Luottamuksellinen - Confidential (3Y)

Euroopan unionin osarahoittama

Tampereen ammattikorkeakoulu

OPLITE OPTIMAALISTA LISÄARVOA TEKNOLOGIASTA

3DTY 3D-tulostuksen yhteishanke

KCL 3D20 (former UPM Formi 3D20/19) materiaalin vetokokeet

OPLITE-Casebook

Anne Seppälä, Mikko Ukonaho, Auni Karja

22.4.2026

Tampereen ammattikorkeakoulu

Sisällysluettelo

Johdanto 3

Vaakasuoraan leikatut testisauvat 5

Pystysuoraan leikatut testisauvat 8

Johtopäätökset 11

Johdanto

Ainetta lisäävässä valmistuksessa tulostusparametreillä voi olla suuri vaikutus tulostuksen onnistumiseen ja valmistuvan kappaleen ominaisuuksiin. OPLITE hankkeessa testattiin, yhteistyössä hankkeen 3DTY (3D-tulostuksen yhteishanke 3DTY – TAMK) kanssa, tulostusparametrien vaikutusta tulosteen lujuusominaisuuksiin. Testattava materiaali oli KCL 3D20 (former UPM Formi 3D20/19). Testissä testattiin materiaalin vetolujuutta sekä kerrosten välistä adheesiota tulosteissa. Tulostus tehtiin käyttäen liikeradalla varustettua ABB:n IRB4600-robottia ja CEAD E25-ekstruuderia. Testikappaleiden tulostuksessa muuttuvat parametrit olivat robotin liikenopeus, tulostuspään lämpötila ja tulosteen kerros-/kierrospituus. Kuvassa 1 on esitetty kuvia tulostetuista kappaleista.



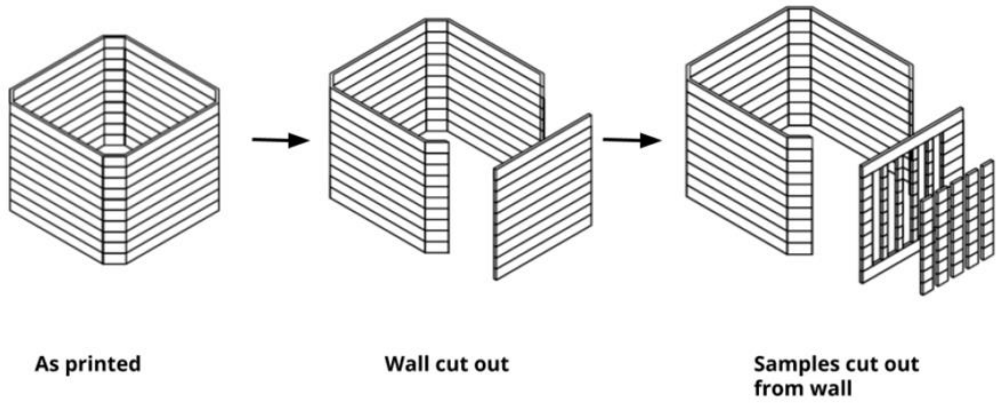
KUVA 1. Tulostettuja testilaatikoita.

Testiä varten luotu testimatriisi on esitetty taulukossa 1. Ennen varsinaista testausta tehtiin muutamia alustavia tulostuksia, joilla pyrittiin selvittämään tulostuslämpötilan raja-arvot sekä muita tulostukseen liittyviä parametrejä kuten tuulettimen jatkuva tarve sekä tulostettavan palon leveys ja korkeus.

TAULUKKO 1. Tulostusparametrit.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Lämpötila	Nopeus	Pituus
2	1	1	1	210	20	1500
7	2	1	1	190	50	3000
3	3	1	1	190	50	1500
5	4	1	1	190	20	3000
4	5	1	1	210	50	1500
8	6	1	1	210	50	3000
6	7	1	1	210	20	3000
1	8	1	1	190	20	1500

Jokaisesta tulostetusta testilaatikosta leikattiin viisi testisauvaa sekä kerrossuunnassa (vaakasuunta) että kerrossuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa (pystysuunta). Kuvassa 2 on havainnollistettu testisauvojen leikkaus.



KUVA 2. Testisauvojen leikkaus testilaatikoista. Kuva esittää tapausta, jossa sauvat on leikattu pystysuunnassa, eli kerrossuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa.

Vetokokeet tehtiin Lloyd Instruments LR10K aineenkoestuskoneella (kuva 3). Testisauvat olivat mitoiltaan 20 x 170 mm. Vetokoneen tarttujien väli oli mittauksissa 114 mm eli tarttuja peitti testisauvasta noin 28 mm molemmista päistä. Vetokokeessa käytetty nopeus oli 10 mm/min. Vetokokeessa mitattiin testisauvan kestämä kuorma (maksimivoima) ja sauvan pituuden muutos. Sauvan murtolujuus (jännitys) laskettiin mittaamalla kunkin sauvan poikkileikkaus. Näin toimittiin, koska tulosteiden mitat vaihtelevat jonkin verran.



Kuva 3. Vetokoe

Vaakasuoraan leikatut testisauvat

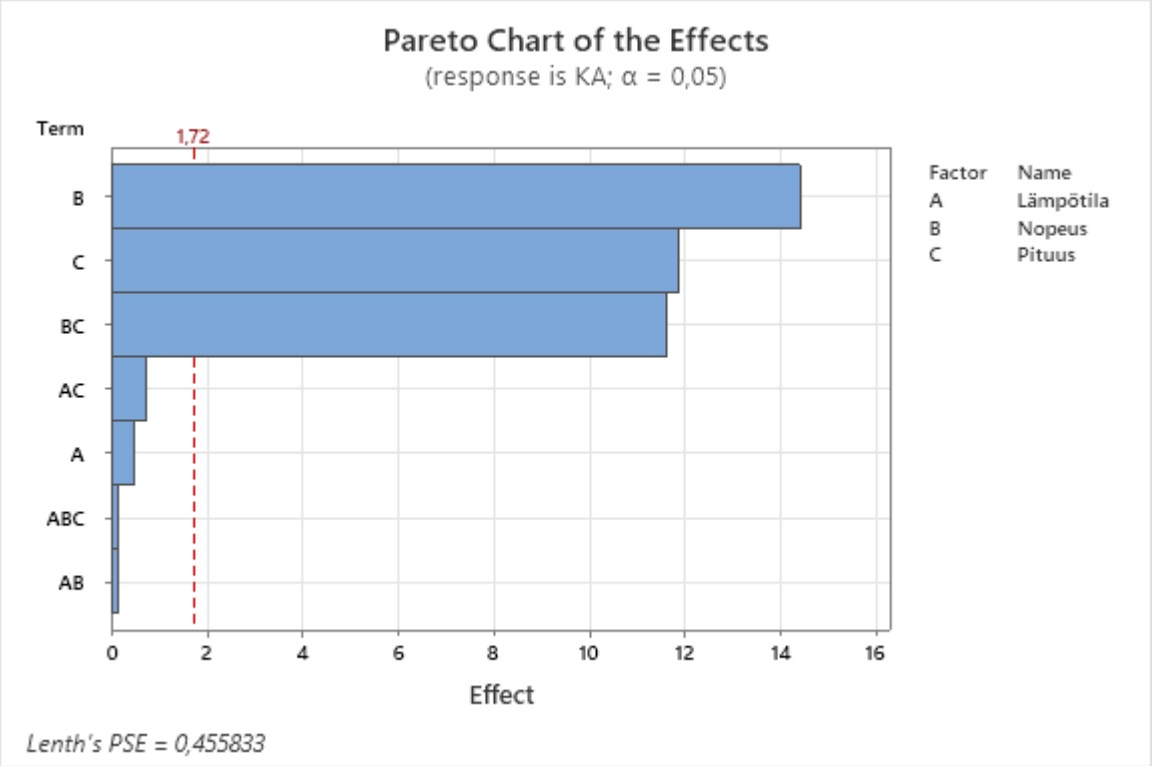
Vaakasuoraan leikattujen testisauvojen avulla voitiin tutkia itse materiaalin lujuusominaisuuksia. Tulokset vetokokeista on esitelty taulukossa 2. Näyteiden 1-5 arvot niille laskennallisesti määritettyjä jännityksen arvoja ja yksikkö on MPa. Sarakkeessa KA on esitetty kunkin näytesarjan jännitystulosten keskiarvo ja sarakkeessa StD tulosten keskihajonta.

TAULUKKO 2. Kerros-/vaakasuoraan leikattujen testisauvojen vetokoetulokset.

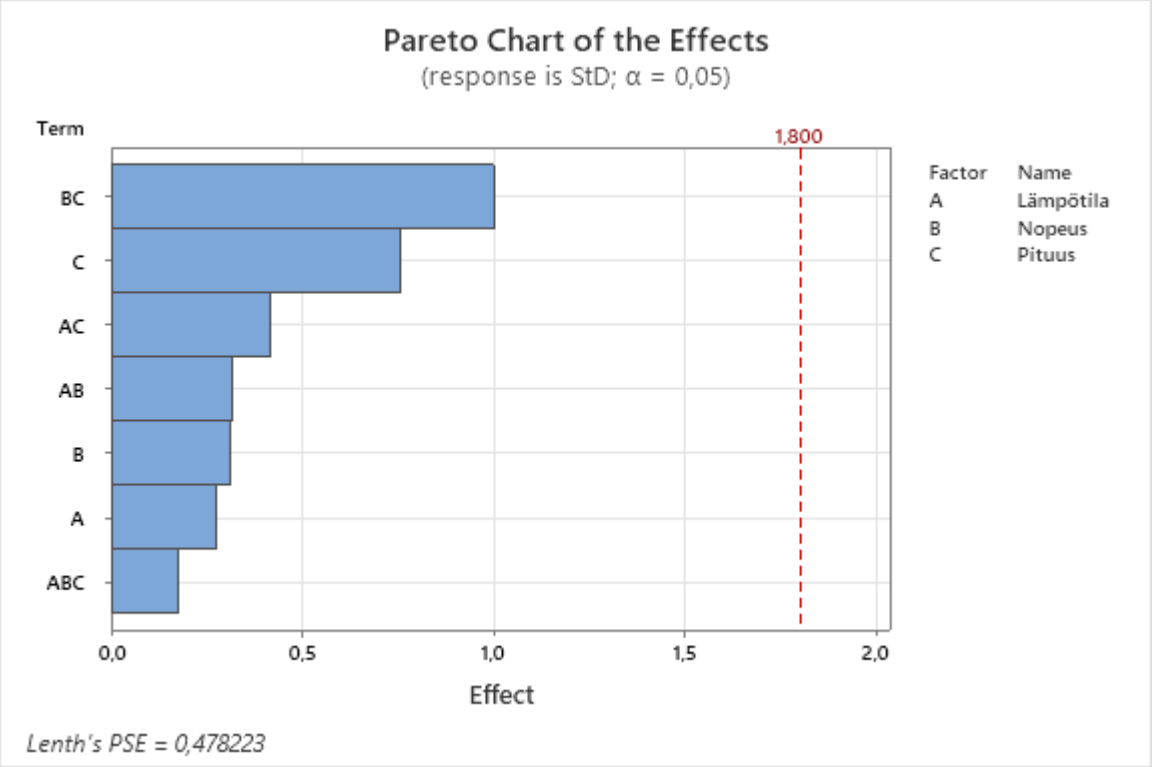
Lämpötila	Nopeus	Pituus	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	KA	StD
210	20	1500	24,0	22,8	22,9	21,0	23,7	22,9	1,16
190	50	3000	25,9	26,0	25,8	24,8	26,2	25,7	0,55
190	50	1500	27,8	26,8	26,6	26,8	26,4	26,9	0,54
190	20	3000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
210	50	1500	25,7	25,8	26,0	25,7	25,1	25,7	0,34
210	50	3000	26,6	25,4	26,2	25,7	27,5	26,3	0,83
210	20	3000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
190	20	1500	21,8	26,0	25,5	21,2	25,8	24,1	2,35

Tuloksista voi havaita, että kahdessa tapauksessa lujuus on nolla. Näissä tapauksissa tulostus ei onnistunut tai tuloste oli lujuudeltaan niin heikkoa, että koesauvojen valmistus ei ollut mahdollista. Taulukon neljäs sarja oli tapaus, jossa tulostaminen ei onnistunut ollenkaan. Taulukon seitsemännessä tapauksessa tulosteen kerrosten välinen adheesio oli niin heikkoa, että testisauvojen valmistaminen ei onnistunut.

Tulokset analysoitiin Minitab ohjelmistolla. Kuvassa 4 on esitetty Pareto-kuvaaja lujuuteen vaikuttavista parametreista. Kuvaajasta nähdään, että liikenopeudella ja kerrospituudella on merkittävä vaikutus kappaleen lujuuteen. Kuvassa 5 on vastaavasti esitetty Pareto-kuvaaja hajontaan vaikuttavista parametreista. Kuvasta voidaan todeta, että minkään muuttujan vaikutuksen hajontaa ei voida sanoa olevan tilastollisesti merkittävä.

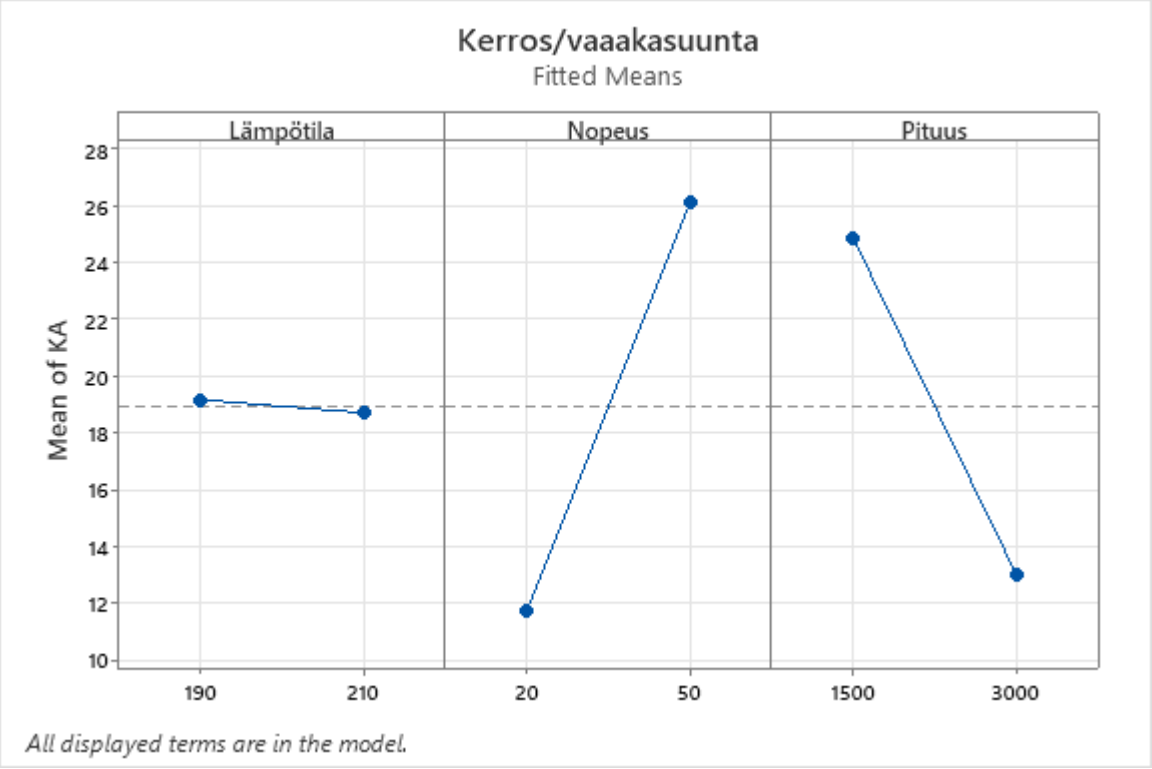


Kuva 4. Pareto-kuvaaja lujuuteen vaikuttavista muuttujista.



Kuva 5. Pareto-kuvaaja hajontaan vaikuttavista muuttujista.

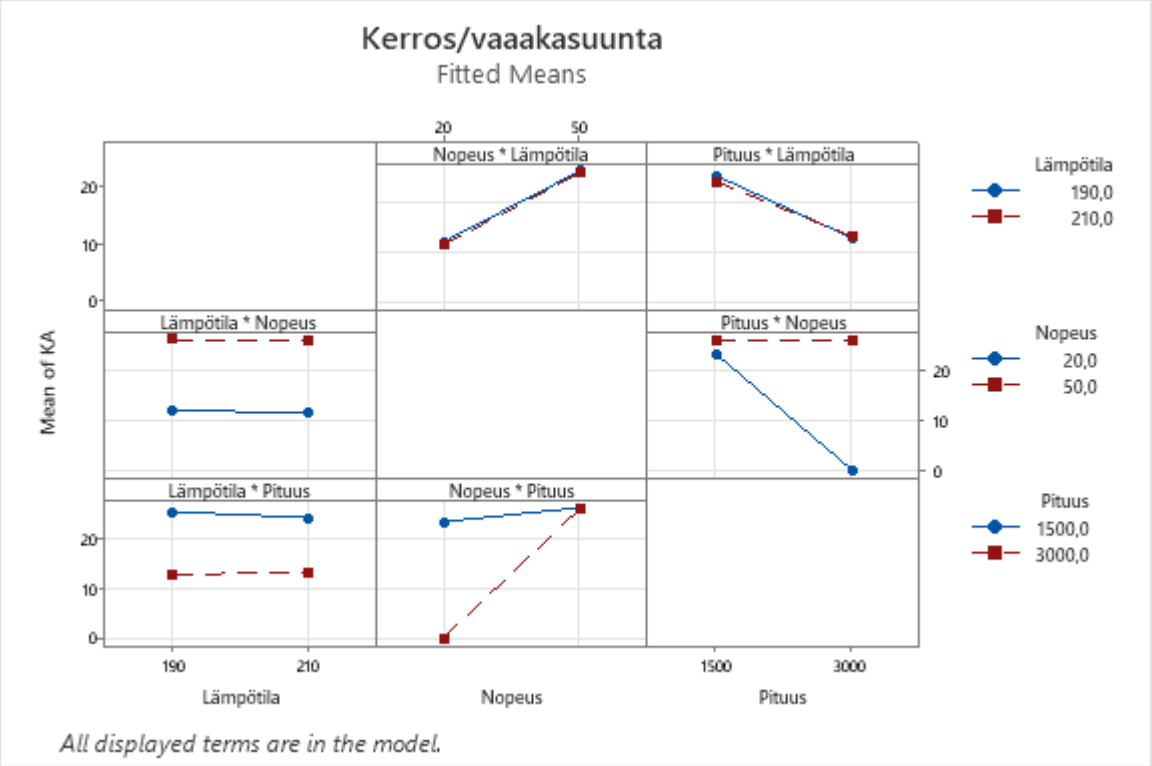
Kuvassa 6 on esitetty päävaikutuskuvaaja (Main Effects Plot) lujuuteen vaikuttavista parametreista. Kuvaajasta nähdään, että tulostuslämpötilalla ei ole lujuuteen vaikutusta. Nopeuden kasvattamisella on positiivinen vaikutus lujuuteen. Vastaavasti kerrospituuden kasvu vaikuttaa lujuuteen negatiivisesti.



Kuva 6. Päävaikutuskuvaaja lujuuteen vaikuttavista parametreista.

Kuvassa 7 on esitetty vuorovaikutuskuvaaja (Interaction Plot) lujuuteen vaikuttavista termeistä. Kuvista nähdään, että liikenopeudella ja kerrospituudella ei ole ristikorrelaatiota keskenään.

Lujuuden hajontaan liittyviä vuorovaikutuskuvaajia ei ole tässä yhteydessä esitetty, koska mikään parametreista ei analyysin perusteella ollut tilastollisesti merkittävä ja koska vaikutukset lujuuden keskiarvoon olivat tässä vaiheessa suuremman kiinnostuksen kohteena.



Kuva 7. Vuorovaikutuskuvaaja lujuuteen vaikuttavista parametreista.

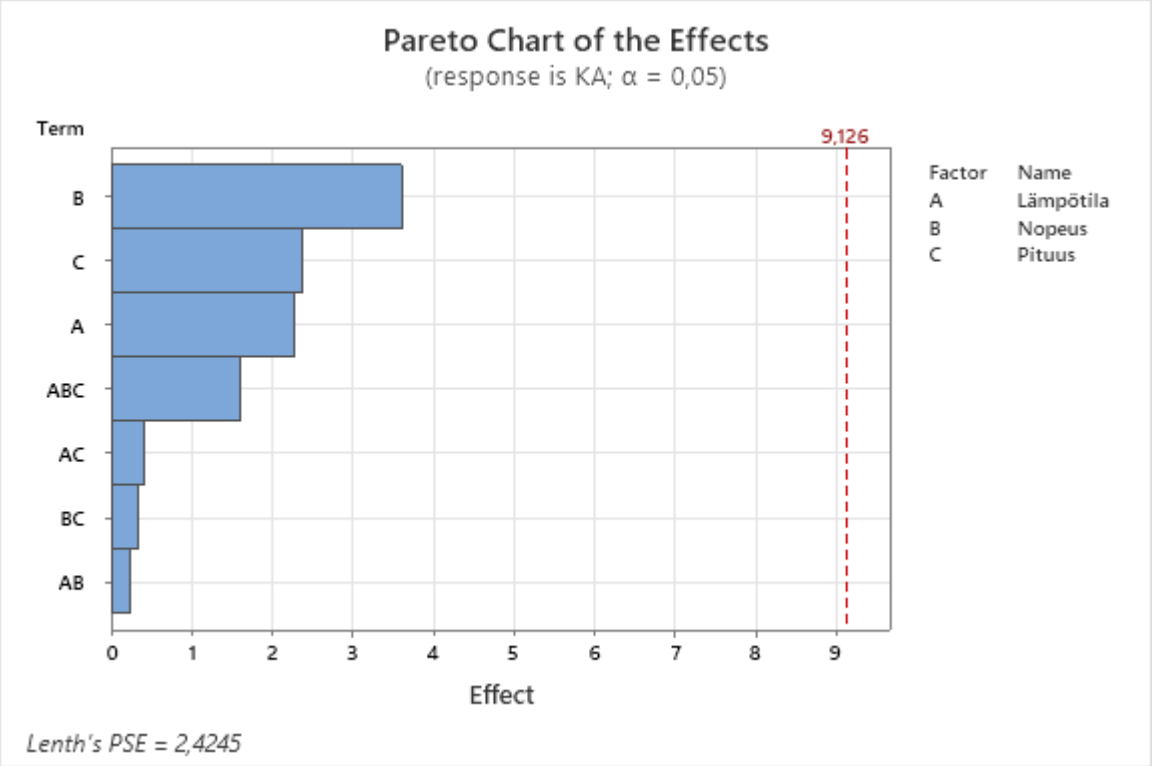
Pystysuoraan leikatut testisauvat

Kerrossuuntaa vastaa kohtisuoraan, eli pystysuunnassa leikattujen testisauvojen avulla tutkittiin kerrosten välistä adheesiota. Tulokset vetokokeista on esitelty taulukossa 3. Kuten jo vaakasuunnassa leikattujen testisauvojen yhteydessä todettiin yksi tulostus ei onnistunut kyseisillä parametreilla ollenkaan (taulukon 3 neljäs sarja) ja tämän lisäksi oli adheesio kerrosten välissä kahdessa tapauksessa (taulukko 3, 7. ja 8. sarja) erittäin alhainen.

TAULUKKO 3. Pystysuoraan leikattujen testisauvojen vetokoetulokset.

Lämpötila	Nopeus	Pituus	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	KA	StD
210	20	1500	4,2	4,2	4,0	4,0	4,0	4,1	0,10
190	50	3000	1,7	1,9	1,6	1,9	0,0	1,4	0,81
190	50	1500	5,2	5,1	5,4	5,5	5,5	5,3	0,19
190	20	3000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
210	50	1500	6,4	6,7	6,3	6,8	6,9	6,6	0,25
210	50	3000	4,7	4,9	5,0	5,5	5,5	5,1	0,36
210	20	3000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
190	20	1500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00

Kuvassa 8 on esitetty Pareto-kuvaaja kerrostenväliseen lujuuteen/adheesioon vaikuttavista parametreistä. Kuvasta nähdään, että minkään parametrin ei voida sanoa olevan tilastollisesti vaikuttava.

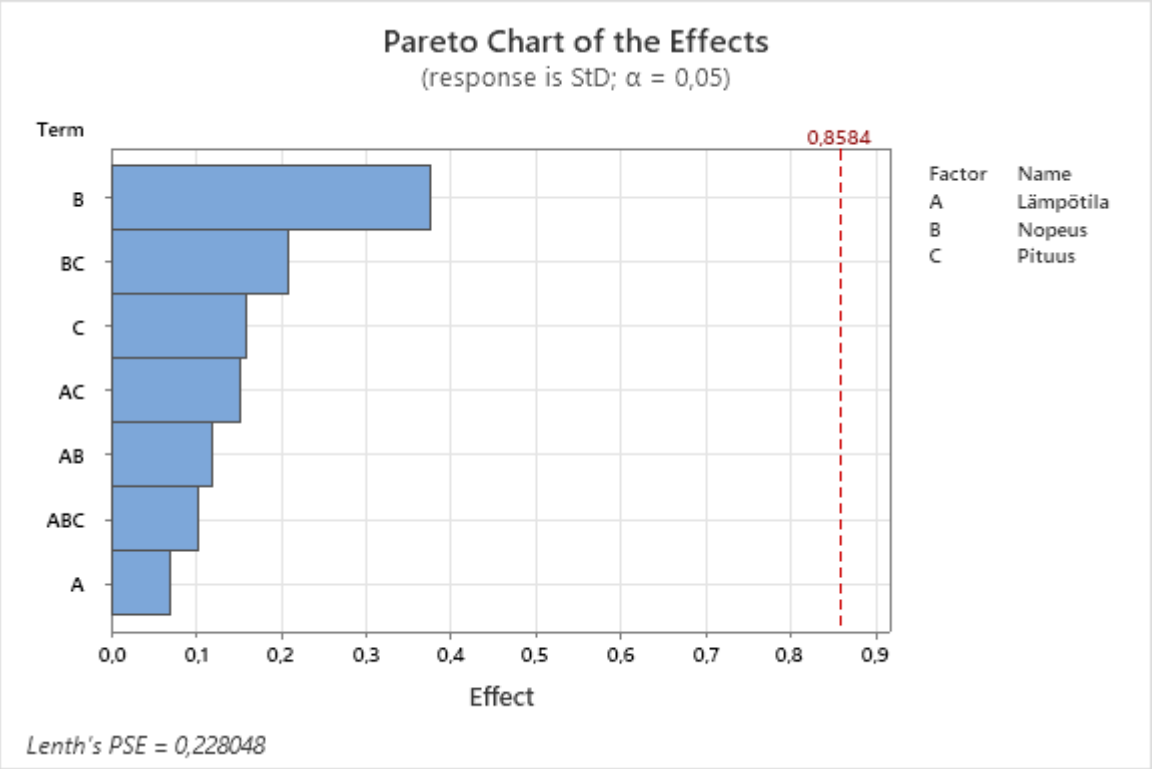


Kuva 8. Pareto-kuvaaja lujuuteen/adheesioon vaikuttavista muuttujista.

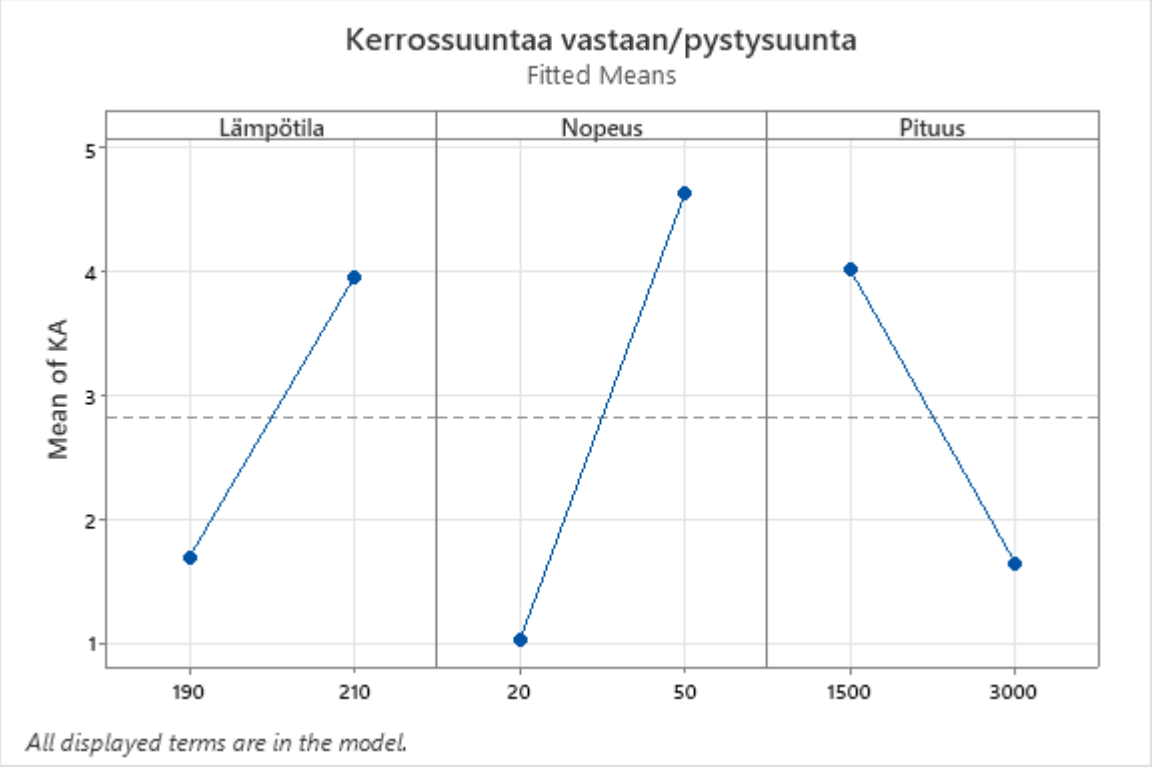
Kuvassa 9 on esitetty Pareto-kuvaaja adheesion hajontaan vaikuttavista parametreista. Kuvasta voidaan todeta, että minkään muuttujan vaikutuksen hajontaa ei voida sanoa olevan tilastollisesti merkittävä.

Vaikka analyysin perusteella ei löytynyt tilastollisesti merkittäviä adheesioon vaikuttavia parametrejä, on kuvissa 10 ja 11 esitetty päävaikutuskuvaaja ja vuorovaikutuskuvaaja adheesioon vaikuttavista muuttujista. Tulokset ovat samansuuntaisia, kuin lujuuden tarkastelun yhteydessä saatiin. Kuvasta 10 nähdään, että lämpötilan ja nopeuden nosto näyttäisi parantavan adheesiota, kun taas kerrospituuden kasvaminen vaikuttaa negatiivisesti adheesioon. Parametreillä ei vaikuttaisi olevan ristikorrelaatiota keskenään, kuten kuvasta 11 voidaan nähdä.

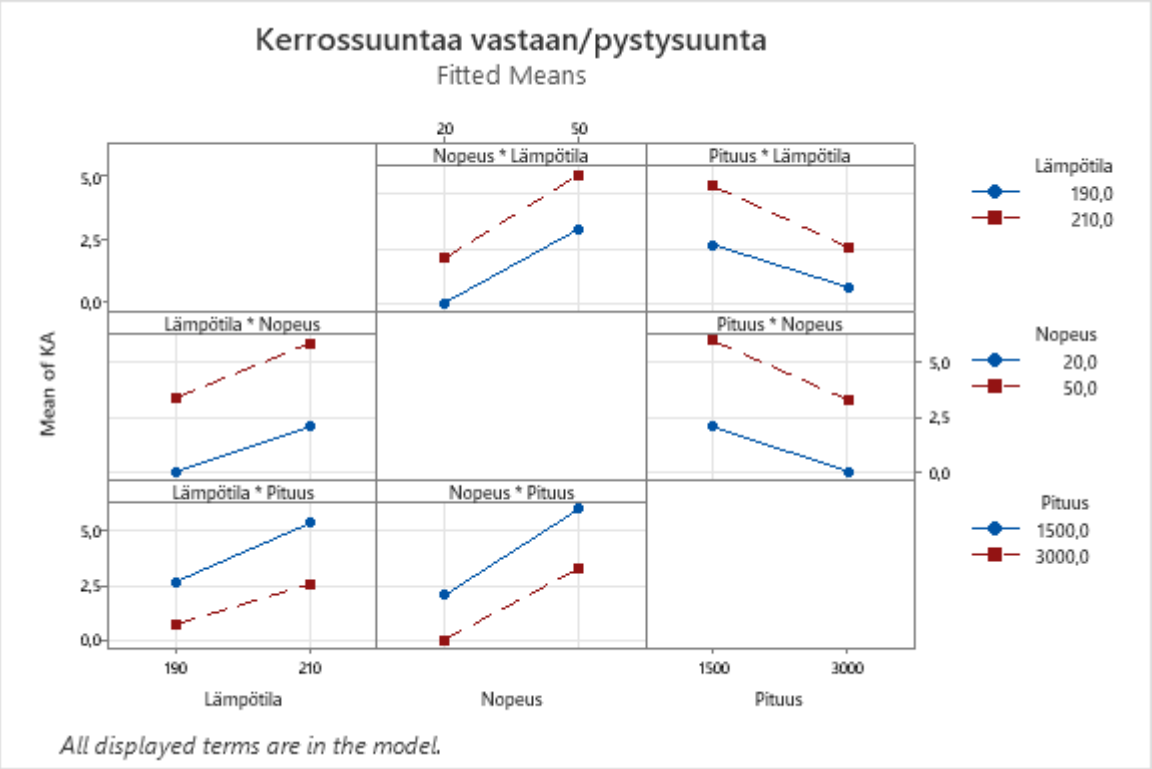
Adheesion hajontaan liittyviä vuorovaikutuskuvaajia ei ole tässä yhteydessä esitetty, koska mikään parametreista ei analyysin perusteella ollut tilastollisesti merkittävä ja koska vaikutukset adheesion keskiarvoon olivat tässä vaiheessa suuremman kiinnostuksen kohteena.



Kuva 9. Pareto-kuvaaja lujuuden/adheesion hajontaan vaikuttavista muuttujista.



Kuva 10. Päävaikutuskuvaaja adheesioon vaikuttavista parametreista.



Kuva 11. Vuorovaikutuskuvaaja adheesioon vaikuttavista parametreista.

Johtopäätökset

Tulosten perusteella voidaan päätellä, että tulostusnopeudella ja kerrospituudella on vaikutusta sekä materiaalin lujuuteen että kerrosten välisen adheesioon. Tulostuslämpötilalla ei näyttäsi olevan merkittävää vaikutusta materiaalin lujuuteen. Yksi johtopäätös tuloksista on, että hitaammalla nopeudella ja pidemmällä kerrospituudella edellinen kerros, jonka päälle uusi kerros syntyy, jäähtyy niin paljon, että adheesio edelliseen kerrokseen huononee. Testeihin oli alun perin suunniteltu lisättäväksi yhdeksi parametriksi edellisen kerroksen lämpötila sillä hetkellä, kun seuraavaa kerrosta aloitetaan tulostamaan. Tämä jäi kuitenkin tekemättä mittausjärjestelyn vaikeuden vuoksi.