

**PAIKALLISEN JÄÄHDYTYKSEN JA LÄMMITYKSEN VAIKUTUKSET
KRIITTISEEN TEHOON**

Maisa Kivistö

Liikuntafysiologian kandidaatintutkielma
Liikuntatieteellinen tiedekunta
Jyväskylän yliopisto
Syksy 2023

TIIVISTELMÄ

Kivistö, M. 2023. Paikallisen jäähtyksen ja lämmityksen vaikutukset kriittiseen tehoon. Liikuntatieteellinen tiedekunta, Jyväskylän yliopisto, liikuntafysiologian kandidaatintutkielma, 35 s.

Kriittinen teho (CP) on olennainen osa ihmisen kestävyys suorituskykyä. Kriittistä tehoa voidaan pitää korkeimpana aerobisena aineenvaihdunnallisena tasona, minkä tasapainotila voidaan ylläpitää. Työn määrää kriittisen tehon yläpuolella (W') ei voida ylläpitää kovinkaan pitkään. Ympäristön ääriolosuhteiden kasvaessa ihmisen lämmönsäätelyjärjestelmä joutuu koetukselle. Kuuma ja kylmä ympäristö vaikuttavat sydän- ja hengitystiejärjestelmään ja näin ollen suorituskykyyn. Paikallisten lämpötilamuutoksien vaikutuksia erityisesti kriittiseen tehoon ei ole tutkittu. Näin ollen tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää vaikuttaako paikallinen lämpötilamuutos muuttujiin CP ja W' kolmen minuutin maksimitestissä (3MT).

Tämä kandidaatintutkielma toimi pilottina ensi vuonna toteutuvalla suuremmalla poikkileikkaustutkimuksella Jyväskylän yliopistossa. Yhteensä kahdeksan aktiivista liikuntatieteellisen tiedekunnan opiskelijaa osallistuivat tutkimukseen. Jokainen tutkittava polki Monarkin polkupyöräergometrillä yhdellä tutkimuskerralla noin tunnin välein yhteensä kolme 3MT:ä. Testin vastus oli 4,5 % tutkittavan kehonpainosta. Jokainen testi suoritettiin erilaisella paikallisella lämpöprotokollalla (neutraali, lämmitys, jäähtyminen) ja testijärjestys satunnaistettiin jokaiselle tutkittavalle. Lämmitys ja jäähtyminen tehtiin osittaisella vesiupotuksella. Tutkittavan jalat polvesta alaspäin olivat vedessä 45 minuuttia ja reisien ympärillä olivat mansetit, joissa vesi kiersi. Neutraaliprotokollassa tutkittava altistui vallitsevalle normaalille huoneenlämmölle. Lämpötilaa mitattiin ihon pinnalta kuudesta eri kohtaa iButton-sensoreilla.

Toistovarianssianalyysillä (ANOVA) ei havaittu merkitsevää eroa kriittisen tehon ($p = 0,422$) eikä W' :n ($p = 0,247$) osalta eri lämpöprotokollissa. Sen sijaan sykkeen osalta (HR_{peak}) havaittiin merkitsevä ero neutraali- ja jäähtymisprotokollien välillä ($p < 0,001$) sekä lämmitys- ja jäähtymisprotokollien välillä ($p < 0,005$). Hapenoton (VO_{2peak}) osalta havaittiin myös merkitsevä ero lämmityksen ja jäähtymisen välillä ($p = 0,005$). Neutraali- ja lämmitysprotokollien välillä ei havaittu missään muuttujassa merkitsevää eroa ($p > 0,05$).

Tämän pilottitutkimuksen perusteella johtopäätös on, että eri lämpöprotokollilla suoritettujen 3MT:en välillä ei ole eroa CP:ssa eikä W' :ssa. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että lämpötilamuutoksia saatiin aikaan ihon pinnalla, mutta saavutettuja muutoksia menetettiin melko paljon siirtymäajassa testin alkuun. On myös otettava huomioon havaitut virhelähteet sekä pieni otoskoko. Tämän vuoksi tuloksia ei voida yleistää suurempaan populaatioon, mutta tämä pilotti toimi vahvana askeleena kohti suurempaa tutkimusta. Kaiken kaikkiaan kriittinen teho ympäristöfysiologian osa-alueella kaipaa jatkotutkimusta, jotta urheilijoiden suorituskykyä voitaisiin jatkossa optimoida paremmin eri ympäristöolosuhteissa.

Asiasanat: jäähtyminen, lämmitys, kriittinen teho, 3MT

KÄYTETYT LYHENTEET

CP	critical power, kriittinen teho
CWR	constant work rate, vakiotehoinen suoritus
HR _{peak}	peak heart rate, korkein syke
LT	lactate threshold, laktaattikynnys
PP	peak power, huipputeho
VE	ventilation, ventilaatio
VO _{2peak}	peak oxygen consumption, korkein hapenotto
VO _{2max}	maximal oxygen consumption, maksimaalinen hapenotto
W'	W prime, W pilkku

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

1 JOHDANTO.....	1
2 ELIMISTÖN LÄMPÖTILAN SÄÄTELY	2
2.1 Elimistön lämpötilan mittaus.....	3
2.2 Kylmyyden vaikutukset.....	4
2.2.1 Kylmyyden vaikutus suorituskykyyn	5
2.2.2 Kylmyyden vaikutus kriittiseen tehoon.....	6
2.3 Kuumuuden vaikutukset.....	7
2.3.1 Kuumuuden vaikutus suorituskykyyn	7
2.3.2 Kuumuuden vaikutus kriittiseen tehoon.....	8
3 KRIITTINEN TEHO JA W'	9
3.1 Kuormitusalueet	10
3.2 Hapenoton kinetiikka.....	11
3.2.1 Kardiodynaaminen komponentti	12
3.2.2 Primääri komponentti	12
3.2.3 Hidas komponentti.....	13
3.3 Kriittisen tehon ja W' :n mittausmenetelmät.....	14
4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESI.....	16
5 TUTKIMUSMENETELMÄT	17
5.1 Tutkimusasetelma ja tutkittavat.....	17
5.2 Aineiston analyysi ja tilastolliset menetelmät	19
6 TULOKSET	21
7 POHDINTA.....	24
LÄHTEET	31

1 JOHDANTO

Kriittinen teho (CP; *critical power*) on merkittävä tekijä liikuntafysiologiassa, sillä se on perusparametri aerobisessa toiminnassa ja olennainen ihmisen kestävyys suorituskyvyn ymmärtämisessä (Goulding & Marwood 2023). CP merkitsee rajaa, joka erottaa kaksi erilaista kuormitus-alueita, joissa toisessa fysiologinen homeostaasi voidaan ylläpitää, kun taas toisessa se ei ole mahdollista (Jones ym. 2019). CP:n rajamailla suoritettu urheilu horjuttaa merkittävästi homeostaasia ja CP:n yläpuolella tehty työ (W') muuttuukin nopeasti sietämättömäksi (Richard & Koehle 2022). Tämän tekee CP:sta kultaisen standardin (*golden standard*), kun tavoitteena on määrittää maksimaalinen metabolinen tasapainotila (*steady state*) (Jones ym. 2019). Muuttujia CP ja W' voidaan käyttää fyysisen kunnan määrittämisessä, harjoittelun suunnittelussa sekä kilpailuvauhdin määrittelyssä (Craig ym. 2019).

Ihmisen fysiologiassa ydinlämpötila on yksi tarkimmin säädellyistä muuttujista (Kurz 2008). Ruumiinlämmön ääripäiden eli hypotermian ja hypertermian tiedetään heikentävän myös lihasten toimintaa (Crowley ym. 1991). Ympäristötekijät, kuten kylmyys ja kuumuus, luovat ympäristöstressiä, joka horjuttaa homeostaasia entisestään (Richard & Koehle 2022). Ilmaston jatkaessa lämpenemistään, lämpimien kausien lämpötilat tulevat nousemaan ja tämä tulee entisestään koettelemaan ihmisen lämmönsäätelyjärjestelmän kapasiteettia (Vecellio ym. 2023). Kuumissa ympäristöissä esijähdytyksellä (*pre-cooling*) voidaan laskea kehon lämpötilaa. Esijähdytyksen myötä lämpötila on alhaisempi suorituksen alussa ja sen aikana. (Kenney ym. 2020, 310) Kylmässä ympäristössä esilämmityksellä (*pre-heating*) voidaan mahdollistaa ihon ja lihasten lämpötilan säilyminen termoneutraalina eli normaalilämpöisenä. Samalla voidaan rajoittaa fyysisen suorituskyvyn teoreettista heikkenemistä ylläpitämällä lihasten verenkiertoa ja hapenkuljetuskapasiteettia. (Gagnon ym. 2017) Paikallisen jäähdytyksen ja lämmityksen vaikutuksia kriittiseen tehoon ei ole varsinaisesti tutkittu. Näin ollen tämä osa-alue tarvitsee lisää tutkimusta ottaen huomioon ympäristön kasvavat ääriolosuhteet. Ymmärrys siitä, miten lämpötila vaikuttaa kriittiseen tehoon voi olla tulevaisuudessa ratkaisevan tärkeää erityisesti urheilijoiden suorituskyvyn optimoinnissa eri ympäristöolosuhteissa, mutta myös terveyden kannalta.

Tämä tutkielma toimi pilottina suuremmalle tutkimukselle, joka on suunniteltu kuvaamaan todellista urheilijan suoritusta, jossa ympäristötekijät vaikuttavat paikallisesti lihaksen lämpötilaan ennen muutoksia ydinlämpötilassa. Pilotin tarkoituksena oli selvittää, onko lämpötilalla vaikutusta muuttujiin CP ja W' kolmen minuutin maksimitestissä (3MT).

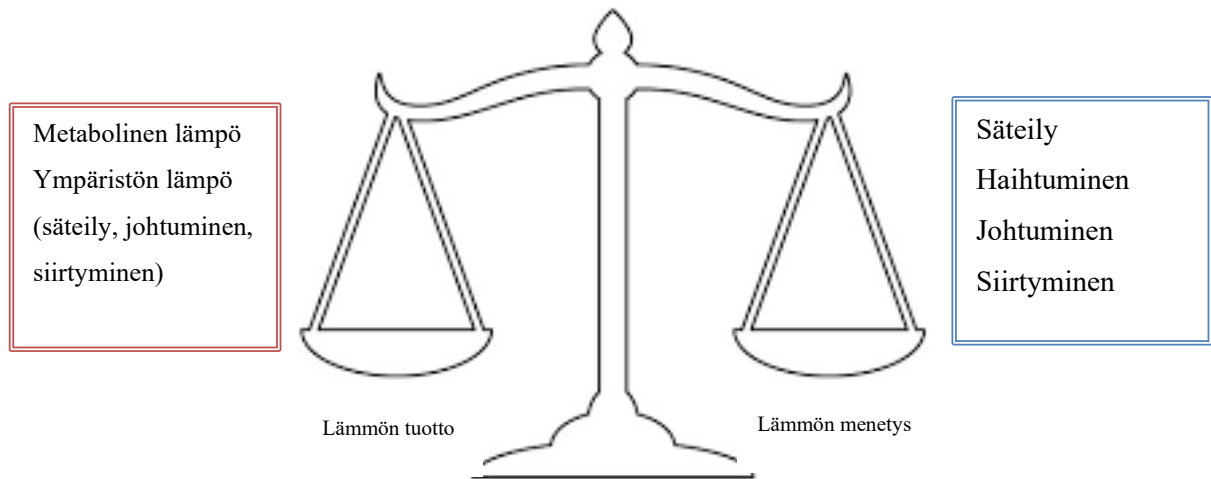
2 ELIMISTÖN LÄMPÖTILAN SÄÄTELY

Elimistön lämpötilaa säätelee aivoissa sijaitseva hypotalamus, joka pyrkii pitämään ydinlämpötilan normaalina eli $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Lämmönsäätelyä aktivoi ihon lämpöreseptorit sekä hypotalamuksen läpi virtaavan veren lämpötilan muutokset. (McArdle ym. 2015, 617) Lämpötilaa säädellään siis lähes kokonaan hermostollisen palautejärjestelmän avulla. Hypotalamuksen preoptinen alue sisältää suuren määrän kuumaa aistivia neuroneita ja noin kolmanneksen verran siitä kylmää aistivia neuroneita. Ihon pinnalla on taas kymmenkertaisesti enemmän kylmä- kuin kuumareseptoreita, jolloin periferian lämpötila-aistimuksen pohjautuvat pitkälti viileyden ja kylmän aistimiseen, lämpimän sijasta. Ydinlämpötilareseptorit sijaitsevat selkäytimessä, sisäelimissä sekä rintakehän suurissa laskimoissa tai niiden välittömässä läheisyydessä. Nämä altistuvat ydinlämpötilalle enemmän kuin pintalämpötilalle, mutta aistivat silti ihon reseptoreiden tapaan pääasiassa kuitenkin kylmyyttä enemmän kuin kuumuutta. Todennäköisesti sekä ydinlämpötilareseptorit että ihon pinnan reseptorit pyrkivät ehkäisemään hypotermian muodostumisen. Nämä perifeeriset signaalit yhdistyvät posteriorisessa hypotalamuksessa anteriorisen hypotalamuksen preoptisen alueen signaalien kanssa, joista muodostuu elimistön reaktio lämmönsäätelyyn. (Hall & Hall 2021, 905–906)

Pienet päivittäiset muutokset ydinlämpötilassa ovat mahdollisia vuorokausirytmien vuoksi ja naisilla kuukautiskierron myötä, mutta lämpötila ei yleensä muutu kuin muutaman asteen kymmenyksen (Kurz 2008). Elimistön lämmönsäätelyjärjestelmä suojaa ensisijaisesti ylikuumenemiselta, ja lämmönmenetykselle onkin neljä erilaista prosessia: säteily, haihtuminen, johtuminen ja konvektio (siirtyminen) (McArdle ym. 2015, 618). Lämmöntuottoon kuuluu ympäristöstä saadun lämmön lisäksi metabolinen lämmöntuotanto, johon sisältyy solujen lepoaineenvaihdunta, lihasaktiivisuuden lisäämä aineenvaihdunta, tyroksiinin ja muiden hormonien lisäämä solujen aineenvaihdunta sekä solujen kasvanut kemiallinen aineenvaihdunta lämpötilan kasvaessa. Lisäksi ruoansulatuksen vaatiman aineenvaihdunnan kasvu eli ruoan termogeeninen efekti on metabolistä lämmöntuotantoa. (Hall & Hall 2021, 901)

Ydinlämpötila nousee, kun lämpöä tuottavia tekijöitä on enemmän kuin mekanismeja lämmönmenetykselle ja toisaalta laskee kylmässä, mikäli lämmön menetys on suurempaa kuin tuotto (Castellani & Tipton 2016; Hall & Hall 2021, 901; McArdle ym. 2015, 616). Kuten kuvasta 1 voidaan nähdä, ydinlämpötilan ylläpito on siis jatkuvaa tasapainottelua elimistössä tuotetun

lämmön, ympäristöstä saadun lämmön ja elimistöstä menetetyn lämmön kanssa (Kenney ym. 2020, 302). Lämpötilan mittaustapoja on useita ja niitä käsitellään seuraavaksi tarkemmin.



KUVA 1. Ydinlämpötilan ylläpito on tasapainoilua lämmön tuoton ja lämmön menetyksen kanssa. Mukailtu Kenney ym. (2020, 303).

2.1 Elimistön lämpötilan mittaus

Lämpötilaa voidaan mitata monella tapaa, ja toiset tavat ovat luotettavampia kuin toiset. Ydinlämpötilaa voidaan mitata suusta, kinalosta, ruoansulatuselimistöstä (Lim ym. 2008), tärykalvolta sekä rektumista (Crowley ym. 1991; Lim ym. 2008). Suusta mitattuna lämpötila on yleensä 36–37,5 °C (Hall & Hall 2021, 901), mutta oraalilämpötila antaa epäluotettavan kuvan ydinlämpötilasta raskaan liikunnan jälkeen, johtuen suun ja hengitysteiden liikunnan aikaisen ventilaation haihduttavan jäähtymisen vuoksi (McArdle ym. 2015, 637). Esimerkiksi suusta mitattu lämpötila on useasti puoli astetta matalampi verrattuna rektumista mitattuun lämpötilaan (Hall & Hall 2021, 901).

Lämpötilan mittaus kinalosta ja tärykalvolta on urheilussa epäkäytännöllistä, sillä mittaukseen vaikuttaa useampi tekijä. Muun muassa ympäristön lämpötila, hikoilu ja karvoitus vaikeuttavat kinalomittausta eikä tärykalvolta pysty jatkuvasti mittaamaan lämpötilaa. Ruoansulatuselimistöstä lämpötilan mittaus onnistuu nieltävän sensorin avulla tai asettamalla lämpötilanturi ruokatorveen. (Lim ym. 2008) Nieltävä sensori on todettu hyväksi ja validiksi menetel-

mäksi, sillä sensori aistii lämpötilanmuutokset nopeammin kuin rektumin mittari. Haittapuolena on, ettei sensorin sijaintia pysty vakioimaan. (Byrne & Lim 2007) Rektumista lämpötilaa voidaan mitata asettamalla lämpötila-anturi 8 cm sulkihalihaksesta eteenpäin. Tämä onkin yleisin ydinlämpötilan mittaussuomenetelmä laboratorio-olosuhteissa. Mittaustapa on vakaa ja ympäristötekijät eivät vaikuta mitattuun lämpötilaan, mutta toisaalta tämä menetelmä voi tuottaa epä-mukavuutta tutkittavissa. (Lim ym. 2008)

Lihaksen lämpötilaa voidaan mitata lihakseen asetettavalla lämpötila-anturilla, joka on invasiivinen toimenpide (Crowley ym. 1991; Flouris ym. 2015). Lisäksi tämä on aikaa vievä ja kallis tekniikka, joka sisältää infektioriskin ja vaatii koulutetun henkilöstön. Tämän vuoksi on kehitteillä myös non-invasiivisia menetelmiä lihaksen lämpötilan mittaamiseen. (Flouris ym. 2015) Ihon lämpötila nousee ja laskee ympäristön mukaan, mutta ydinlämpötila pysyy suhteellisen vakiona (Hall & Hall 2021, 901). Ihon pintalämpötilaa voidaan mitata ihon pinnalle asetettavilla sensoreilla, jotka mittaavat ja tallentavat lämpötila-arvoja (Daanen ym. 2006). Seuraavaksi käsitellään hieman tarkemmin kylmyyden ja kuumuuden vaikutuksia ihmisen fysiologiaan.

2.2 Kylmyyden vaikutukset

Kylmyys vaikuttaa elimistöön monin tavoin ja eri termit kuvaavat erilaisia tilanteita. Termeillä kylmäaltistus (*cold exposure*) ja kylmästressi (*cold stress*) on hieman eroa. Kylmäaltistus tarkoittaa altistumista kylmään ympäristöön, kun taas kylmästressillä tarkoitetaan kehon fysiologista vastetta kylmään. Kylmätoleranssilla (*cold tolerance*) taas tarkoitetaan kykyä mukautua kylmästressiin niin, että fysiologinen rasitus minimoidaan. (Castellani & Tipton 2016)

Kylmästressissä ihon alaiset kylmäreseptorit supistavat perifeerisiä verisuonia, jolloin verenvirtaus ohjautuu lämpimämpään ytimeen (McArdle ym. 2015, 617). Verivolyymin uudelleenjakautuminen periferiasta ja verekkäistä elimistä, kuten iho, lihakset ja munuaiset, ytimeen on perusteellinen selviytymismekanismi, joka turvaa aivojen ja sydämen toimintoja (Wilson ym. 2007). Tämän myötä lämmön siirtyminen ytimestä pintakudokseen laskee, mikä tehostaa kehon eristävyttä ja samalla alentaa ihon lämpötilaa (Castellani & Tipton 2016). Kehon lämpötilan laskiessa pyritään sitä nostamaan verisuonten supistamisen eli vasokonstriktion lisäksi piloerektiolla eli ihokarvoja kohottamalla sekä tehostamalla termogeneesiä eli lämmöntuottoa (Hall & Hall 2021, 906–907). Fyysinen aktiivisuus on paras keino kylmyyttä vastaan ja kehon

sisäinen lämpötila määrittää sen, miten elimistön lämmönsäätely vastaa kylmyyteen (McArdle ym. 2015, 618).

Vilunväristykset (*shivering*) ovat rytmisiä lihassupistuksia, jotka tuottavat metabolista lämpöä vapauttamalla kulutetun energian pääosin lämpönä. Samanaikaisesti ulkoista työtä tehdään vain minimaalisesti. (Castellani & Tipton 2016) Väristyksiä voi ilmetä jopa raskaassa liikunnassa, mikäli ydinlämpötila on alhainen. Yksinään väristykset eivät kuitenkaan pysty estämään ydinlämpötilan laskua. Hormonit vaikuttavat myös lämmöntuottoon kylmässä. Erityisesti lisämunuaisen ytimestä erittyvät hormonit adrenaliini ja noradrenaliini nostavat lämmöntuottoa kylmäältistuksessa sekä kilpirauhashormoni tyroksiinin erityys nostaa lepoaineenvaihduntaa pitkityneessä kylmästressissä. (McArdle ym. 2015, 618) Kylmyyden vaikutus fysiologiaan on selkeä ja vaikutukset heijastuvat myös suorituskykyyn.

2.2.1 Kylmyyden vaikutus suorituskykyyn

Useat yksilölliset tekijät vaikuttavat elimistön ja periferian jäähtymisnopeuteen kylmäältistuksessa, kuten kehonkoostumus ja muoto, ikä, sukupuoli, etnisuus sekä fyysinen kunto (Castellani & Tipton 2016). Lihaksen jäähtyminen aiheuttaa paikallisesti vasokonstriktiota, hidastaa reaktiivnopeuksia sekä lisää solunsisäistä viskositeettia. Tämä heikentää hapen virtausta ja diffuusiokapasiteettia eli kudosten hapetusta, joka johtaa solu ympäristöä kohti anaerobista tilaa veren pH laskun kanssa (Gagnon ym. 2020). Kylmästressin alaisuudessa olevilla lihassoluilla on heikompi supistumisentsyymiaktiivisuus, mikä vaikuttaa supistumisnopeuteen sekä poikkisiltojen muodostumiseen dynaamisessa liikkeessä. Näin ollen lihas toimii heikommin jäädytettynä. (Bennett 1985) Aerobiset sekä voima/teho suoritukset heikentyvät kylmäältistuksessa ja heikentymisen määrä riippuu lihaksen lämpötilan jäähtymisasteesta. Lisäksi kylmä vaikuttaa sydän- ja verisuonitoimintoihin esimerkiksi sykkeen, iskutilavuuden, sympaattisen hermoston toiminnan ja perifeerisen kokonaisvastuksen kautta. Kylmäältistumisen vaikutuksia fyysiseen suorituskykyyn – erityisesti aerobiseen suorituskykyyn – ei kuitenkaan ole tutkittu läpikotaisin. (Castellani & Tipton 2016)

Lihaksen jäähtyminen kylmävesihauteessa johtaa heikentyneisiin supistumisominaisuuksiin. Käsi- ja jalkalihaksesta otetulla pinta-EMG:llä on huomattu, että jäähtyminen nostaa motoristen yksi-

köiden määrää ja niiden aktiopotentiaalin kestoa, mutta alentaa motoristen yksiköiden amplitudia. Lihaksen jäähdytys heikentää siis maksimaalista voimantuottoa (Mallette ym. 2017) sekä anaerobisen maksimaalisen 30 sekunnin Wingate-testin tehontuottoa jopa neljänneksellä. Tämä johtuu todennäköisesti supistumisnopeuden alentumisesta. (Crowley ym. 1991) Kylmä ympäristö muuttaa lihasten ko-aktivaatiota sekä agonisti-antagonisti-suhdetta (Racinais & Oksa 2010) nostamalla antagonistin ja laskemalla agonistin aktiivisuutta, joka voi olla osasyynä heikentyneeseen lihasten suorituskyykyyn kylmässä (Oksa ym. 1995). Raajojen jäähdytys voi vaikuttaa tehon tuotantoon yhdellä tai useammalla tasolla tahdonalaisuudesta voimantuottoon asti. Näitä ovat muun muassa motivaatio, heikentynyt motoneuroneiden rekrytointi ja lihaksen supistumisen aktivaatio sekä impulssin hidastuminen selkäytimessä, perifeerisissä hermoissa, hermo-lihasliitoksessa ja lihaksen sisäisesti. (Crowley ym. 1991)

Esijäähdytys on keino alentaa elimistön lämpötilaa ennen suoritusta kuumissa ja kosteissa ympäristöissä. Tämän myötä urheilija pystyy aloittamaan suorituksensa alhaisemmalla kehon lämpötilalla, jolloin ydinlämpötila on myös alhaisempi suorituksen aikana. Keinoja ovat muun muassa kylmävesiupotus, kylmässä huoneessa istuminen, kylmäsuihku, kylmäpakkaukset, viileä liivi sekä kylmän nesteen nauttiminen. (Kenney ym. 2020, 310) Esijäähdytyksen myötä koettu kuumastressi lievittyy ja suorituskyyky paranee (Ross ym. 2013). Erityisesti kestävyysuorituskyky paranee esijäähdytyksen myötä kuumissa ympäristöissä, kun taas sprinttisuorituksiin se ei paljoakaan vaikuta (Wegmann ym. 2012).

2.2.2 Kylmyyden vaikutus kriittiseen tehoon

Kriittisen tehon rajamailla urheilu horjuttaa huomattavasti elimistön homeostaasia, ja tämän lisäksi ympäristötekijät luovat ympäristöstressiä. Kylmyys nostaa elimistön energiankulutusta (Richard & Koehle 2022) ja alentaa taloudellisuutta (Castellani & Tipton 2016; Richard & Koehle 2022). Lihaksen paikallisen jäähdytyksen vaikutusta kriittiseen tehoon ei ole tutkittu.

Hapen dissosiaatioon – eli hapen sitoutumiseen ja irtoamiseen punasolujen hemoglobiinista – vaikuttaa muun muassa pH ja veren lämpötila. Korkeammassa lämpötiloissa hemoglobiini luovuttaa happensa herkemmin aktiivisille lihaksille eli dissosiaatiokäyrä siirtyy oikealle. (Kenney ym. 2020, 189) Dissosiaatiokäyrän siirryessä vasemmalle hemoglobiini vapauttaa happea heikommin (Hamilton ym. 2004). Paikallisen jäähdytyksen myötä hemoglobiini/myoglobiini

(Hb/Mb) konsentraatio laskee, joka johtuu todennäköisesti alentuneesta veren volyymistä kohdealueella, jonka jäähtymisen aiheuttama verisuonten vasokonstriktio on saanut aikaan (Yanagisawa ym. 2007). Muutokset hapen kuljetuksessa aktiivisiin lihaksiin vaikuttavat kriittiseen tehoon. Hapen käyttöaste liikunnan aikana – erityisesti siirtyminen levosta työn tekoon – on tärkeässä roolissa kriittistä tehoa määritettäessä. (Goulding & Marwood 2023)

2.3 Kuumuuden vaikutukset

Kuuma-altistuksen (*heat exposure*) ja -stressin (*heat stress*) määritelmät ovat samankaltaiset, kuten kylmäaltistus ja -stressi, mutta erona on lämpötila. Elimistön lämpötilan noustessa sitä voidaan laskea ihon verisuonia laajentamalla eli vasodilataatiolla, hikoilulla sekä lämmöntuottoa alentamalla (Hall & Hall 2021, 906).

Aktiiviset lihakset tuottavat lämpöä, jolloin lihaksen lämpötila nousee ennen näkyviä muutoksia ydinlämpötilassa (Racinais ym. 2017). Ydinlämpötila voi nousta lihasten aktiivisuuden myötä jopa kuumelukemiin (> 38 °C) ja tämä normaalia korkeampi lämpötila heikentää suorituskkyä. Maltillinen ydinlämpötilan nousu on kuitenkin suotuisa muutos, joka optimoi fysiologisia ja metabolisia toimintoja (McArdle ym. 2015, 627), sillä tämä mahdollistaa hapen herkemmän irtoamisen hemoglobiinista sitä tarvitseville kudoksille (Kenney ym. 2020, 189). Seuraavaksi käsitellään hieman tarkemmin kuumuuden vaikutuksia itse suorituskkyyn.

2.3.1 Kuumuuden vaikutus suorituskkyyn

Kuumuus vaikuttaa verenkiertojärjestelmän kykyyn tukea urheilusuoritusta (Richard & Koehle 2022), sillä kuumassa ympäristössä elimistö viilentää itseään pitkälti haihduttamalla lämpöä. Hikoilu johtaa nesteen menetykseen, joka osaltaan johtaa plasmavolyymien pienenemiseen. Tämä vaikeuttaa verenkiertoa erityisesti elimistön perifeerisiin osiin, jolloin lämmön kuljetus ihon pintaosiin voi hidastua ja ydinlämpötila pääsee nousemaan. Riittävän verenkierron turvaamiseksi iholle ja lihaksiin fyysisen aktiivisuuden aikana, elimistö joutuukin tekemään tilapäisiä kompromisseja siinä, minne verta kuljetetaan. Laktaatti kumuloituu herkemmin verenkierron vähentyessä maksaan, ja näin ollen lihakset eivät pääse yhtä tehokkaasti hyödyntämään kiertävää laktaattia, sillä samanaikainen pyrkimys lämmön menetykseen ohjaa suuren osan sydämen

iskutilavuudesta periferiaan. Verenkierron säätely ja verenvirtaus lihaksille fyysisen aktiivisuuden aikana on kuitenkin elimistön etusijalla lämmönsäätelyyn verrattuna. (McArdle ym. 2015, 626–627) Ihon arteriolit laajenevat keskushermoston signaalien myötä kuljettaakseen metabolista lämpöä kehon pinnalle, ja sympaattinen hermosto vaikuttaa sydämeen nostamalla sykettä sekä vasemman kammion pumppausta. Samaan aikaan iskutilavuus ei pysty määräänsä enempää kasvamaan veren kertyessä periferiaan. Näin ollen laskimopaluu on pienempää, jolloin iskutilavuuden ylläpitämiseksi tätä kompensoidaan nostamalla sykettä (*cardiovascular drift*). (Kenney ym. 2020, 309)

Kuumastressi heikentää myös maksimaalista hapenottokykyä, mikä kiihdyttää iskutilavuuden ja keskimääräisen valtimopaineen laskua. Tämä johtaa aktiivisten lihasten heikentyneeseen verenkiertoon, hapen kuljetukseen ja absorptioon, eli aerobinen kapasiteetti heikkenee ennen väsymyksen iskemistä. (González-Alonso & Calbet 2003) Lisäksi tahdonalainen lihasaktivaatio voi heikentyä korkean kehon lämpötilan myötä (Racinais & Oksa 2010).

2.3.2 Kuumuuden vaikutus kriittiseen tehoon

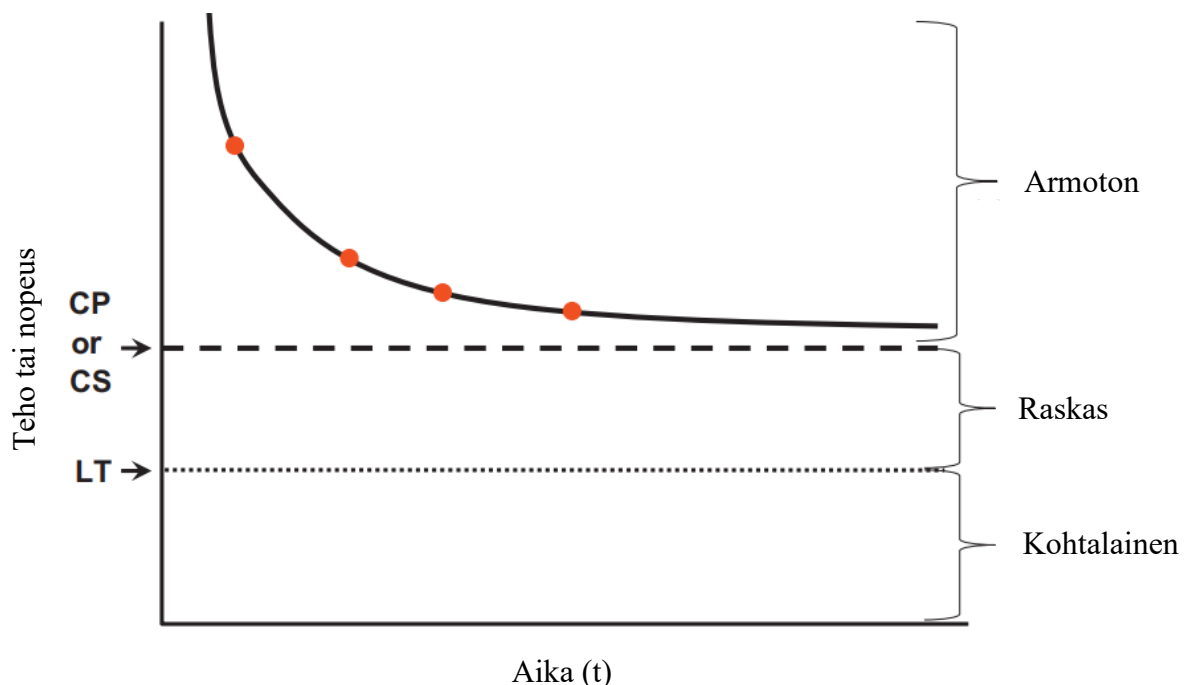
Kuumuuden vaikutuksia kriittiseen tehoon on lähinnä tutkittu kokonaisvaltaisesti kuumavesiupotuksella tai kammiossa simuloidussa lämpötilassa. CP:n rajamailla tehty suoritus voi muuttua, mikäli riittävä kuuma-altistus nostaa ydinlämpötilaa tai jos esilämmitystä on suoritusta edeltävästi (Richard & Koehle 2022). Paikallisen lämmityksen vaikutuksia kriittiseen tehoon ei ole kuitenkaan tutkittu.

Esimerkiksi Kaiser ym. (2021) tutki hypertermian vaikutusta tehoaikasuhteen muuttujiin (CP ja W') kuumassa kammiossa (38 °C) suoritettulla kolmen minuutin maksimitestillä (3MT). Heidän havaintonsa oli, että kuumavesiupotuksella (40,5 °C) aikaansaatua hypertermia ($T_c \geq 38,5$ °C) ei vaikuta huipputehoon (PP; *peak power*), kokonaistyöhön eikä tehoaikasuhteen muuttujiin. Kuo ym. (2021) havaitsivat taas, että CP heikkenee kammiossa simuloidun kuuma-altistuksen ($35,4 \pm 0,8$ °C) myötä verrattuna normaalilämpötilassa suoritettuun 3MT:iin.

3 KRIITTINEN TEHO JA W'

Monod & Scherrer (1965) määrittivät lihaksen tai lihasryhmän kriittisen tehon maksimityömääräksi, joka voidaan ylläpitää pitkän ajan ilman väsymystä. Kriittinen teho on siis korkein aerobinen aineenvaihdunnallinen taso, jossa tasapainotila voidaan ylläpitää (Poole ym. 2016; Richard & Koehle 2022) eikä väsymys rajoita suoritusta. Kriittistä tehoa korkeammilla tehoilla tehtyjä suorituksia voidaan ylläpitää vain lyhyen ajan, mutta tehoa laskettaessa suoritustakin voidaan ylläpitää kauemmin. Teoreettisesti kriittistä tehoa pitäisi pystyä jatkamaan loputtomasti käyrän ollessa kurvilineaarinen (kuva 2), mutta todellisuudessa suoritusta kyseisellä teholla voidaan ylläpitää noin 30 minuuttia. (Kenney ym. 2020, 143)

W' kuvaa työmäärää, joka voidaan tehdä kriittisen tehon yläpuolella. W' on aikaisemmin pidetty anaerobisen työn kapasiteettina, mutta tästä nimityksestä tulisi luopua asian kompleksisuuden vuoksi, koska vaikuttavia tekijöitä on useampi kuin ennen on ajateltu (Burnley & Jones 2007; Goulding & Marwood 2023; Poole ym. 2016). Esimerkiksi hypoksia ja hyperoksia muutokset vaikuttavat muuttujaan W' (Goulding & Marwood 2023). Yksiköllisesti W' ilmaistaan jouleina (J), kun taas CP watteina (W) (Richard & Koehle 2022).



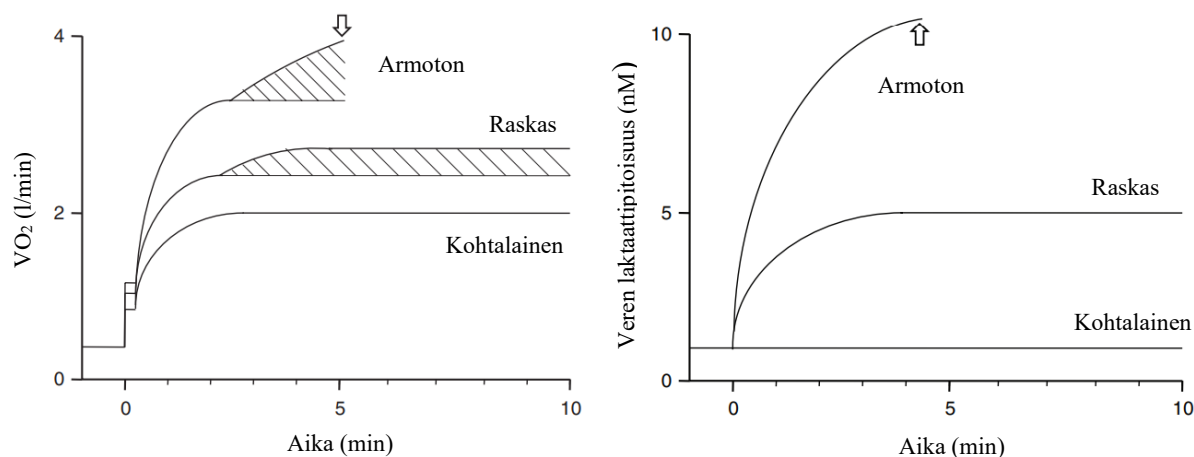
KUVA 2. Kurvilineaarinen teho/nopeus-aikakäyrä sekä kuormitusalueet. Punaiset pallot kuvastavat eri mittaisia vakiotehoisia suorituksia, joiden avulla käyrä muodostuu. CP; Critical Power, CS; Critical Speed, LT; Lactate Threshold. Mukailtu Craig ym. (2019).

Tehontuoton ja uupumukseen johtavan ajan välillä on hyperbolinen suhde, joka näkyy kaavasta $t = \frac{W'}{(P-CP)}$, jossa t on aika uupumukseen, W' on kriittisen tehon (CP) yläpuolella tehty työ ja P on tehtävän tehontuotto (Burnley & Jones 2007).

3.1 Kuormitusalueet

Kuormitusalueet (*exercise intensity domains*) voidaan jakaa neljään osaan. Kriittinen teho erottaa raskaan (*heavy*) ja armottoman (*severe*) intensiteetin kuormitusalueet, joissa havaitaan toisistaan poikkeavia fysiologisia vasteita (Burnley & Jones 2007; Craig ym. 2019; Goulding & Marwood 2023). Kuten kuvasta 2 nähdään, alimpana kuvassa on kohtalainen kuormitusalue, joka sisältää kaikki tehontuotot laktaattikynnyksen (LT) alapuolella, jossa veren laktaattipitoisuus pysyy muuttumattomana tai kasvaa hieman sekä hapenkulutuksen (VO_2) vaste saavuttaa tasapainotilan.

Laktaattikynnys on kriittisen tehon alapuolella ja näiden välinen kuormitusalue on nimeltään raskas (*heavy*). Tällä kuormitusalueella eli kriittisen tehon rajamailla ja sen alapuolella VO_2 kasvaa eli VO_2 hidas komponentti tulee näkyviin sekä laktaattipitoisuus nousee, mutta kummatkin tasaantuvat ajan myötä (Burnley & Jones 2007; Craig ym. 2019), kuten kuvasta 3 voidaan nähdä. Alueella vallitsee siis stabiilitteetti lihaksensisäisen aineenvaihdunnan, hapenoton ja laktaatin osalta. Raskaan kuormitusalueen yläpuolella eli armottoman intensiteetin kuormitusalueella lihaksensisäinen PCr (fosfokreatiini) väijäämättä laskee ja vetyionien määrä, laktaattipitoisuus sekä lihasten ja keuhkojen hapenotto kasvavat. (Craig ym. 2019) Lisäksi VO_2 :n hidas komponentti ei tällöin stabilisoidu ja mikäli suoritusta jatketaan tarpeeksi pitkään, maksimaalinen hapenottokyky (VO_{2max}) savutetaan ja yksilö uupuu nopeasti sen jälkeen. VO_2 :n hitaan komponentin kasvun nopeus on riippuvainen työssä tuotetun tehon läheisyydestä yksilön kriittiseen tehoon ja mitä suurempi tämä ero on, sitä suurempi on hidas komponentti ja sitä lyhyempi on työn siedettävä kesto. (Burnley & Jones 2007)



KUVA 3. Eri kuormitustasojen hapenkulutuksen ja laktaatin vaste vakioitehoisessa suorituksessa. Vinoviivitus kuvastaa VO_2 :n hidasta komponenttia. Nuoli kuvastaa väsymyksen rajoittamaa suoritusta. Mukailtu Poole & Jones (2012).

3.2 Hapenoton kinetiikka

Hapenoton kinetiikka eli VO_2 kinetiikka kuvastaa hapenoton kasvua kuormituksen vaatimalle tasolle. VO_2 kinetiikka on ratkaiseva tekijä korkean intensiteetin urheilusuorituksessa (Burnley & Jones 2007; Murgatroyd ym. 2011), sillä hidas VO_2 kinetiikka on yhteydessä lihaksensisäisten korkeaenergistien fosfaattien nopeampaan ehtymiseen sekä laktaatti ja vetyionien kumuloitumiseen (Poole & Jones 2012). Nopeampi VO_2 kinetiikka suorituksen alussa johtaa pienempään happivajeeseen ja aineenvaihduntatuotteiden kumuloitumiseen tietyllä tehoalueella (Goulding ym. 2021). Toisin sanoen nopeampi VO_2 kinetiikka minimoi homeostaasiin kohdistuvan haasteen, joka osittain mahdollistaa suuremman rasituksen sietokyvyn eli toleranssin (Poole & Jones 2012). Tämä mahdollistaa myös suorituksen alussa metabolisen tasapainotilan saavuttamisen korkeammilla työtehoilla verrattuna hitaampaan VO_2 kinetiikkaan (Murgatroyd ym. 2011) ja näin ollen korkeamman kriittisen tehon (Goulding ym. 2021). Tämän vuoksi hapenoton kinetiikkaa käsitellään seuraavaksi hieman tarkemmin.

Siirryttäessä matalasta kohtalaisen intensiteetin suoritukseen VO_2 vaste voidaan jakaa kolmen vaiheeseen; kardiodynaaminen komponentti (vaihe 1), primääri komponentti (vaihe 2) ja tasapainotila (vaihe 3). Nämä vaiheet vastaavat tällaisenaan siis vain laktaattikynnyksen alapuolisia

tehoalueita. Laktaattikynnyksen ylittyessä kahden ensimmäisen vaiheen jälkeen kolmatta vaihetta eli komponenttia kutsutaan VO_2 :n hitaaksi komponentiksi, joka kasvaa jatkuvasti pyrkien kohti ennakoitua tasapainotilaa. (Burnley & Jones 2007)

3.2.1 Kardiodynaaminen komponentti

Kardiodynaaminen komponentti kuvaa hapenoton kasvua keuhkoissa, mutta ei lihasten hapenkulutusta (Barstow ym. 1990; Grassi ym. 1996), sillä lihaksen hapenkäytön ja saman veren saapumisessa kaasujenvaihtoon keuhkoverisuonistoon kestää noin 10–20 sekuntia (Burnley & Jones 2007; Grassi ym. 1996; Jones & Poole 2005). Tämä lisäkomponentti keuhkojen VO_2 vasteessa onkin olennainen ero lihasten ja keuhkojen VO_2 kinetiikassa (Jones & Poole 2005).

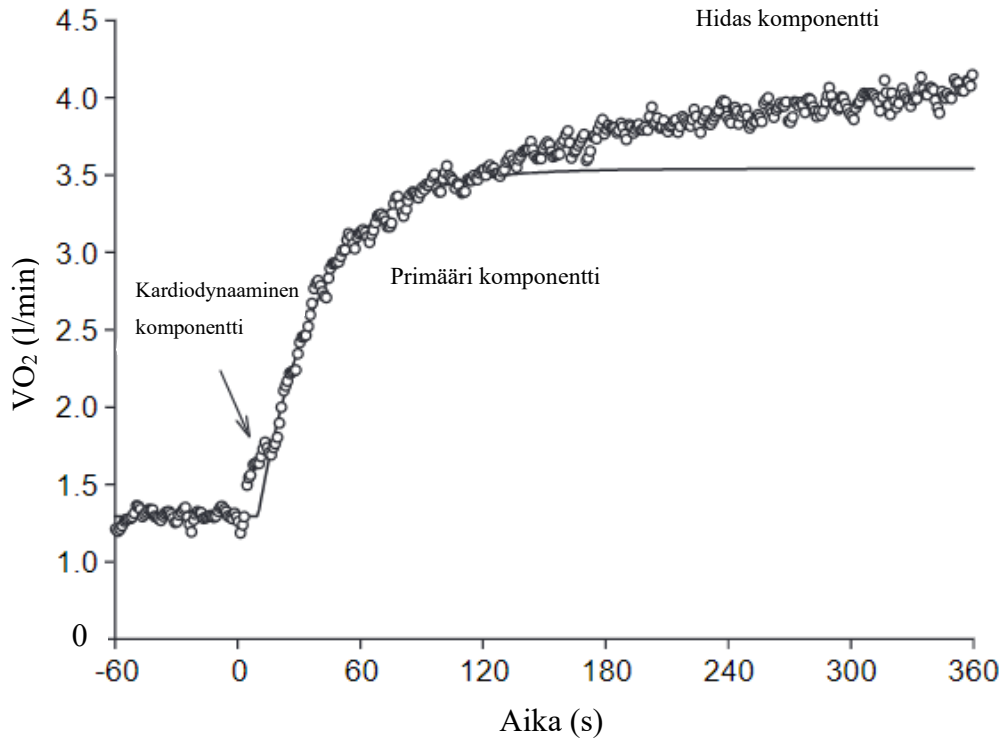
Kuormituksen alkaessa VO_2 kasvaa äkillisesti lihaspumpun aiheuttaman laskimopaluun sekä keuhkoverenkierron kasvun myötä, jonka sydämen oikean kammion tehostunut pumppaus on saanut aikaan. Seuraavaan vaiheeseen siirtyminen tapahtuu, kun keuhkoihin saapuvassa veressä huomataan äkillisiä muutoksia happi- ja hiilidioksidin osapaineissa ja samalla VO_2 jatkaa kasvua eksponentiaalisesti. (Burnley & Jones 2007)

3.2.2 Primääri komponentti

Kuten kuvasta 4 voidaan nähdä, kardiodynaamista komponenttia seuraa primääri komponentti. Vaiheella 2 on kirjallisuudessa muitakin nimiä, kuten nopea ja fundamentaalinen komponentti (Burnley & Jones 2007), mutta tässä tutkimuksessa käytetään termiä primääri komponentti. Tässä vaiheessa keuhkojen hapenotto kyky heijastaa lihasten hapenotto kykyä (Burnley & Jones 2007) noin $\pm 10\%$:n sisällä (Barstow ym. 1990) ja vaihe kestää noin 1–2 minuuttia (Grassi ym. 1996).

Eliitti kestävyysurheilijoilla on erityisen nopea vaiheen 2 kinetiikka, mikä mahdollistaa pienemmän happivajeen ja homeostaasin horjumisen (Koppo ym. 2004). Lisäksi mekaaninen hyötysuhde määrittää VO_2 :n ja tehontuoton suhteen muodostuvan käyrän jyrkkyyden. Korkeammalla mekaanisella hyötysuhteella käyrä on loivempi, kun taas heikommalla hyötysuhteella

käyrä on jyrkempi. (Burnley & Jones 2007) Vaiheen 2 jälkeen alkaa kolmas vaihe, joka on tässä tutkimuksessa hitaan komponentin esiintulo.



KUVA 4. VO₂ vaste raskaan intensiteetin suorituksessa terveellä yksilöllä. Hidas komponentti nostaa hapenkulutusta selkeästi oletettua tasoa (musta viiva) suuremmaksi. Mukailtu Burnley & Jones (2007).

3.2.3 Hidas komponentti

Hidas komponentti on selvä vain laktaattikynnyksen yläpuolisilla kuormituksilla ja ilmenee viiveellä yleensä noin 90–180 s kuormituksen alun jälkeen ja se kuvastaa VO₂:n jatkuvaa kasvua kohti ennakoitua tasapainotilaa (kuva 4), mutta vaihetta 2 hitaammin (Burnley & Jones 2007). Tämä komponentti on ollut pitkään tuntematon tiedeyhteisön piirissä tahattomasti tai harkitusti (Burnley & Jones 2007), vaikka se on ollut ilmeinen jo 40 vuotta sitten (Whipp & Wasserman 1972).

VO₂ hidas komponentti on merkittävä tekijä, sillä raskaassa kuormituksessa se edustaa ylimäärisiä happikustannuksia, jotka kuluttavat energiavaroja nopeammin kuin matalatehoisessa

kuormituksessa. Lisäksi hitaan komponentin myötä lämpöä kertyy elimistöön nopeammin, mikä saattaa johtaa aikaisempaan hypertermiaan tai dehydraatioon, mikäli ympäristön olosuhteet niin suovat. Armottoman kuormitusalueen suorituksessa hidas komponentti jatkaa kasvuaan, kunnes VO_{2max} on saavutettu. Näin ollen hidas komponentti saattaa olla keskiössä väsymisprosessissa raskaan ja armottoman kuormitusalueen suorituksissa. Laktaattikynnyksellä on tämän vuoksi tärkeä merkitys kestävyysurheilussa, sillä se kuvaa korkeinta tehontuottoa, jossa hidas komponentti ei muodostu. (Burnley & Jones 2007) Seuraavaksi käsitellään itse mittausmenetelmiä ja tarkastellaan kuinka CP ja W' voidaan määrittää testien perusteella.

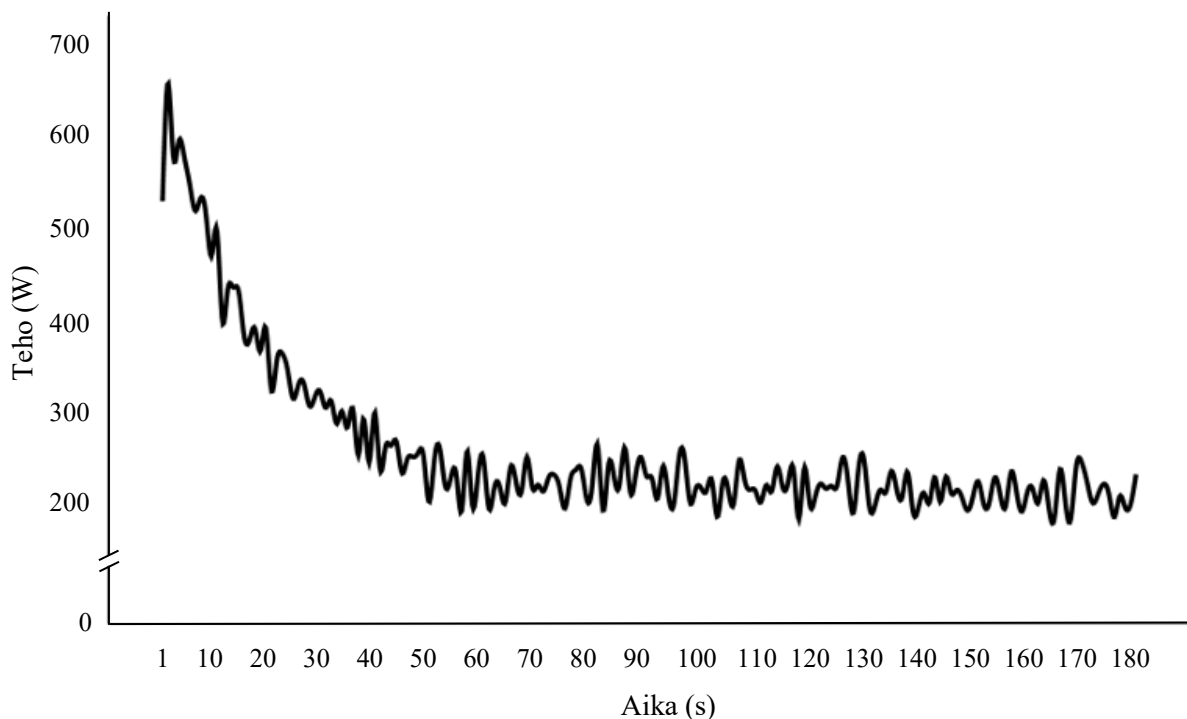
3.3 Kriittisen tehon ja W':n mittausmenetelmät

CP:n ja W':n määrittäminen ei ole standardisoitu, mutta muutama tapa niiden mittaamiseen on olemassa. Tavanomaisesti tehoaikasuhteen (*P-t relationship*) määrittämiseen on käytetty sarja vakiokuormalla (CWR; *constant work rate*) tehtäviä suorituksia uupumukseen asti, joiden pituus olisi suositeltavaa olla 2–15 minuuttia ja määrältään niitä tulisi olla vähintään kolme. Myös erilaisia matemaattisia malleja on käytetty CP:n ja W':n määrittämiseen hyödyntämällä CWR-sarjan suorituksista saatua tehon tuoton määrää sekä aikaa uupumukseen (T_{lim} ; *time to task failure*). (Muniz-Pumares ym. 2019; Vanhatalo ym. 2007) CP ja W' voidaan määrittää myös aikaajoilla (TT; *time trials*), joissa on määritetty joko tietty matka tai aika. Nämä voidaan suorittaa niin kentällä kuin laboratorio-olosuhteissa, mutta niiden luotettavuus W':n osalta vaatii vielä lisää tutkimuksia. (Muniz-Pumares ym. 2019)

Näiden sijaan on ehdotettu käytettäväksi kolmen minuutin maksimitestiä (3MT; *3-minute all-out test*), sillä tämä tarjoaa yksinkertaisemman menetelmän muuttujien määrittämiseen. Testin viimeisen 30 s aikana tuotettu keskiarvoinen teho kuvastaa kriittistä tehoa ja työ, joka on suoritettu tämän yläpuolella, kuvastaa W'. (Burnley ym. 2006; Clark ym. 2016; Constantini ym. 2014; Johnson ym. 2011; Muniz-Pumares ym. 2019; Vanhatalo ym. 2007) 3MT testiä voidaan myös käyttää VO_{2peak} :n todentamiseen ja maksimaalisen tasapainotilan arvioimiseen (Burnley ym. 2006). Testin validoimiseen on käytetty sarja vakiokuormalla tehtäviä suorituksia (Vanhatalo ym. 2007). Johnsonin ym. (2011) mukaan 3MT:ssä vastus voitaisiin määrittää kehonpainon avulla, kuten anaerobisessa Wingate-testissä. Bergstromin ym. (2012) mukaan CP ja W' voidaan määrittää 4,5 %:n kehonpainon vastuksella. Merkitsevää eroa ei ole löydetty 3, 4 ja 5 %:n

välillä (Clark ym. 2013). 3MT:stä saadaan tehoaikakäyrä (kuva 5), josta nähdään tehon tippuminen melko jyrkästi ensimmäisen minuutin aikana, jonka jälkeen teho tasaantuu.

W' voidaan laskea 3MT:n jälkeen käyttämällä kaavaa $W' = 150 \times (P_{150s} - CP)$, jossa P_{150s} on testin ensimmäisen 150 s keskimääräinen tehontuotto (Clark ym. 2016). Kuitenkin 3MT vaatii usein myös alkutestin ja tutustumiskerran testiin, jolloin protokolla pitenee huolimatta itse testin lyhydestä (Muniz-Pumares ym. 2019).



KUVA 5. Tehoaikakäyrä kolmen minuutin maksimitestistä.

4 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESI

Tämä kandidaatintutkielma toimii pilottina laajempaan tutkimukseen. Tässä pilotissa pyritään selvittämään, miten lämpötila vaikuttaa kriittiseen tehoon kolmen minuutin maksimitestissä. Tarkemmin ottaen arvioidaan, miten jäädytetyillä ja lämmitetyillä alaraajoilla suoritettujen testien tulokset eroavat termoneutraalina suoritettusta testistä. Erityisesti tarkastelussa on, miten paikalliset lämpötilanmuutokset vaikuttavat mitattaviin muuttujiin.

Tutkimuskysymys. Vaikuttaako paikallinen lämpötilanmuutos muuttujiin CP ja W'?

Hypoteesi ja perustelut. Paikallisen jäädytyksen ja lämmityksen vaikutuksia kriittiseen tehoon ei ole juurikaan tutkittu, mutta kuten aiemmin jäähtymisen vaikutuksia suorituskykyyn esiteltiin, aerobiset sekä tehosuoritukset heikentyvät kylmäaltistuksessa, mutta heikentymisen määrä riippuu lihaksen lämpötilan jäähtymisasteesta (Castellani & Tipton 2016). Kudosten hapetus heikkenee (Gagnon ym. 2020) ja hapen kuljetuksen heikentyessä aktiivisiin lihaksiin tämä vaikuttaa kriittiseen tehoon (Goulding & Marwood 2023). Kokonaisvaltaisen lämmityksen vaikutuksista on saatu ristiriitaista tuloksia (Kaiser ym. 2021; Kuo ym. 2021). Tämä tutkimus tehdään kuitenkin normaalissa huoneenlämmössä ja käyttäen paikallista lämmitystä, joten on mahdollista, ettei lämmitys tule suuresti vaikuttamaan kriittiseen tehoon 3MT:ssä. Kirjallisuuden pohjalta voidaan siis todeta, että kylmä ja kuuma vaikuttavat ihmisen fysiologiaan ja näin ollen suorituskykyyn. Hypoteesina on, että kriittinen teho ja mahdollisesti myös W' ovat alhaisempia esijäädytetyillä ja -lämmitetyillä lihaksella 3MT:n suorituksessa verrattuna termoneutraalina tehtyyn 3MT:n suoritukseen.

H_0 = tulosten välillä ei ole eroa

H_1 = tulosten välillä on eroa

5 TUTKIMUSMENETELMÄT

Eettisen lautakunnan suostumus oli haettu isompaan tutkimukseen, johon tämä pilotti perustui. Tämä tutkimus oli poikkileikkaustutkimus, jossa tutkittavalle arvottiin oma lämpöprotokolla kuudesta eri vaihtoehdosta, sillä 3MT tehtiin kolmella eri esivalmistelulla. Näin ollen kahdelle tutkittavalle osui sama testijärjestys. Kyseessä oli siis satunnaistettu ristikkäisasetelma. Artikkeleita on haettu eri tietokannoista muun muassa SportDiscus, ScienceDirect, PubMed ja ResearchGate ja artikkeleita on myös poimittu review artikkeleiden lähdeluettelosta.

5.1 Tutkimusasetelma ja tutkittavat

Tutkimuskerran alkuun tutkittavilta pyydettiin suostumus ja varmistettiin, että sen hetkinen terveydentila ei estä tutkimukseen osallistumista. Tämän jälkeen mitattiin pituus, vyötärön ja lantion ympäryys sekä tehtiin kehonkoostumusmittaus InBody 770 -laitteella (InBody, Kalifornia, Yhdysvallat), josta saatiin myös kehonpaino tutkimusta varten. Polkupyöreäergometri Monark Ergometer 894E Peak (Monark Sports & Medicine, Ruotsi) säädettiin käsitangon ja satulan korkeuden osalta tutkittavalle sopivaksi. Painopakkaan asetettiin 4,5 % kehonpainoa vastaavat punnukset. Monark Anaerobic test Softwaren avulla ergometrin data saatiin kerättyä ohjelmitoon rakennetulla protokollalla. Hengityskaasuanalysaattori Vyntus CPX (VyairTM Medical, Illinois, Yhdysvallat) kalibroitiin käyttövalmiiksi ja tutkittavalle valittiin sopivan kokoinen maski. Analysaattoriin yhdistettiin tutkittavalle puettu Polar H10 sykevyö (Polar Electro Oy, Kempele, Suomi), joka vastasi sykkeenkeräyksessä testien aikana.

Lämpötilan mittaaminen. Ihon lämpötilaa mitattiin iButton[®] DS1922L -sensoreilla (Maxim Integrated Products, Kalifornia, Yhdysvallat), jotka ensin konfiguroitiin yksitellen Thermodata Viewer 3.2.8 -sovelluksen (Thermodata Pty Ltd, Melbourne, Australia) avulla. Keräystiheydeksi asetettiin 15 sekuntia ja sensorit mittasivat lämpötilaa 0,5 °C:n tarkkuudella. Tutkittavan data saatiin käytettäväksi koko suorituspatteriston jälkeen asettamalla jokainen iButton vuorollaan lukijaan ja viemällä data Exceliin. Yhteensä kuusi sensoria (otsa, rinta, selkä, käsivarsi, kämmen-selkä, reisi) asetettiin ihon pinnalle valkoisella TransporeTM 3M -teipillä ja seitsemäs sensori mittasi huoneen lämpötilaa ja huoneilman kosteutta.

Lämpöprotokollat. 3MT suoritettiin siis kolmessa erilaisessa tilanteessa: termoneutraalina, jäähdytetyillä ja lämmitetyillä jaloilla. Paikallinen lämpötilanmuutos simuloi tilannetta, jossa ympäristötekijät vaikuttavat paikallisesti lihaksen lämpötilaan ennen muutosta ydinlämpötilassa. Jäähdytys ja lämmitys olivat kestoaltaan 45 minuuttia, jonka jälkeen tutkittava siirtyi mahdollisimman nopeasti pyörän satulaan ja testi käynnistettiin. 3MT:n väleissä oli keskimäärin noin 60 minuutin tauko. Mikäli tutkittavan termoneutraali testi osui järjestyksen keskelle tai loppuun, niin siinäkin pidettiin vähintään 45 minuutin lepotauko. Tämän aikana tutkittavan kehonlämmön odotettiin palautuvan normaalitasolle. Suorituksien välinen 60 minuutin tauko vaikuttaisi olevan riittävä, jolla vältetään hapenoton pohjustukset (*priming effects*), vaikkakin 24 tunnin palautusaika suoritusten välissä voisi olla tarpeen erityisesti W':n määrityksen kannalta (Muniz-Pumares ym. 2019).

Jäähdytysmenetelmä. Tutkittava istui korotetulla tuolilla ja jalat asetettiin vesisaaviin, jolloin vedenpinta oli hieman polvien alapuolella. Saaviin laskettiin kylmää vettä ja jäitä, jotta saavutettiin tavoitelämpötila (noin 10–12 °C). Veden lämpötilaa mitattiin vesilämpömittarilla. Reisien ympärille laitettiin mansetit, joissa kylmä vesi kiersi sähkökäyttöisen Aircast® Cryo/Cuff™ IC (Kalifornia, Yhdysvallat) kylmäkompressiolaitteen avulla. Lonkkien päälle asetettiin jääkaapissa tai jäissä levänneet kylmäpussit (Reusable Cold/Hot Pack, Mueller Sports Medicine, Wisconsin, Yhdysvallat). Noin puolessa välissä jäähdytystä altaaseen lisättiin jäitä veden viilentämiseksi. Takareidet eivät suoranaisesti olleet jäähdytyksen kohteena, sillä manseteissa kiertävä vesi kiersi vain etureisien päällä.

Lämmitysmenetelmä. Tutkittava istui korotetulla tuolilla ja jalat asetettiin vesisaaviin, jolloin vedenpinta oli hieman polvien alapuolella. Lämmintä vettä laskettiin saaviin (noin 42 °C) ja reisien ympärille laitettiin mansetit, joissa lämmin vesi kiersi. Veden lämpötilaa mitattiin jälleen vesilämpömittarilla. Mikrossa lämmitetyt geelipussit asetettiin lonkkien päälle. Takareidet eivät olleet lämmityksen kohteena. Lisäksi tutkittavan alavartalon päälle asetettiin viltti.

Testin aikainen ohjaus. Tutkittavaa pyydettiin kiihdyttämään kadenssi 110–120 rpm (*revolutions per minute* eli kierrosta minuutissa) viisi sekuntia ennen testin alkua ilman kuormaa (Burnley ym. 2006; Kuo ym. 2021; Vanhatalo ym. 2007), jonka jälkeen painopakka tiputettiin ja kolmen minuutin testi käynnistyi. Testin aikana tutkittavaa kannustettiin jatkuvasti verbaalisesti (Jones ym. 2019), sillä säännöllinen verbaalinen kannustus johtaa merkittävästi suurempaan maksimaaliseen yritykseen verrattuna ilman kannustusta tai, jos kannustus on liian harvaa tai

epäsäännöllistä (Andreacci ym. 2002). Kuluva aikaa ei pidetty esillä eikä ajankulusta kerrottu tutkittavalle, vain kadenssi oli näkyvässä, jotta tutkittava ylläpitäisi mahdollisimman korkean kadenssin ja suoritus olisi mahdollisimman tasainen ja jatkuva (Kaiser ym. 2021; Vanhatalo ym. 2007).

Tutkittavat. Tutkittavia oli neljä naista ja neljä miestä eli yhteensä kahdeksan perustervettä liikuntatieteellisen tiedekunnan opiskelijaa (taulukko 1). Kukaan ei ollut aikaisemmin suorittanut kyseistä pyöräilytestiä. Harjoitustausta oli kaikilla hieman erilainen, mutta pääasiassa kaikki olivat aktiivisia liikkujia tai urheilijoita.

TAULUKKO 1. Tutkittavien taustatietoja. Tulokset muodossa keskiarvo \pm keskihajonta.

	Ikä (v)	Pituus (m)	Paino (kg)	Rasva (%)
n = 8	24,1 \pm 2,6	1,74 \pm 0,08	73,3 \pm 11,1	20,6 \pm 3,7

5.2 Aineiston analyysi ja tilastolliset menetelmät

InBody 770 on bioimpedanssimittauslaite, joka perustuu kudosten erilaiseen sähkönjohtavuuteen. Valmistaja suosittelee kolmen tunnin väliä ruokailun ja mittauksen välissä sekä 45 minuutin taukoa veden juonnista. InBody 770 on todettu luotettavaksi menetelmäksi mitata kehonkoostumusta DXA:n (*dual-energy X-ray absorptiometry*) korvikkeena, mutta se sisältää systemaattisen ja suhteellisen virhelähteen arvioitaessa naisten rasvamassaa sekä miesten rasvattoman massan määrää. (McLester ym. 2020)

3MT on yksinkertainen menetelmä kriittisen tehon määrittämiseen (Burnley ym. 2006; Clark ym. 2016; Johnson ym. 2011; Muniz-Pumares ym. 2019; Vanhatalo ym. 2007). Virallisia kriteerejä 3MT:n validoinnin vahvistamiseen ei oikein ole (Muniz-Pumares ym. 2019), mutta testi on validoitavissa esimerkiksi sarjalla vakioitehoisia suorituksia (Vanhatalo ym. 2007).

Aineiston analyysiin käytettiin Microsoft Excel 2016 -taulukkolaskentaohjelmistoa (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, Yhdysvallat) sekä IBM® SPSS Statistics 28.0 -ohjelmistoa (IBM Corporation, Armonk, New York, Yhdysvallat). Testin viimeisen 30 sekunnin aikana tuotettu keskiarvoinen teho kuvastaa kriittistä tehoa, joka jokaisen tutkittavan testistä laskettiin (Burnley ym. 2006; Clark ym. 2016; Constantini ym. 2014; Johnson ym. 2011; Muniz-Pumares

ym. 2019; Vanhatalo ym. 2007). W' laskettiin käyttämällä kaavaa $W' = 150 \times (P_{150s} - CP)$, jossa P_{150s} on testin ensimmäisen 150 sekunnin keskimääräinen tehontuotto (Clark ym. 2016). Nämä arvot vietiin SPSS-ohjelmistoon. Kaikkien tarkasteltavien muuttujien normaalijakautuneisuus tarkistettiin *Explore*-toiminnolla Shapiro-Wilkin testillä ($p > 0,05$), jonka jälkeen verrattiin eri lämpöprotokollien tulosten merkitsevyyttä toistomittausten varianssianalyysillä (ANOVA).

Mauchlyn sfäärisyystestistä tarkistettiin, onko $p > 0,05$, jonka jälkeen tulosta voitiin tarkastella *Sphericity Assumed*-riviltä. Mikäli tämän rivin tulos oli $p < 0,05$ pystyttiin päättelemään, että jossain on eroja. Ryhmien välisiä tilastollisesti merkitseviä eroja tarkasteltiin tarkemmin vielä *Bonferroni*-toiminnolla parittaisen vertailun taulukosta. Tilastollisia analyysyjä pidettiin siis tilastollisesti merkitsevinä, mikäli $p < 0,05$.

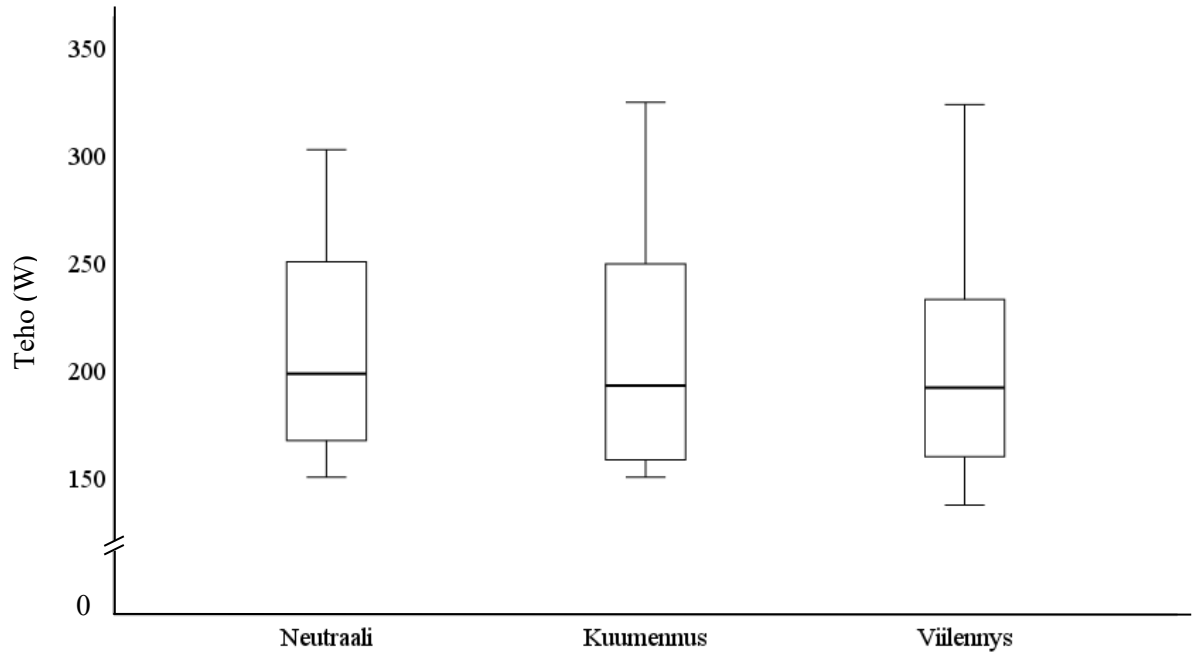
6 TULOKSET

Ihon lämpötilanmuutoksia seurattiin kuudella iButton-sensorilla ja seitsemäs mittasi huonelämpötilaa ($21,5 \pm 0,4$ °C) ja huoneilman kosteutta ($25,4 \pm 5,6$ %). Taulukkoon 2 on kerätty jokaiselta tutkittavalta erikseen reiden iButton-sensorista kerätyt lämpötilanmuutokset, sillä kyseisessä sensorissa havaittiin suurimmat lämpötilanmuutokset.

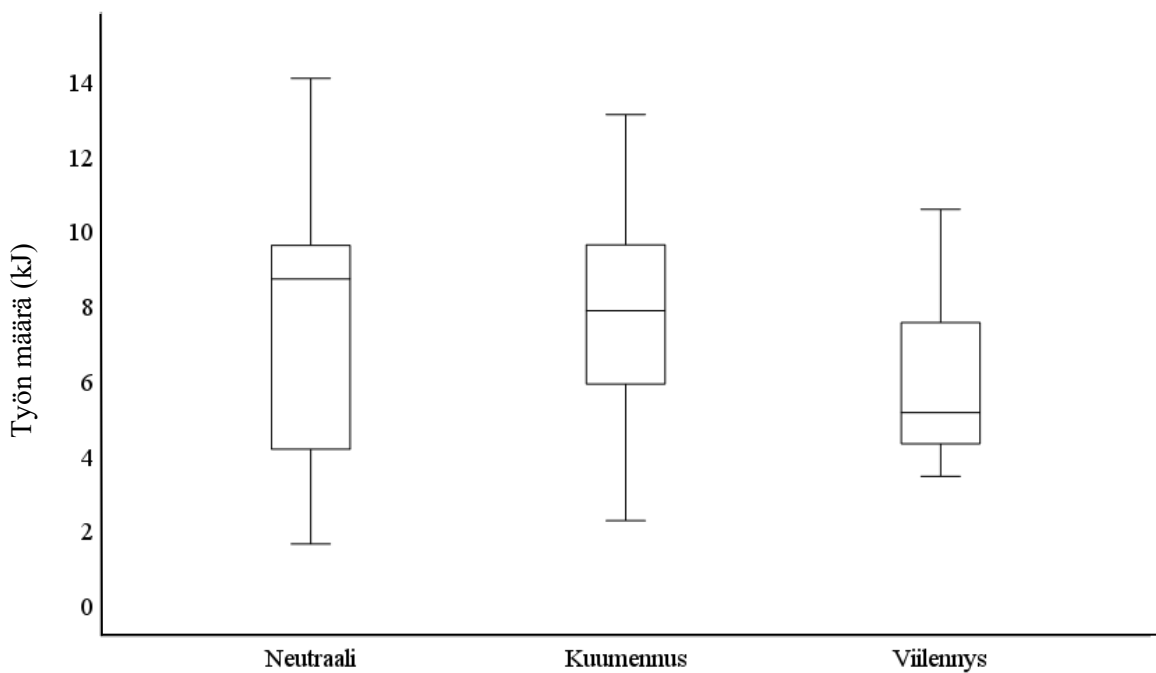
TAULUKKO 2. Reiden sensorilla mitatut aikaansaadut jäähtyksen ja lämmityksen lämpötilanmuutokset, siirtymäaika testin alkuun sekä lämpötilanmuutos (Δ °C) ennen testin alkua.

	Jäähtytys (°C)	Siirtymä (min)	Δ °C	Lämmitys (°C)	Siirtymä (min)	Δ °C
	3,5	11	-2,5	7	9	-2,5
	-8,5	7	2,5	4	5	-3,5
	-16	5	3,5	4	6	-2
	-15	6	5	7	6	-5
	-0,5	11	0,5	4,5	5	-1,5
	-8,5	21	7	8,5	10	-9
	-9,5	6	4,5	9	6	-5,5
	-15,5	8,5	8,5	7,5	7	-3,5
Keskiarvo	-8,75	9,44	3,63	6,44	6,75	-4,06
Keskihajonta	$\pm 7,13$	$\pm 5,19$	$\pm 3,51$	$\pm 2,00$	$\pm 1,83$	$\pm 2,43$

Neutraaliprotokollan ($CP = 210,3 \pm 53,9$ W; $W' = 7,6 \pm 4,2$ kJ), lämmitysprotokollan ($CP = 209,1 \pm 61,7$ W; $W' = 7,8 \pm 3,3$ kJ) ja jäähtyksenprotokollan ($CP = 203,4 \pm 61,1$ W; $W' = 6,0 \pm 2,4$ kJ) tulosten välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa, ei kriittisessä tehossa ($p = 0,422$) eikä W' :ssa ($p = 0,247$). Tuloksia on havainnollistettu kuvissa 6 ja 7.



KUVA 6. Kriittisen tehon tulokset eri lämpöprotokollissa. Janojen päät kuvaavat minimiä ja maksimia. Laatikon sisällä oleva viiva kuvaa mediaania.



KUVA 7. W':n tulokset eri lämpöprotokollissa. Janojen päät kuvaavat minimiä ja maksimia. Laatikon sisällä oleva viiva kuvaa mediaania.

Protokollien eroavaisuudet mitatuissa muuttujissa saatiin esiin tarkastelemalla sfäärisyyttä, jonka jälkeen tarkempia eroja voitiin tarkastella pareittain. Tutkittavien sykkeen osalta (HR_{peak}) löytyi merkitsevä ero protokollien välillä ($p < 0,001$). Ero havaittiin erityisesti neutraali- ja jäähdytysprotokollien välillä ($p < 0,001$) sekä lämmitys- ja jäähdytysprotokollien välillä ($p < 0,005$). Neutraali- ja lämmitysprotokollien välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa ($p = 1,000$). Korkeinta tehoa (PP) tarkasteltaessa protokollien välillä ei löytynyt merkitsevää eroa ($p = 0,059$) eikä myöskään ventilaation (VE) osalta ($p = 0,124$). Hapenoton (VO_{2peak}) osalta havaittiin protokollien välillä merkitsevä ero ($p = 0,010$), joka oli nimenomaan lämmitys- ja jäähdytysprotokollien välillä ($p = 0,005$). Neutraali- ja lämmitysprotokollien välillä ($p = 1,000$) sekä neutraali- ja jäähdytysprotokollien välillä ($p = 0,166$) ei ollut merkitsevää eroa. Kokonaisuudessaan tulokset ovat nähtävillä taulukossa 3.

TAULUKKO 3. Sykkeen (HR_{peak}), korkeimman tehon (PP; peak power), ventilaation (VE; ventilation) ja hapenoton (VO_{2peak}) tulokset eri lämpöprotokollissa. Tulokset muodossa keskiarvo \pm keskihajonta.

	Neutraali	Lämmitys	Jäähdytys
HR_{peak} (lyöntiä/min)	176,4 \pm 7,4*	177,4 \pm 7,1 [#]	168,4 \pm 9,2
PP (W)	519,4 \pm 143,8	470,0 \pm 117,5	460,0 \pm 96,8
VE (l/min)	130,5 \pm 41,3	130,1 \pm 40,0	122,4 \pm 46,1
VO_{2peak} (ml/min/kg)	42,5 \pm 7,2	43,4 \pm 9,2 [#]	40,3 \pm 9,4

* jos $p < 0,05$ neutraali vs. jäähdytys; [#] jos $p < 0,05$ lämmitys vs. jäähdytys

7 POHDINTA

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten paikalliset lämpötilanmuutokset vaikuttavat muuttujiin CP ja W' 3MT:n suorituksessa. Tämän vuoksi testi suoritettiin kolmella eri lämpötilaprotokollalla: neutraalilämpöisenä sekä alaraajat lämmitettyinä ja jäädytettyinä. Nollahypoteesi (H_0) jäi voimaan, sillä tilastollisesti merkitsevää eroa ei havaittu kriittisen tehon ($p = 0,422$) eikä W':n ($p = 0,247$) osalta eri lämpötilaprotokollien välillä. Tähän yhtenä syynä voi olla riittämättömät lämpötilanmuutokset. Ihon lämpötilaa pystyttiin laskemaan jäädytyksellä ja nostamaan lämmityksellä, mutta saavutettuja muutoksia menetettiin melko paljon siirtymäajassa testin alkuun. Erään tutkittavan kohdalla ei havaittu lämpötilan laskua jäädytyksen aikana, mutta syynä tähän oli kenties iButtonin sijaintivirhe. Lihaksen lämpötilaa ei tässä pilotissa kuitenkaan mitattu, jolloin syvempien kudosten lämpötilanmuutosta ei voida tietää. Tutkimuksia, joissa on tutkittu lämpötilan vaikutusta kriittiseen tehoon 3MT:n avulla on vain muutama. Näistä on saatu ristiriitaisia tuloksia ja niissä on käytetty kokonaisvaltaista lämmitystä (Kaiser ym. 2021; Kuo ym. 2021) eikä paikallista. Tutkimuksia on haastava verrata keskenään myös niiden lämmitysprotokollien eroavaisuuksien vuoksi.

Sen sijaan sykkeen osalta (HR_{peak}) havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero neutraali- ja jäädytysprotokollan välillä ($p < 0,001$) sekä lämmitys- ja jäädytysprotokollan välillä ($p < 0,005$). Jäädytyksen jälkeisen 3MT:ssa syketaso oli keskimäärin 8–9 lyöntiä/min alhaisempi kuin neutraali- ja lämmitysprotokollissa. Syynä tähän voi olla periferian vasokonstriktio, jonka myötä verivolyymi on osittain ohjautunut ytimeen (McArdle ym. 2015, 617; Wilson ym 2017), jolloin veri kiertää pienemmällä alueella ja täten syke voi olla alhaisempi. Kehon jäähtyminen laskee maksimaalista sykettä, iskutilavuutta ja näin ollen maksimaalista hapenottoa (Pendergast 1988), joka voi selittää osittain myös hapenoton (VO_{2peak}) osalta havaittua merkitsevää eroa lämmitys- ja jäädytysprotokollien välillä ($p = 0,005$).

Korkeinta tehoa (PP) tarkasteltaessa protokollien välillä ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa ($p = 0,059$), mutta on otettava huomioon, että p on vain niukasti yli merkitsevyyden rajan. Neutraaliprotokollassa PP on selkeästi suurin ja hajontaa on joka lämpötilaprotokollassa melko paljon, mutta vähiten jäädytyksen jälkeisessä 3MT:ssä. Neutraali- ja lämmitysprotokollien välillä ei havaittu missään muuttujassa merkitsevää eroa, joka saattaa selittyä lämpötilanmuutoksien pienuudesta. Muutoksien havaitsemiseksi olisi todennäköisesti vaadittu suurempi muutos lämpötilassa. Suuremmalla otoksella olisi voinut olla mahdollista saada eroja paremmin esiin.

Yhteensä kuusi erilaista testiprotokollaa muodostui kolmesta erilaisesta esivalmistelusta. Tutkittavia oli kokonaisuudessaan kahdeksan, joten vain kaksi eri protokollaa tehtiin kahdesti. Tutkimuksen tulokset olisivat luotettavampia, mikäli tutkittavia olisi ollut enemmän ja näin ollen kaikki protokollat olisi suoritettu vähintään kahdesti.

Aiemmin esitetystä lämpötilanmuutostaulukosta nähdään, että aikaansaaduista lämpötilanmuutoksista menetettiin melko paljon siirtymäajassa 3MT:n alkuun. Jatkossa olisi tärkeää, että tutkittava saataisiin pyörän selkään mahdollisimman nopeasti, jottei elimistö ehtisi korjaamaan lämpötilanmuutosta niin suuresti. Aikaa kului muun muassa vesialtaan siirtämiseen, tutkittavan kuivatessa jalkojansa sekä pukiessa sukat ja kengät jalkaan. Lisäksi hengityskaasuanalysointirin toimivuus tuli tarkistaa ja lepokeräys toteuttaa, joka vei muutaman minuutin kokonaisuudessaan. Samalla piti täydentää kirjanpitoa aikaleimojen osalta sekä tarkistaa pyörän valmius. Mahdollisimman paljon pyrittiin saamaan testivalmiuteen ennen jäähtymisen/lämmityksen loppua siirtymän sujuvoittamiseksi, mutta nopeampi olisi pitänyt vielä olla. Optimitilanteessa huoneen koko ja järjestys olisi sellainen, jossa mitään ei tarvitsisi siirtää paikasta toiseen.

Miesten ja naisten lämmönsäätelyssä on eroja, jotka johtuvat eroista kehonkoostumuksesta ja suorituskyvyssä (Kaciuba-Uscilko & Grucza 2001). Rasvakudos johtaa lämpöä vain kolmanneksen verran verrattuna muihin kudoksiin (Hall & Hall 2021, 902) ja henkilö, jolla on enemmän rasvaa kehossa, hyötyy siitä kylmästressissä, sillä rasva toimii eristeenä (McArdle ym. 2015, 617). Naisten osalta reisien jäähtyminen oli selkeästi alhaisempaa kuin miesten, mikä saattaa selittyä rasvakudoksen määrällä. Kylmän sietokyky (*cold tolerance*) määritellään kykyä kestää kylmästressiä vähäisillä fysiologisilla muutoksilla. Tähän vaikuttavat useat tekijät, kuten kehonkoostumus, ikä, sukupuoli, etnisyys, väsymys sekä useat stressitekijät. Sietokykyyn sisältyy tottuminen (*habituation*) kylmyyden aiheuttamiin välittömiin vasteisiin kuten kylmäshokkivasteeseen sekä fysiologiset mukautukset pitkäaikaisen kylmäaltistuksen myötä. (Castellani & Tipton 2016) Kuumen sietokykyyn vaikuttavat melko samat tekijät, kuten akklimatisaatio, harjoitusstatus, ikä, sukupuoli ja kehon rasvamäärä (McArdle ym. 2015, 632). Tämän vuoksi jokaisella tutkittavalla oli omanlainen kokemus kylmästä ja lämpimästä vedestä ja vasteensa niihin.

Vesi johtaa lämpöä 25 kertaa nopeammin kuin ilma samassa lämpötilassa (McArdle ym. 2015, 638) eli lämpöä menetetään huomattavasti nopeammin veteen kuin ilmaan (Crowley ym. 1991;

McArdle ym. 2015, 619) ja siksi se on erittäin hyvä väliaine fysiologisten muutosten tutkimisessa (McArdle ym. 2015, 638; Pendergast 1988). Vesi ei tarjoa myöskään eristettä ihon ja veden rajapinnalle toisin kuin ilma (Castellani & Tipton 2016) eikä keho pysty edes sellaista luomaan vedessä (Hall & Hall 2021, 903). Jäähdytysprotokollassa käytetty kylmä vesi saattoi hieman lämmentä, koska keho menetti lämpöä veteen, mutta kylmää vettä oli helppo viilentää lisäämällä jäitä noin puolessa välissä jäähdytystä, jolloin tavoitelämpötila pystyttiin ylläpitämään. Lämmin vesi jäähtyi keskimäärin muutaman asteen, mutta tätä ei pyritty uudelleen lämmittämään. Veden lämpötilan vakioiminen tutkittavien välillä oli siis osittain haasteellista.

Lisäksi tutkittavien alaraajat olivat luonnollisesti eri mittaisia, jolloin jokaisen istuessa samaisella tuolilla jalkojen ollessa vedessä jäähdytys-/lämmitysprotokollan aikana, vedenpinta ei ollut yhtä korkealla kaikilla. Toisilla tutkittavilla vedenpinta oli lähempänä polvitaivetta kuin taas toisilla alempana. Tämä voi osittain vaikuttaa lämpötilanmuutoksen laajuuteen raajoissa. Toisaalta polven alapuolella ei ollut lämpötilasensoria tätä mittaamassa ja todentamassa. Reisien ympärille asetetut vesimansetit olivat samankokoiset kaikille tutkittaville, joten reiden koosta riippuen ne asettuivat hieman eri tavoin ja samalla osuivat hieman eri tavalla reiden ihon lämpötilaa mittaavaan iButtoniin. Takareisiä mansetit eivät myöskään jäähdyttäneet/lämmittäneet, joka osaltaan supistaa lämpötilanmuutoksen laajuutta ennen suoritusta. Haasteita oli myös saada geelipussit nopeasti viilentymään erityisesti lämmitysprotokollan jälkeen, jonka vuoksi lonkkien jäähtyminen on voinut olla puutteellista. Jatkotutkimusta ajatellen voisi olla hyvä, että olisi kahdet geelipussit, jolloin toiset olisivat koko ajan kylmässä valmiina ja lisäksi syvempi vesisaavi pidemmille tutkittaville, jolloin vesi nousisi myös polvitaiveeseen asti. Vaihtoehtoisesti voisi harkita koko alavartalon vesiupotusta.

Kudoksen lämpötilan laskun määrä riippuu jäähdytyksen asteesta ja jäähdytyksen vaikutus paikalliseen kudoslämpötilaan ja verenkiertoon säilyykin yleensä vähintään 60 minuutin ajan riippumatta jäähdytyksen asteesta. Lisäksi hemoglobiini/myoglobiini (Hb/Mb) konsentraatio laskee paikallisen jäähdytyksen myötä, eikä palaudu lähtötasolle 60 minuutissa. Tämä johtuu todennäköisesti alentuneesta veren volyymistä kohdealueella, jonka jäähtymisen aikaansaama verisuonten supistuminen eli vasokonstriktio on saanut aikaan. (Yanagisawa ym. 2007) Raajojen jäähtyessä myös periferian veri jäähtyy ja vasokonstriktion myötä tämä veri kulkeutuu ytimeen viiveellä lämmönsäätelymekanismien vuoksi (Crowley ym. 1991). Tutkimusprotokollassa, jossa jalkojen jäähdytyksen jälkeisen 3MT:n jälkeen oli termoneutraali 3MT, ei voitu tietää

saavuttiko tutkittava termoneutraalia tilaa 60 minuutissa, koska lämpötilaa ei pystytty seuraamaan reaaliajassa. Jälkikäteen dataa katsoessa ihon lämpötila oli ainakin palautunut tutkittavan lähtölukemiin.

Tässä tutkimuksessa ei tehty lämmittelyä testiä edeltävästi, vaikka muutamassa tutkimuksessa on tehty 5 minuutin lämmittely ja 5 minuutin lepo, jonka jälkeen määrätyllä kadenssilla 3 minuutin pyöräily, jonka viimeiset 5 sekuntia on kiihdytys ennen 3MT:n alkua (Burnley ym. 2006; Vanhatalo ym. 2007). Vaihtoehtona on myös 3 minuutin pyöräily 30 W:n teholla, jonka viimeiset 5 sekuntia ilman kuormaa kiihdyttää (Kaiser ym. 2021). Lämmittely nimittäin nostaa lihaksen lämpötilaa (Racinais ym. 2017), jolloin se olisi voinut vaikuttaa tuloksiin, joko kumoamalla jäähdytyksen aikaansaatu lämpötilan laskua tai nostamalla entisestään lämpötilaa lämmityksen jälkeen. Lämmityksen jälkeen lämmittely olisi voinut auttaa lämpötilan ylläpidossa, mutta protokolla haluttiin pitää kuitenkin samana kaikissa suoritetuissa testeissä. Edellä mainituissa tutkimuksissa ei tutkittu lihaksen lämpötilaa samanaikaisesti, joten on haastava arvioida miten lämmittely olisi voinut vaikuttaa kriittiseen tehoon. Jokainen tutkittava lähti ensimmäiseen testiin lähes kylmiltään, alla vain pyöräily tai kävely tutkimuslaboratoriolle edeltävästä sijainnista. Toiseen ja kolmanteen testiin lähdetessä lähtökohdat olivat siis hieman erilaiset, sillä alla oli jo vähintään yksi 3MT. Suorituksien välinen 60 minuutin tauko vaikuttaisi kuitenkin olevan riittävä, jotta voidaan välttää hapenoton pohjustukset edeltävästä suorituksesta, mutta 24 tunnin palautusaika suoritusten välissä voisi olla tarpeen erityisesti W':n määrittämisen kannalta (Muniz-Pumares ym. 2019).

Kyseisessä pilotissa W'-arvot olivat melko alhaisia ($7,6 \pm 4,2$ kJ; $7,8 \pm 3,3$ kJ; $6,0 \pm 2,4$ kJ) verrattuna muiden tutkimuksien tuloksiin. Esimerkiksi Clark ym. (2016) tutkimuksen 3MT:ssä $W' = 11,16 \pm 4,04$ kJ, Constantini ym. (2014) tutkimuksessa $W' = 13,7 \pm 4,5$ kJ, Vanhatalo ym. (2007) tutkimuksessa $W' = 15,0 \pm 4,7$ kJ ja Vanhatalo ym. (2017) tutkimuksessa $W' = 19,4 \pm 6,3$ kJ. Kolmen minuutin maksimitestin aikana laktaattikynnys ylittyy, sillä kriittinen teho sijaitsee sen yläpuolella. Näin ollen myös hidas komponentti tulee esiin. (Burnley & Jones 2007) Hitaan komponentin ja W':n välillä saattaa olla vahva yhteys (Murgatroyd ym. 2011) ja tutkittavien VO₂ kinetiikka, sukupuolijakauma ja harjoitustaustat voivat myös vaikuttaa tuloksiin. Toki testausprotokolla vaikuttaa tuloksiin, jonka myötä eri tutkimusten välisiä tuloksia voi olla vaikea verrata toisiinsa (Muniz-Pumares ym. 2019). Eräissä tutkimuksissa on käytetty tutkittavan massa perustuvan vastuksen sijaan lineaarista moodia. Tämä vaatisi kuitenkin ylimääräisen tutustumiskerran, jossa määritettäisiin kaasujen vaihtokynnys (GET; *gas exchange*

threshold) ja VO_{2max} (Muniz-Pumares ym. 2019; Vanhatalo ym. 2016). Constantini ym. (2014) tutkimuksessa marginaalitesti suoritettiin ennen 3MT:ä niin, että testien välissä oli noin 20 minuuttia. CP ja W' säilyivät samankaltaisina, kun testit suoritettiin eri päivinä.

Testiä edeltävä ohjaus olisi pitänyt olla tarkempaa. Viiden sekunnin kiihdytyksen aikana kadenssi pyrittiin saamaan 110–120 rpm, jonka jälkeen punnuksen pudottua olisi pitänyt painottaa, että pitää polkea niin kovaa kuin jaloista lähtee ja ylläpitää tämä mahdollisimman pitkään (Constantini ym. 2014; Vanhatalo ym. 2016). Tämä saattaa myös selittää alhaisia W' :n arvoja. Tutustumiskerran avulla testiä olisi voinut harjoitella ennen itse mittauksia, jolloin tulosten luotettavuus olisi parantunut (Muniz-Pumares ym. 2019). Protokollan tutuus ja ymmärrys siitä, että koko testin ajan antaa kaikkensa, on tärkeää (Jones ym. 2019). Oppimista on voinut tapahtua suoritusten välillä, sillä tutkittavat suorittivat lyhyen ajan sisällä kolme maksimitestiä. Henkinen puoli on hyvä huomioida myös, sillä ei ole helppoa polkea kolme minuuttia täysillä. Tämä on voinut vaikuttaa myös motivaatioon. Ensimmäiseen ja viimeiseen on voinut riittää kunnolla tehoja, mutta olisiko lähtö keskimmaiseen testiin ollut henkisesti vaikeinta? Selkeää trendiä tulosten heikentymisestä testien edetessä ei ollut havaittavissa.

Tässä tutkimuksessa tunnistettiin useita virhelähteitä, jotka näin ollen heikentävät tutkimuksen luotettavuutta. Yhden tutkittavan osalta hengityskaasuanalysointitulokset olivat erikoisen matalat. Kyseisen tutkittavan kohdalla jouduttiin myös vaihtamaan turbiinia viimeiseen testiin sen toimimattomuuden vuoksi. Kannustuksen tyyppiä, määrää tai voimakkuutta ei vakioitu. Kannustus pyrittiin pitämään kuitenkin jatkuvana, mutta on vaikea arvioida, oliko kannustus samankaltaista kaikille tutkittaville. Syömisiä tai juomisia ei kontrolloitu edeltävästi, mutta laboratoriossa olon aikana ei sallittu ruokailua – vain veden juonti oli sallittua. Riippuen mittausajasta, tutkittavat tulivat paikalle kevyellä aamiaisella tai aterialla. Laboratoriossa vietettiin kuitenkin noin 3–4 h riippuen protokollasta, jolloin nälän tunne saattoi vaikuttaa jaksamiseen. In-Bodya ja testiä ajatellen olisi hyvä, että valmistautuminen olisi samankaltainen kaikilla. Yksinkertaisempaa voisi olla, jos yhdellä testikerralla olisi esimerkiksi vain yksi 3MT. Tällöin voisi olla helpompi antaa kaikkensa yhteen testisuoritukseen, niin henkisesti kuin fyysisestikin. Toki tämä vaatisi enemmän sitoutumista ja saapumista useamman kerran testattavaksi. Jatkotutkimukseen tulisi harkita tutustumiskertaa, kannustuksen ja esivalmisteluiden vakiointia sekä tarkempaa kirjallista ohjeistusta testaajalle. Näin ollen jokainen mittauskerta olisi samankaltaisempi.

Ihon lämpötilaa mittaavien sensoreiden sijainti arvioitiin silmämääräisesti, mikä on osaltaan virhelähde. Osalla tutkittavista sensori saattoi olla liian lateraalisesti vasemmassa reidessä, jolloin lämpötilan mittaus on voinut olla epäluotettavaa erityisesti jäähdytyksen ja lämmityksen aikana, mikäli sensori ei ole ollut mansetin alla. Sensorin sijaintia ei lähdetty muuttamaan tutkimuskäynnin aikana. Suoraan lihakseen asetettava lämpötila-anturi on luotettavampi keino mitata paikallista lämpötilanmuutosta, sillä sen laitto on tarkempaa ja kiinnitys vakaampi. Tämän vuoksi on hyvä, että varsinaisessa laajemmassa tutkimuksessa käytetään suoraa mittausta. Näin ollen kaikille tutkittaville saadaan samankaltainen lämpötilanmuutos, jolloin tulokset ovat vertailukelpoisempia.

Pyörän satulan korkeuden sai jokainen tutkittava valita itse ja korkeus pidettiin koko käynnin ajan samana. Polvikulmaa ei vakioitu, joten tämä voi vaikuttaa tuloksiin. Lisäksi tutkittavien harjoitustausta voi vaikuttaa siihen, miten itsestään sai suorituksen aikana tehoja irti ja kuinka korkea kriittinen teho lopulta oli. Kriittisessä tehossa oli nimittäin melko paljon hajontaa. CP paranee kestävyys- tai HIIT-harjoittelulla (*high-intensity interval training*) ja vastaavasti heikenee ikääntymisen ja kroonisten sairauksien myötä (Kenney ym. 2020, 143). CP korreloi tyyppin 1 lihassolujen kanssa, mutta korrelaatiota ei näytä olevan W' ja lihasfiiberityypin välillä (Vanhatalo ym. 2016). Yksilöt, joilla on enemmän tyyppin 1 lihasfiibereitä saavuttavat yleensä korkeamman CP:n verrattuna yksilöihin samalla harjoitustaustalla, joilla on enemmän tyyppin 2 lihasfiibereitä (Goulding & Marwood 2023).

Kaikkien tutkittavien kohdalla testit kuitenkin suoritettiin ja analysoitiin samankaltaisesti. Poikkeuksena vain lämpötilaprotokollien järjestys oli erilainen tutkittavien välillä. Päättökija oli joka mittauksessa mukana ja työpari oli sama lähes kaikissa mittauksissa. On vaikea arvioida, miten tulokset olisivat muuttuneet, jos esimerkiksi lämpötilaa olisi voinut seurata reaaliajassa ja näin ollen varmistaa samanlainen lämpötilanmuutos kaikille. Lisäksi tutkittavien määrä oli alhainen ja testit suoritettiin tiiviissä ajassa. Pienen otoskoon vuoksi tuloksia ei voida yleistää laajempaan populaatioon.

Tässä tutkimuksessa oli myös useita vahvuuksia. Esijäähdytyksen ja -lämmityksen vaikutusta kriittiseen tehoon on tutkittu hyvin vähän, jonka vuoksi tämä pilottitutkimus oli tärkeä askel suuremman tutkimuksen toteuttamiselle. Samalla pystyttiin paikantamaan mahdollisia virhelähteitä ja kehityskohteita, mitkä ovat hyvä huomioida jatkotutkimuksessa. Laitteiden kalibraatiosta huolehdittiin jokaisen tutkimuskerran aluksi. Tutkimushuoneen lämpötilaa ja kosteutta ei

vakioitu, mutta nämä olivat keskiarvoltaan hyvin samankaltaisia kaikilla tutkittavilla, joten tämä on myös vahvuus.

Esijäähdystä tullaan tulevaisuudessa todennäköisesti käyttämään enenevässä määrin kuumissa ympäristöissä tapahtuvissa kilpailutapahtumissa. Teknologian kehittyessä siitä tulee käytännöllisempää ja helpommin saavutettavaa. Samoin esilämmitystä voisi hyödyntää talviurheilussa kovalla pakkasella. Ensin on kuitenkin selvitettävä tarkemmin, miten keinotekoiset lämpötilanmuutokset vaikuttavat fysiologisesti. Lisää ymmärrystä tarvitaan, miten lihasten lämpötila vaikuttaa kriittiseen tehoon sekä miten urheilijoiden suorituskykyä voidaan optimoida eri ympäristöolosuhteissa. Olisi esimerkiksi mielenkiintoista selvittää miten hapen kulkeutuminen muuttuu jäähtymisen tai lämmityksen aikana ja miten tämä vaikuttaa kriittiseen tehoon. Ydinlämpötilaa mittaamalla voidaan myös nähdä miten ja milloin paikallinen lämpötilanmuutos vaikuttaa ytimeen. Tulevassa laajemmassa tutkimuksessa lihaksen lämpötilaa ja hapetusta reaaliaikaisesti seuraamalla saadaan tarkempaa dataa siitä, mitä lihastasolla oikeasti tapahtuu ja miten nämä tekijät vaikuttavat kriittiseen tehoon.

LÄHTEET

- Andreacci, J. L., LeMura, L. M., Cohen, S. L., Urbansky, E. A., Chelland, S. A. & von Duvillard, S. P. (2002). The effects of frequency of encouragement on performance during maximal exercise testing. *Journal of Sports Sciences* 20 (4), 345–352. doi:10.1080/026404102753576125.
- Barstow, T. J., Lamarra, N. & Whipp, B. J. (1990). Modulation of muscle and pulmonary O₂ uptakes by circulatory dynamics during exercise. *Journal of applied physiology* 68 (3), 979–989. doi:10.1152/jappl.1990.68.3.979.
- Bennett, A. F. (1985). Temperature and muscle. *The Journal of Experimental Biology* 155 (1), 333–344. doi:10.1242/jeb.115.1.333.
- Bergstrom, H. C., Housh, T. J., Zuniga, J. M., Camic, C. L., Traylor, D. A., Schmidt, R. J. & Johnson, G. O. (2012). A new single work bout test to estimate critical power and anaerobic work capacity. *Journal of strength and conditioning research* 26 (3), 656–663. doi:10.1519/JSC.0b013e31822b7304.
- Burnley, M., Doust, J. H. & Vanhatalo, A. (2006). A 3-min all-out test to determine peak oxygen uptake and the maximal steady state. *Medicine and science in sports and exercise* 38 (11), 1995–2003. doi:10.1249/01.mss.0000232024.06114.a6.
- Burnley, M. & Jones, A. M. (2007). Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance, *European Journal of Sport Science* 7 (2), 63–79. doi:10.1080/17461390701456148.
- Byrne, C. & Lim, C. L. (2007). The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications. *British journal of sports medicine* 41 (3), 126–133. doi:10.1136/bjism.2006.026344.
- Castellani, J. W. & Tipton, M. J. (2016). Cold Stress Effects on Exposure Tolerance and Exercise Performance. *Comprehensive Physiology* 6 (1), 443–469. doi:10.1002/cphy.c140081.
- Clark, I. E., Gartner, H. E., Williams, J. L. & Pettitt, R. W. (2016). Validity of the 3-Minute All-Out Exercise Test on the CompuTrainer. *Journal of strength and conditioning research* 30 (3), 825–829. doi:10.1519/JSC.0000000000001169.
- Clark, I. E., Murray, S. R. & Pettitt, R. W. (2013). Alternative procedures for the three-minute all-out exercise test. *Journal of strength and conditioning research* 27 (8), 2104–2112. doi:10.1519/JSC.0b013e3182785041.

- Constantini, K., Sabapathy, S. & Cross, T. J. (2014). A single-session testing protocol to determine critical power and W' . *European Journal of Applied Physiology* 114, 1153–1161. doi:10.1007/s00421-014-2827-8.
- Craig, J. C., Vanhatalo, A., Burnley, M., Jones, A. M. & Poole, D. C. (2019). Critical Power. *Muscle and Exercise Physiology*, 159–181. doi:10.1016/b978-0-12-814593-7.00008-6.
- Crowley, G. C., Garg, A., Lohn, M. S., Van Someren, N. & Wade, A. J. (1991). Effects of cooling the legs on performance in a standard Wingate anaerobic power test. *British journal of sports medicine* 25 (4), 200–203. doi:10.1136/bjism.25.4.200.
- Daanen, H. A., van Es, E. M. & de Graaf, J. L. (2006). Heat strain and gross efficiency during endurance exercise after lower, upper, or whole body precooling in the heat. *International journal of sports medicine* 27 (5), 379–388. doi:10.1055/s-2005-865746.
- Flouris, A. D., Webb, P. & Kenny, G. P. (2015). Noninvasive assessment of muscle temperature during rest, exercise, and postexercise recovery in different environments. *Journal of applied physiology* 118 (10), 1310–1320. doi:10.1152/jappphysiol.00932.2014.
- Gagnon, D. D., Hancock, C., McCue, A., Beckett-Brown, N., Gagnon, J., Williams, L., Marsh, D. & Munten, S. (2020). Muscle cooling modulates tissue oxidative and biochemical responses but not energy metabolism during exercise. *European journal of applied physiology* 120 (8), 1761–1775. doi:10.1007/s00421-020-04407-4.
- Gagnon, D. D., Peltonen, J. E., Rintamäki, H., Gagnon, S. S., Herzig, K. H. & Kyröläinen, H. (2017). The effects of skin and core tissue cooling on oxygenation of the vastus lateralis muscle during walking and running. *Journal of sports sciences* 35 (20), 1995–2004. doi:10.1080/02640414.2016.1245436.
- González-Alonso, J. & Calbet, J. A. (2003). Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation* 107 (6), 824–830. doi:10.1161/01.cir.0000049746.29175.3f.
- Goulding, R. P. & Marwood, S. (2023). Interaction of Factors Determining Critical Power. *Sports medicine* 53 (3), 595–613. doi:10.1007/s40279-022-01805-w.
- Goulding, R., Rossiter, H., Marwood, S. & Ferguson, C. (2021). *Exercise and Sport Sciences Reviews* 49 (4), 274–283. doi:10.1249/JES.0000000000000267.
- Grassi, B., Poole, D. C., Richardson, R. S., Knight, D. R., Erickson, B. K. & Wagner, P. D. (1996). Muscle O₂ uptake kinetics in humans: implications for metabolic control. *Journal of applied physiology* 80 (3), 988–998. doi:10.1152/jappl.1996.80.3.988.
- Hall, J. E. & Hall, M. E. (2021). *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*. 14 painos. Philadelphia: Elsevier.

- Hamilton, C., Steinlechner, B., Gruber, E., Simon, P. & Wollenek, G. (2004). The oxygen dissociation curve: quantifying the shift. *Perfusion* 19 (3), 141–144. doi:10.1191/0267659104pf734oa.
- Johnson, T. M., Sexton, P. J., Placek, A. M., Murray, S. R. & Pettitt, R. W. (2011). Reliability analysis of the 3-min all-out exercise test for cycle ergometry. *Medicine and science in sports and exercise* 43 (12), 2375–2380. doi:10.1249/MSS.0b013e318224cb0f.
- Jones, A. M., Burnley, M., Black, M. I., Poole, D. C. & Vanhatalo, A. (2019). The maximal metabolic steady state: redefining the 'gold standard'. *Physiological reports* 7 (10), e14098. doi:10.14814/phy2.14098.
- Jones, A. M. & Poole, D. C. (2005). Oxygen uptake dynamics: from muscle to mouth - an introduction to the symposium. *Medicine and science in sports and exercise* 37 (9), 1542–1550. doi:10.1249/01.mss.0000177466.01232.7e.
- Kaciuba-Uscilko, H. & Gruzca, R. (2001). Gender differences in thermoregulation. *Current opinion in clinical nutrition and metabolic care* 4 (6), 533–536. doi:10.1097/00075197-200111000-00012.
- Kaiser, B. W., Kruse, K. K., Gibson, B. M., Santisteban, K. J., Larson, E. A., Wilkins, B. W., Jones, A. M., Halliwill, J. R. & Minson, C. T. (2021). The impact of elevated body core temperature on critical power as determined by a 3-min all-out test. *Journal of applied physiology* 131 (5), 1543–1551. doi:10.1152/jappphysiol.00253.2021.
- Kenney, W. L., Wilmore, J. H. & Costill, D. L. (2020). *Physiology of Sport and Exercise*. 7. painos. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Koppo, K., Bouckaert, J. & Jones, A. M. (2004). Effects of training status and exercise intensity on phase II VO₂ kinetics. *Medicine and science in sports and exercise* 36 (2), 225–232. doi:10.1249/01.MSS.0000113473.48220.20.
- Kuo, Y. H., Cheng, C. F. & Kuo, Y. C. (2021). Determining Validity of Critical Power Estimated Using a Three-Minute All-Out Test in Hot Environments. *International journal of environmental research and public health* 18 (17), 9193. doi:10.3390/ijerph18179193.
- Kurz, A. (2008). Physiology of thermoregulation. Best practice & research. *Clinical anaesthesiology* 22 (4), 627–644. doi: 1016/j.bpa.2008.06.004.
- Lim, C. L., Byrne, C. & Lee, J. K. (2008). Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings. *Annals of the Academy of Medicine Singapore* 37 (4), 347–353.

- Mallette, M. M., Green, L. A., Gabriel, D. A. & Cheung, S. S. (2018). The effects of local forearm muscle cooling on motor unit properties. *European Journal of Applied Physiology* 118 (2), 401–410. doi:10.1007/s00421-017-3782-y.
- McArdle, W. D., Katch, F. I. & Katch V. L. (2015). *Exercise Physiology, Energy, Nutrition and Human Performance*. 8. painos. Baltimore, ML: Lippincott Williams & Wilkins.
- McLester, C. N., Nickerson, B. S., Kliszczewicz, B. M. & McLester, J. R. (2020). Reliability and Agreement of Various InBody Body Composition Analyzers as Compared to Dual-Energy X-Ray Absorptiometry in Healthy Men and Women. *Journal of clinical densitometry: the official journal of the International Society for Clinical Densitometry* 23 (3), 443–450. doi:10.1016/j.jocd.2018.10.008.
- Monod, H. & Scherrer, J. (1965). The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics* 8 (3), 329–338. doi:10.1080/00140136508930810.
- Muniz-Pumares, D., Karsten, B., Triska, C. & Glaister, M. (2019). Methodological Approaches and Related Challenges Associated with the Determination of Critical Power and Curvature Constant. *Journal of Strength & Conditioning Research* 33 (2), 584–596. doi:10.1519/JSC.0000000000002977.
- Murgatroyd, S. R., Ferguson, C., Ward, S. A., Whipp, B. J. & Rossiter, H. B. (2011). Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in humans. *Journal of Applied Physiology* 110 (6), 1598–1606. doi:10.1152/jappphysiol.01092.2010.
- Oksa, J., Rintamäki, H., Mäkinen, T., Hassi, J. & Rusko, H. (1995). Cooling-induced changes in muscular performance and EMG activity of agonist and antagonist muscles. *Aviation, space, and environmental medicine* 66 (1), 26–31.
- Pendergast, D. R. (1988). The effect of body cooling on oxygen transport during exercise. *Medicine and science in sports and exercise* 20 (5), 171–S176. doi:10.1249/00005768-198810001-00015.
- Poole, D. C., Burnley, M., Vanhatalo, A., Rossiter, H. B. & Jones, A. M. (2016). Critical Power: An Important Fatigue Threshold in Exercise Physiology. *Medicine & Science in Sports & Exercise* 48 (11), 2320–2334. doi:10.1249/MSS.0000000000000939.
- Poole, D. C. & Jones, A. M. (2012). Oxygen uptake kinetics. *Comprehensive Physiology* 2 (2), 933–996. doi:10.1002/cphy.c100072.
- Racinais, S., Cocking, S. & Périard, J. D. (2017). Sports and environmental temperature: From warming-up to heating-up. *Temperature* 4 (3), 227–257. doi:10.1080/23328940.2017.1356427.

- Racinais, S. & Oksa, J. (2010). Temperature and neuromuscular function. *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 20 (3), 1–18. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01204.x.
- Richard, N. A. & Koehle, M. S. (2022). Influence and Mechanisms of Action of Environmental Stimuli on Work Near and Above the Severe Domain Boundary (Critical Power). *Sports medicine - open* 8 (1), 42. doi:10.1186/s40798-022-00430-1.
- Ross, M., Abbiss, C., Laursen, P., Martin, D. & Burke, L. (2013). Precooling methods and their effects on athletic performance: a systematic review and practical applications. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)* 43 (3), 207–225. doi:10.1007/s40279-012-0014-9.
- Vanhatalo, A., Black, M. I., DiMenna, F. J., Blackwell, J. R., Schmidt, J. F., Thompson, C., Wylie, L. J., Mohr, M., Bangsbo, J., Krstrup, P. & Jones, A. M. (2016). The mechanistic bases of the power–time relationship: muscle metabolic responses and relationships to muscle fibre type. *Journal of Physiology* 594 (15), 4407–4423. doi:10.1113/JP271879.
- Vanhatalo, A., Doust, J. H. & Burnley, M. (2007). Determination of critical power using a 3-min all-out cycling test. *Medicine and science in sports and exercise* 39 (3), 548–555. doi:10.1249/mss.0b013e31802dd3e6.
- Vecellio, D. J., Cottle, R. M., Wolf, S. T. & Kenney, W. L. (2023). Critical Environmental Limits for Human Thermoregulation in the Context of a Changing Climate. *Exercise, Sport, and Movement* 1 (2). doi:10.1249/ESM.0000000000000008.
- Wegmann, M., Faude, O., Poppendieck, W., Hecksteden, A., Fröhlich, M. & Meyer, T. (2012). Pre-cooling and sports performance: a meta-analytical review. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)* 42 (7), 545–564. doi:10.2165/11630550-000000000-00000.
- Whipp, B. J. & Wasserman, K. (1972). Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *Journal of applied physiology* 33 (3), 351–356. doi:10.1152/jappl.1972.33.3.351.
- Wilson, T. E., Sauder, C. L., Kearney, M. L., Kuipers, N. T., Leuenberger, U. A., Monahan, K. D. & Ray, C. A. (2007). Skin-surface cooling elicits peripheral and visceral vasoconstriction in humans. *Journal of applied physiology* 103 (4), 1257–1262. doi:10.1152/japplphysiol.00401.2007.
- Yanagisawa, O., Homma, T., Okuwaki, T., Shimao, D. & Takahashi, H. (2007). Effects of cooling on human skin and skeletal muscle. *European journal of applied physiology* 100 (6), 737–745. doi:10.1007/s00421-007-0470-3.