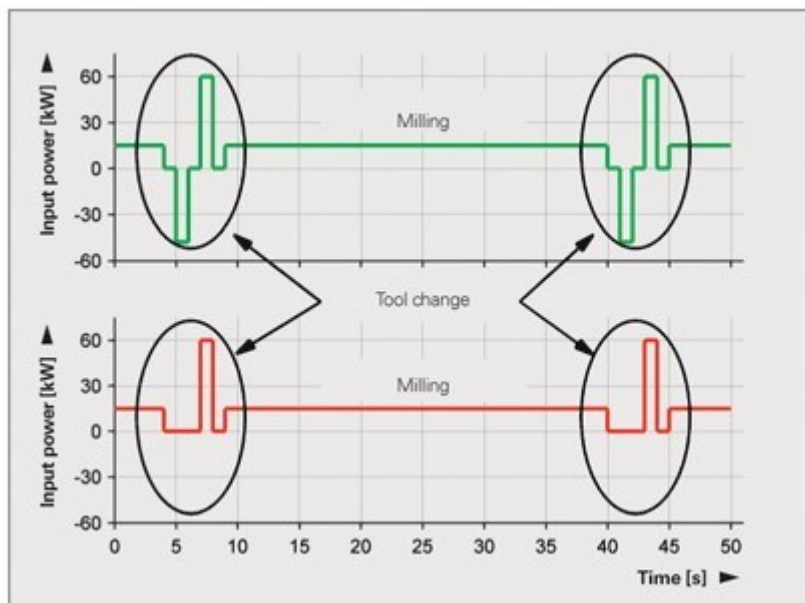
5 Energian säästö

Tässä luvussa selvitetään energiansäästö mahdollisuuksia ja toimenpiteitä energian tehokkaaseen käyttöön.

5.1 Työstökone

Työstökoneet sisältävät useita moottoreita ja apukomponentteja, joiden energiankulutus vaihtelee eri koneistuksen vaiheissa. Esimerkiksi rouhinnassa suurilla lastunpoisto nopeuksilla koneen energian kulutus on lähellä maksimia. Työstökoneiden valmistajat pyrkivät valmistamaan mahdollisimman energiatehokkaita laitteita. (Heidenhain, 2010)

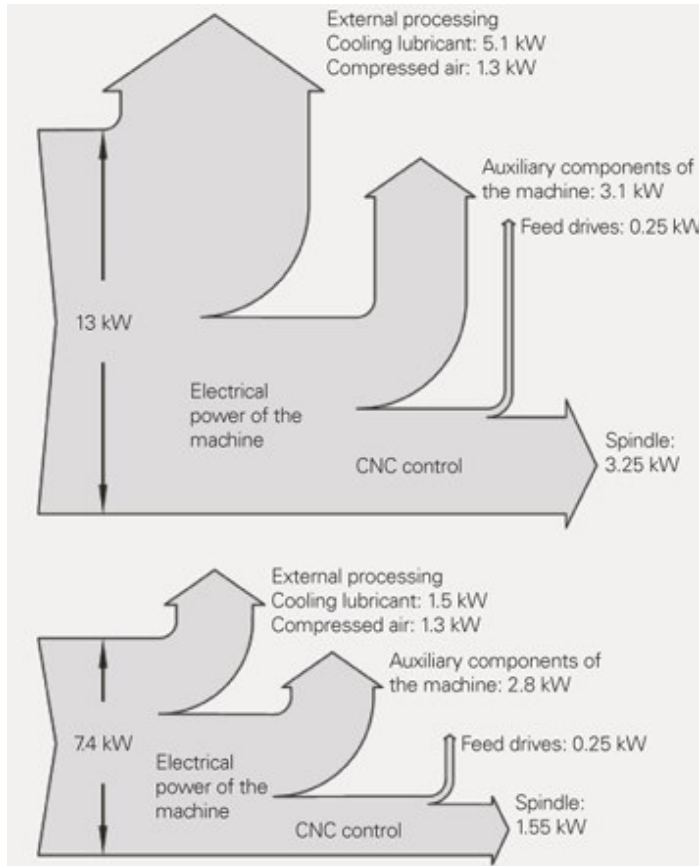
Työstökoneen jokainen kiihdytys prosessi vaatii vastineeksi jarrutusprosessin. Jarrutusprosessissa perinteisissä työstökoneissa hukkaenergia muutetaan lämmöksi jarruvastuksissa. Tämä hukkaenergia on kuitenkin mahdollista muuttaa sähköenergiaksi regeneratiivisella jarrutuksella ja palauttaa sähköverkkoon. Sähköenergian palauttamiseen tarvittavat komponentit aiheuttavat kuitenkin häviötä. Regeneratiivinen jarrutusjärjestelmä on hyödyllisimmillään, kun työstöprosessissa on työkalujen vaihtoja tai muita pysäytyksiä usein. Kuvan 12 vihreästä käyrästä ilmenee, että karan käynnistäminen kuluttaa 60 kW ja karan pysähtyessä regeneroituu 48 kW. Ilman regeneraatiota jarrutuksessa liike-energia muuttuu lämmöksi. Syntyvä hukkalämpö voidaan käyttää hyödyksi lämmitykseen kylminä vuodenaikoina, mutta lämpiminä aikoina se lisää jäähdytyksen tarvetta. (Moradnashad, ym. 2016; Heidenhain 2010; Denkena, ym. 2020)



Kuva 12 Työkalun vaihdossa regeneroituva sähköteho (Heidenhain 2010)

Työstökoneen apulaitteet kuluttavat paljon energiaa. Kuten kuvasta 13 nähdään apulaitteet, paineilma sekä jäähdytys ja voitelu kuluttavat 9.5 kW koko laitteen 13 kW:sta. Sähköenergiaa voidaan myös säästää kytkemällä tarpeen mukaan pois ylimääräisiä apulaitteita, esimerkiksi hydraulikka, karan jäähdytys tai paineilman syöttö laitteita. Apulaitteiden kuten hydraulikan jäähdytyksen poiskytkemisellä ei saa olla lämpötila vaikutuksia

laitteen runkoon, joka voi aiheuttaa muutoksia laitteen mittatarkkuuteen. (Moradnazhad, ym, 2016; Heidenhain 2010)



Kuva 13 Sähkötehon jakautuminen rouhinnassa ja viimeistelyssä. (Heidenhain 2010)

Hydrauliikka yksiköiden energiatehokkuuden parantamiseksi voidaan käyttää vaihtuvanopeuksisia ja -tilavuuksellisia pumppuja, paineenvaraajia ja optimoituja komponentteja minimoimaan vuodot hydrauliikkapiireissä. Hydrauliikkapiirin vuotojen vähentäminen johtaa aina energiatehokkuuden paranemiseen. Pumppujen ja paineenvaraajien hyödyt riippuvat kuitenkin koneen kokoonpanosta ja käyttötapauksesta. Vakionopeuspumput yhdistettynä paineenvaraajaan on tehokas ratkaisu, kun hydrauliikan tehontarvetta esiintyy satunnaisesti. Vaihtuvanopeuksiset pumput tarjoavat energiatehokkaan ratkaisun kokoonpanoihin, joissa hydrauliikan tehon tarpeet vaihtelevat. Lastunkuljettimen sähköenergian kulutusta voidaan vähentää pysäyttämällä se kokonaan tuottamattomina aikoina ja käynnistämällä tarpeen mukaan. (Denkena, ym. 2020)

5.2 Energiankulutuksen huomioiminen suunnittelussa

Energiankulutuksen kannalta yritysten on huomioitava monia asioita aina koneiden hankinnasta ja ohjelmistoista työstettävän kappaleen suunnitteluun. Konepajojen kehittämistoimissa ja investoinneissa tulisi huomioida digitaalisten tuotantomenetelmien hyödyntäminen ja uusien teknologioiden osaaminen kehittämistoimissaan ja investoinneissaan. Yrityksen tulee tarkoin harkita, milloin se tekee uusia laitehankintoja vai modernisoidaanko vanhoja laitteita ja ohjelmistoja. Laitehankintaa tehdessä tulee tarkoin arvioida, onko laite omaan tuotantoon sopiva. On myös harkittava, onko taloudellisempaa suorittaa

koneistus alihankintana. Työkalujen hankinnassa tulee huomioida kulutuskestävyys ja soveltuvuus toiminta tarkoitukseen, jotta vältetään turhilta työkalun vaihdoilta ja tuotannon keskeytyksiltä. (Denkena, ym. 2020)

Työstettävän kappaleen suunnittelussa on otettava huomioon materiaalin sopivuus käyttökohteeseen ja sen lastuamisominaisuudet. Lisäksi tulisi huomioida aihion koko ja muoto. Koneistettavan kappaleen kiinnittäminen ja työstöjärjestys tulisi suunnitella, niin että vältetään turhilta kiinnityksen muuttamisilta ja säilytetään mittatarkkuus. Kiinnityksessä voidaan käyttää vaihtopalletteja, jolloin työstökone pystyy jatkamaan toimintaa keskeytyksettä aihion vaihdon aikana. Myös työturvallisuus tulee huomioida kaikissa vaiheissa. (Denkena, ym. 2020)

CAM-ohjelmistojen ja työkalujen valmistajat ovat kehittäneet energiatehokkaita menetelmiä. Esimerkiksi Mastercam on kehittänyt dynaamisen jysintämenetelmän, jossa käytetään suurta aksiaalista ja pientä radiaalista lastuamissyvyyttä verrattuna perinteisiin työstömenetelmiin. Tällöin saadaan suurempi lastuamisnopeus, lyhyempi työstöaika ja pienemmät työkalukustannukset. Haittoina on pitkä NC-koodi, jolloin vanhempien työstökoneiden muisti ei riitä koodin lukemiseen. Monissa CAM-ohjelmistoissa on jäännöskoneistus toiminto. Jäännöskoneistuksessa suuremmalla työkalulla koneistetaan ensin ja muodot, joita ei voida koneistaa suurella työkalulla tehdään pienemmällä työkalulla. Tällöin lastunpoisto on tehokkaampaa ja työstöaika pienempi kuin jos koneistaisi kokonaan pienemmällä terällä. Lastuaminen on energiatehokasta, kun työkalu liikkuu jouhevaa rataa ja vältetään teräviä suunnan muutoksia. Esimerkiksi taskua jysittäessä alaspäin liikutaan kierreradalla ja taskua laajennetaan spiraaliradalla, jolloin lastun irrotus on tehokainta. Kun lastuamis liikkeet pidetään jouheina, vähentää se koneen ja komponenttien värähtelyä ja heilumista, jolloin saadaan parempi pinnanlaatu. Ohjelmoijan pitää välttää turhat työkalun nostot ja minimoida lastuamattomat liikematkat. CAM-ohjelmilla voidaan simuloida koneistuksen työstöratoja, jolloin voidaan ehkäistä kalliita ja työläitä törmäyksiä työstökoneilla. Simuloinnilla voidaan nähdä koneistusliikkeet ja miltä valmis kappale näyttää koneistuksen jälkeen. (Rensi 2022; Camcut 2022)

5.3 Tulevaisuuden näkymät

Lastuavan työstön energian kulutusta tutkitaan laajalti ja energiankulutusta vähentäviä keinoja kehitetään koko ajan. Yritysten on hyödynnettävä saatavilla olevaa tekniikkaa ja innovaatioita, sekä koulutettava henkilöstöään, jotta se säilyttää kilpailukykynsä. Tulevaisuudessa työstökoneissa korostuu tekninen kehitys, moniakselisuus ja älykkäät toiminnot. Lisäksi tietotekninen puoli työstökoneiden valvonnassa ja ohjauksessa, valmistuksen suunnittelu ja apulaitteet kehittyvät koko ajan. Myös vaihtoehtoisia menetelmiä kehitetään lastuavan työstön tilalle, kuten hybridivalmistus, jossa tarpeen mukaan materiaalia lisätään tai koneistetaan pois. Myös 3D-tulostus kehittyy jatkuvasti, mutta se ei tule korvaamaan lastuavaa työstöä. (The Future of Things 2020)

Tulevaisuudessa työstökoneet kehittyvät enenevässä määrin moniakselisuuteen ja tekoälyn määrä lisääntyy. Yhä useammin työstökoneet ovat 4- tai 5-akselisia, mikä lisää koneiden joustavuutta ja mahdollistaa kappaleiden valmistuksen vähemmällä kiinnityksillä. Koneinäköä käytetään erityisesti työkalujen kulumisen tarkkailuun ja valmistettavan tuotteen laadun valvontaan, esimerkiksi pinnanlaadun ja mittavirheiden havaitsemiseen. Ko-

nenäkö vaatii korkearesoluutioisen kamerajärjestelmän ja hyvän taustavalaistuksen, joiden järjestäminen on työstö olosuhteissa usein vaikeaa. Laitteistot kuitenkin kehittyvät koko ajan, jolloin niiden käyttö mahdollisuudet lisääntyvät. Myös muita työkalun kunnonvalvontajärjestelmiä on, kuten lasermittausjärjestelmä. Kosketuksettomat työkalujen asetus-, mittaus- ja valvontajärjestelmät mahdollistavat automaattisen työkalun asetuksen ja valvonnan. (Hashmi, ym. 2022; The Future of Things 2020)

Työstökoneiden ohjausjärjestelmät kehittyvät enemmän käyttäjää ohjaavaan suuntaan ja IT-taitojen osaamista vaaditaan entistä enemmän. Älykkäät ohjausjärjestelmät mukautuvat koneessa ajan myötä tapahtuvien muutosten, kuten kuormituksen, lämpötilan, koneen asennon ja kulumisen vuoksi. Nämä toiminnot tapahtuvat automaattisesti ja reaaliaikaisesti. Esimerkiksi syöttönopeutta voidaan mukauttaa todellisen kuormituksen ja lämpötilan mukaan, jolloin työstökoneen ominaisuuksia pystytään hyödyntämään optimaalisesti. Älykkäät koneet kykenevät myös opastamaan käyttäjää ja suorittamaan itsenäisesti viaretsintää. (The Future of Things 2020)

6 Yhteenveto

Energiatehokkuuden parantaminen ja säästötoimenpiteet ovat nousseet tärkeiksi kehityskohteiksi konepajoissa energian korkean hinnan vuoksi. Useimmiten energiansäästöä haetaan lämmityskustannuksista ja muista taloteknisistä tekijöistä, vaikka työstökoneista ja muistakin tekijöistä on saatavilla merkittäviä energiansäästö mahdollisuuksia. Tässä työssä selvitettiin lastuavan työstön energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ja kehitysmahdollisuuksia.

Ensimmäisenä toimenpiteenä on selvittää laitteiden tämänhetkinen kunto ja tehokkuus. Lisäksi tulisi selvittää laitteiden sopivuus omaan tuotantoon ja tulisiko koneiden kapasiteettia muuttaa tai siirtää tuotteen valmistus alihankkijalle. Tämän jälkeen tulisi tutkia onko mahdollista modernisoida tai päivittää jo käytössä olevia koneita energiatehokkaammiksi vai uusitaanko konekanta. Kustannus syistä vanhojen koneiden päivittäminen voi olla kannattavampaa kuin uusien kalliiden koneiden hankkiminen, mutta kannattaa tehdä tarkka selvitys ja laskelmat uuden energiatehokkaan koneen hankinnasta.

Koneiden ja laitteiden osalta energiatehokkuus on parantunut huomattavasti. Energiansäästöä syntyy koneiden moottoreissa tapahtuneesta tekniikan kehityksestä ja edistyneemmästä ohjaustekniikasta. Myös apulaitteiden energiatehokkuus on kehittynyt merkittävästi. Apulaitteiden energiankulutus on lähes puolet kokonaisenergiankulutuksesta, jolloin niiden oikealla mitoituksella voidaan saada huomattavaa säästöä.

Säästöjä voidaan saavuttaa myös työkaluvalinnoilla. Työkaluvalmistajat ovat kehittäneet kestävimpiä työkaluja ja pinnoitteita, jolloin terät pysyvät pidempään paremmassa kunnossa ja kestävätkin suurempia lastuamisnopeuksia. Tämä johtaa työstöaikojen lyhenemiseen, jolloin saavutetaan energiansäästöä. Kovametalliterät ovat korvanneet pikaterästerät lähes täysin. Työkalujen ja terien kehityksen vuoksi yrityksillä on syytä myös päivittää työkalujaan ja teriään.

Terägeometria on ollut terävalmistajien kehityksen kohteena, jotta työstötapahtuma saadaan toimimaan tehokkaasti. Terägeometrialla voidaan vaikuttaa lastunmurtumiseen ja lastuamisnopeuksiin, jolloin lastuamistapahtumaa voidaan optimoida mahdollisimman energiatehokkaaksi. Lastuamisnopeudet ovat kasvaneet huomattavasti ja on siirrytty suurnopeuskoneistukseen. Suurnopeuskoneistuksella saavutettuja etuja ovat lyhyet koneistusajat ja pidentyneet terien käyttöiät.

CAM-ohjelmat ja työstökoneiden ohjausjärjestelmät ovat hyvin kehittyneitä ja mahdollistavat nopean ja tehokkaan työskentelyn. CAM-ohjelmistoilla on mahdollista optimoida kappaleen työstöratoja ja hyödyntää työstökone mahdollisimman energiatehokkaasti. Simulointitoiminnoilla voidaan tehdä törmäystarkasteluja ja nähdä työstöliikkeet ja valmis kappale. Työstökoneiden ohjausjärjestelmät kehittyvät käyttäjää ohjaavaan suuntaan. Myös työkalun ja työstettävän kappaleen mittatarkkuuksien ja kunnon seurantajärjestelmät kehittyvät ja yleistyvät. Konepajateollisuus on panostanut ekologisuuteen ja laitevalmistajat pyrkivät energiatehokkaaseen tuotekehitykseen. Yritysten tulisi tiedostaa ja käyttää uusia teknologioita, jotta ne olisivat ajan tasalla kehityksessä. Tietotekniikan ja sen ammattitaidon tarve kasvaa koko ajan ja yritysten tulisi kouluttaa työntekijöitään käyttämään laitteita ja ohjelmistoja pystyttäisiin tehokkaasti.

Koneiden uusiminen ei ole aina tehokkain ratkaisu vaan vanhojen koneiden energiatehokkaalla käytöllä voidaan saada merkittäviä säästöjä. Energiatehokkuuden parantamiseen tehtyjä investointeja ei saada maksettua säästetyillä energiakuluilla. Osalla säästökeinoista on hyvin pieniä vaikutuksia, kun taas osalla on merkittäviäkin vaikutuksia. Energiatehokkuuden parantamiseen ei ole yhtä tapaa, vaan se koostuu useasta osa-alueesta.

Lähteet

Camcut (2022). Mastercam dynaaminen jyrsintä. Viitattu 17.4.2022. Saatavissa: <https://www.camcut.fi/tuki/ohjeet/mastercam-dynaaminen-jyrsinta/>

Denkena, B. & Abele, E. & Brecher, C. & Dittrich, M.A. & Kara, S. & Mori, M. (2020). Energy efficient machine tools. CIRP Annals - Manufacturing Technology Vol 69. s. 646-667. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.008>

Hashmi, A.W. & Mali, H.S & Meena, A. & Khilji, I.A. & Hashi, M.F. & Saffe, S.N.b.M. (2022) Machine vision for the measurement of machining parameters: A review. Materials today: proceedings Vol 56, part 4. s.1939-1946. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.271>

Heidenhain (2010). Aspects of Energy Efficiency in Machine Tools. Viitattu 15.4.2022. Saatavissa: https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdf/en/01_Products/Technische_Dokumentation/TI_Energy_Efficiency_in_Machine_Tools_ID751261_en.pdf

Keller Technology Corporation (2021). High Speed Machining 101. Viitattu 19.3.2022. Saatavissa: <https://www.kellertechnology.com/blog/high-speed-machining-101/>

Ma, J. & Ge, X. & Chang, S.I. & Lei, S. (2014). Assessment of cutting energy consumption and energy efficiency in machining of 4140 steel. International journal of advanced manufacturing technology. Vol. 74. S. 1701-1708. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6101-3>

Maaranen, K. (2012) Painos 1. Koneistus. Helsinki, Suomi: Sanoma Pro. ISBN 978-952-63-0284-3.

Moradnazhad, M. & Unver, H, O. (2010) Energy efficiency of machining operations: A review. Journal of Engineering Manufacture. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/0954405415619345>

Ovako. (2022) M-Steel. Viitattu 20.2.2022. Saatavissa: <https://www.ovako.com/fi/terasvalikoima/ovakon-brandit/m-steel/>

Rensi (2022). SURFCAM Waveform dynaaminen työstörata. Viitattu 17.4.2022. Saatavissa: <https://www.rensi.fi/tuotteet/ohjelmistot/surfcam/surfcam-waveform/>

Sandvik Coromant. (2022a) GC4325-laadulla uudenlaista suorituskykyä teräksen sorvaukseen. Viitattu 19.3.2022. Saatavissa: https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/news/press_releases/pages/gc4325.aspx

Sandvik Coromant. (2022b) Lastuttavat materiaalit. Viitattu 20.2.2022. Saatavissa: <https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>

Sandvik Coromant. (2022c) Terien kuluminen. Viitattu 20.2.2022. Saatavissa: <https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>

Seco Tool. (2021). Milling catalog 2021.2. Viitattu 19.3.2022 Saatavissa: <https://user-content.azureedge.net/Content/UserContent/Documents/033567.pdf>

Tayisepi, N. (2016) Investigating the Energy Efficiency and Surface Integrity when Machining Titanium Alloys, International Conference on Competitive Manufacturing. Viitattu 10.4.2022. Saatavissa: https://www.researchgate.net/profile/Nicholas-Tayisepi/publication/318499828_Investigating_the_Energy_Efficiency_and_Surface_Integrity_when_Machining_Titanium_Alloys/links/596e00f14585152dd4ab56ca/Investigating-the-Energy-Efficiency-and-Surface-Integrity-when-Machining-Titanium-Alloys.pdf?origin=publication_detail

The Future of Things. (2020). A Look at New Technology in the CNC Machining Industry. Viitattu: 18.4.2022. Saatavissa: <https://thefutureofthings.com/14725-a-look-at-new-technology-in-the-cnc-machining-industry/>

de Vos, P. (2020) Kuinka kestävä kehitys toteutuu valmistavassa teollisuudessa?, Engineering Suomi. Viitattu 20.2.2022. Saatavissa: <https://www.engineering-suomi.com/technical-articles/25858-kuinka-kest%C3%A4v%C3%A4-kehitys-toteutuu-valmistavassa-teollisuudessa>

Vyroubal, J. & Kolar, M. & Bubla, V. (2015) Machine tools energy consumption measurement devices. XXI Imeko World Congress. Saatavia: <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC20-380.pdf>

