

**Mirella Heinvirta, Markku Kalima, Tiina Kauvosaari
Mari Kämäräinen, Toni Taikina-aho**

Hiukkasmittausanturit mobiilimittauksissa: vertailu ja arviointi

Tietotekniikan
raportti
26. toukokuuta 2026

Jyväskylän yliopisto
Informaatioteknologian tiedekunta
Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Ilmanlaatu teollisuusalueilla	2
1.2	Hiukkasantureissa käytettävä tekniikka	2
1.2.1	Optinen valonsironta hiukkasmittauksessa (light scattering) .	3
1.2.2	Kamerapohjaiset optiset hiukkasanturit (image-based sensing)	5
1.3	Kosteuden vaikutus mittausten luotettavuuteen	6
1.3.1	Kosteuden aiheuttamat muutokset pölyhiukkaseen	6
2	Kaupalliset liikuteltavat pölyä mittaavat laitteet	9
2.1	SidePak AM520 Personal Aerosol Monitor	9
2.2	Trolex XD1+	10
2.3	Aeroqual Ranger PMX	11
2.4	Atmotube PRO 2	12
2.5	Laitevertailu	14
2.5.1	Mittausalue ja käyttölämpötila	14
2.5.2	Akun kesto ja massa	15
2.5.3	Hinta	15
2.5.4	Liitännät ja mittausarvojen lukeminen	15
3	Mobiiliin käyttöön soveltuvat PM-anturit	16
3.1	Sensirion SPS30	16
3.2	Sensirion SEN54 / SEN55	17
3.3	Honeywell IH-PMC-002 / IH-PMC-001	18
3.4	Plantower PMS5003 Particulate Matter	19
3.5	Anturien ominaisuudet ja valintakriteerit	20
3.5.1	Mittaustekniikka	22
3.5.2	Mittausalue ja tarkkuus	22
3.5.3	Käyttölämpötila	22
3.5.4	Virrankulutus ja vasteaika	22
3.5.5	Liitettävyyys ja ohjelmistot	23

3.5.6	Kalibrointi	23
3.6	Ilmankosteuden huomioiminen sensoridataa luettaessa	24
	Lähteet	25

1 Johdanto

Pöly heikentää ilmanlaatua ja voi aiheuttaa terveys- ja ympäristöhaittoja. Hiukkasten monitorointi on keskeinen osa terveellisen ja turvallisen elinympäristön varmistamista etenkin rakennustyömailla ja teollisuusympäristöissä. Hiukkasmäärien tarkka ja reaaliaikainen monitorointi auttaa tunnistamaan riskitekijöitä ja kohdistamaan toimenpiteitä pölyn määrän vähentämiseksi. Se tarjoaa myös arvokasta tietoa ympäristövaikutuksista ja auttaa täyttämään viranomaisvaatimukset sekä työturvallisuuden standardit. Näiden syiden vuoksi luotettava ja helposti käytettävä pölypitoisuuden seurantaratkaisu on tärkeä osa modernia työ- ja elinympäristöjen valvontaa. Perinteisten kiinteiden mittalaitteiden rinnalle on tullut IoT-pohjaisia mittausratkaisuja, jotka ovat kustannustehokkaita, käyttäjäystävällisiä ja mahdollistavat langattoman tiedonsiirron. Vaikka näiden sensoreiden tarkkuus on jonkin verran heikompi kuin perinteisten mitta-asemien, ne ovat joustavampia ja helpompia ylläpitää ja mahdollistavat ilmanlaadun reaaliaikaisen seurannan entistä laajemmilla alueilla. Nämä liikuteltavat mittarit ovat tehokkaita etenkin paikallisten päästölähteiden kartoituksessa.

Tuotantoalueilla syntyy monenlaista pölyä kuten kivi-, puu ja metallipöly. Näille altistuminen voi aiheuttaa terveydellisiä haittoja kuten hengitystieoireet, astma, keuhkosityöpä ja muut keuhkosairaudet, sydän- ja verisuonitaudit sekä allergiset oireet. Mittaamalla pölypitoisuuksia voidaan kartoittaa pölyn lähteitä ja suunnitella toimenpiteitä pölyämisen rajoittamiseksi tai kehottaa ihmisiä suojautumaan altistukselta. Hiukkaslähteiden tuntemus sekä hiukkasten terveysvaikutusten ymmärtäminen ovat olennaisia ilmanlaadun parantamiseen tähtäävien toimenpiteiden suunnittelussa. Näin varmistetaan turvallinen ja säädöksiä noudattava työympäristö sekä päästölähteiden hallinta.

Tässä raportissa tarkastellaan teollisuusalueille soveltuvia liikuteltavia hiukkasantureita sekä valmiita mittausratkaisuja ja vertaillaan niiden keskeisiä ominaisuuksia. Tarkastelun kohteena ovat erityisesti mittaus-tarkkuus, vasteaika, virrankulutus, toimintavarmuus sekä soveltuvuus jatkuvaan ympäristömittaukseen.

1.1 Ilmanlaatu teollisuusalueilla

Erilaiset teollisuusalueet ovat merkittäviä pölylähteitä ja voivat aiheuttaa laajoille alueille useita vuosia kestäviä pölyhaittoja sekä työmaaliikenteen kautta levittää pölyä myös lähiympäristöön. Suuret silmin havaittavat hiukkaset aiheuttavat lähinnä likaantumista ja haittaavat viihtyisyyttä, mutta pienet hengitettävät hiukkaset kulkeutuvat henkitorveen ja keuhkoihin ja voivat aiheuttaa terveyshaittoja. Aiheutuvan pölyhaitan suuruuteen työmaalla vaikuttavat muun muassa pölyävien työvaiheiden määrä ja tiheys, työstettävät materiaalit, työmaaliikenne, maaperän ominaisuudet sekä sääolosuhteet. Pölyn muodostumista tulee ehkäistä teknisillä ja toiminnallisilla ratkaisuin sekä lisäksi estää sen leviäminen alueen ulkopuolelle pölyä sitovilla menetelmillä etenkin silloin, kun läheisyydessä on asutusta tai muita herkkiä kohteita. [10]

Teollisuusalueilla ja työmailla pölyntorjunta voidaan huomioida toimintojen sijoittelussa ja hiukkasia voidaan torjua pölynsidonnalla, kastelulla, työmaalta poistuvien ajoneuvojen renkaiden pesulla ja kuormia peittämällä sekä suoja-aidoilla ja teltoilla. [11]

1.2 Hiukkasantureissa käytettävä tekniikka

Yleisimmin hiukkasantureissa käytetty mittaustapa perustuu valonsirontaan. Ilmasta otettu näyte ohjataan laitteen sisällä laserilla valaistun mitta-alueen läpi. Mittausalueen läpi kulkevat hiukkaset siroavat valonsädettä, ja tämä sironnut valo havaitaan anturin fotodetektorilla. Sironnan voimakkuus riippuu hiukkasen koosta, joten sen avulla anturi pystyy paitsi havaitsemaan hiukkaset, myös arvioimaan niiden koon. Toisin sanoen jokainen hiukkanen jättää valojäljen kulkiessaan säteen läpi: suuremmat hiukkaset tuottavat voimakkaamman signaalin ja pienemmät heikomman. [26] Tekniikka on käytössä sekä infrapuna- että laseria käyttävissä hiukkasantureissa. Nämä anturit ovat edullisia ja tarkkuudeltaan riittäviä ilmanlaadun seurantaan. Saatavilla on myös ammattitason OPC-laitteita, jotka laskevat yksittäisiä hiukkasia ja mittaavat tarkasti hiukkasten kokojakauman. [9] Seuraavassa kuvataan tarkemmin optisen sironnan tekniikoita.

1.2.1 Optinen valonsironta hiukkasmittauksessa (light scattering)

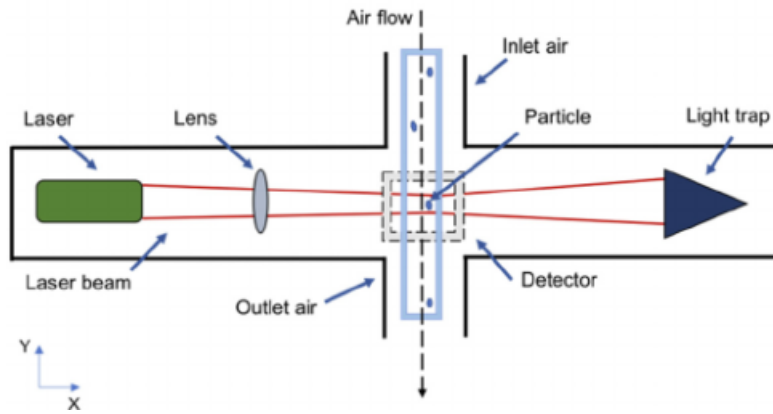
Optiseen hajontaan perustuvien hiukkasantureiden (optiset hiukkasanturit) toiminta perustuu valon sirontaan. Siinä ilmassa kulkevat hiukkaset leikkaavat valonsäteen, tyypillisesti laserin tai LED -valonlähteen. Hiukkasten sirottama valo mitataan, ja saatu optinen signaali muunnetaan laskennallisesti hiukkaspitoisuuksiksi, useimmiten massapitoisuudeksi. [9]

Optiset hiukkasanturit voidaan jakaa kahteen pääryhmään. Nefelometrit mittaavat useiden hiukkasten yhdessä aiheuttamaa valon sirontaa keräämällä sironnutta valoa laajalta kulma-alueelta ja suhteuttamalla kokonaissirontasignaalin referenssimittaukseen. Optiset hiukkaslaskurit puolestaan havaitsevat hiukkaset yksittäin. Tällöin jokainen hiukkanen tuottaa mitattavan valopulssin, jonka voimakkuuden perusteella hiukkanen luokitellaan kokoluokkaan, ja muodostetusta kokojakaumasta estimoidaan massapitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). [9]

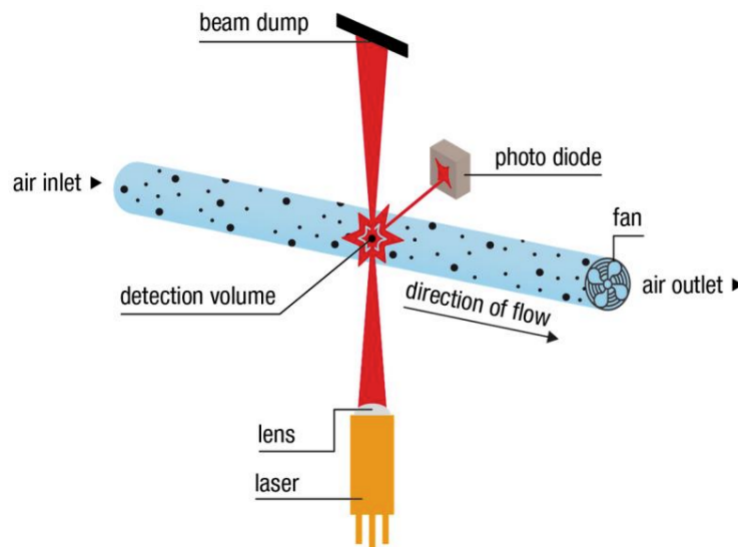
Optisissa hiukkaslaskureissa mitatun sironneen valon voimakkuus on verrannollinen yksittäisen hiukkasen kokoon. Sirontakäyttäytyminen riippuu hiukkasen koon ja käytetyn valon aallonpituuden välisestä suhteesta. Kun hiukkasen säde on huomattavasti pienempi kuin valon aallonpituus ($r \ll \lambda$), sironta noudattaa Rayleighin teoriaa, jolloin sironneen valon intensiteetti on verrannollinen hiukkasen säteen kuudenteen potenssiin ($I \propto r^6$). Hiukkaskoon kasvaessa ja sen ollessa huomattavasti suurempi kuin valon aallonpituus ($r \gg \lambda$) sironta noudattaa Mie'n teoriaa, jossa sironneen valon intensiteetti on verrannollinen hiukkasen säteen neliöön ($I \propto r^2$). [15]

Kuvassa 1.1 esitetään optisen hiukkasanturin toimintaperiaate Molaién ja Linon katsausartikkelista [15]. Kirjallisuudessa esitetty optisen hiukkaslaskurin yleinen rakenne vastaa tyypillisesti ammatti- ja tutkimustason OPC-laitteita, joissa hajavalon hallinta on toteutettu erillisellä valoloukulla. Mobiileissa ja edullisissa optisissa hiukkasantureissa, kuten Sensirionin PM-antureissa, vastaava toiminnallisuus on usein integroitu osaksi mittauskammion rakennetta ja optista geometriaa, eikä erillistä light trap -komponenttia ole nähtävissä. Tästä huolimatta mittausperiaate perustuu samaan yksittäisten hiukkasten valonsirontaan. Kuvassa 1.2 on havainnollistettu Sensirionin PM-anturin mittausperiaate Sensirionin verkkosivuilta [21].

Optisilla hiukkasantureilla on sekä etuja että rajoituksia. Niiden keskeinen etu on laaja käyttöalue, joka kattaa matalat hiukkaspitoisuudet aina korkeapitoisiin aerosoleihin saakka. Lisäksi tekniikka on laajasti käytössä ja hyvin tunnettu, mikä tukee sen luotettavuutta ja vakiintunutta asemaa ilmanlaadun mittauksessa. Menetel-



Kuva 1.1: Optinen valonsirontaan perustuvan anturin yleinen toimintaperiaate



Kuva 1.2: Sensirion PM-antureiden mittausperiaate

män haittapuolena on suorituskyvyn heikkeneminen suurilla lukumääräpitoisuuksilla. Tämä johtuu hiukkasten samanaikaisesta esiintymisestä mittausalueella, jolloin yksittäisiä hiukkasia ei voida aina erottaa toisistaan. [15]

Valon sirontaan perustuva massapitoisuuden arviointi sisältää menetelmällisiä rajoitteita. Mittaustuloksiin vaikuttavat erityisesti hiukkaskokojakauman vaihtelu, suhteellisen kosteuden aiheuttama hiukkasten hygroskooppinen kasvu, aerosolien optisten ominaisuuksien muutokset sekä hiukkastiheyteen liittyvät oletukset. Koska nämä tekijät kytkeytyvät usein toisiinsa, mittaustulosten tulkinta voi olla monimutkaista. Näiden yhteisvaikutusten ymmärtämiseksi on kehitetty fysikaaliseen mallinnukseen perustuvia lähestymistapoja, joissa anturin vaste johdetaan valon sironnan teoriasta (Mien teoria). Tällainen mallinnus tukee mittauserävarmuuksien arviointia, kalibrointistrategioiden suunnittelua sekä optisten hiukkasantureiden suorituskyvyn tarkastelua erilaisissa olosuhteissa. [9]

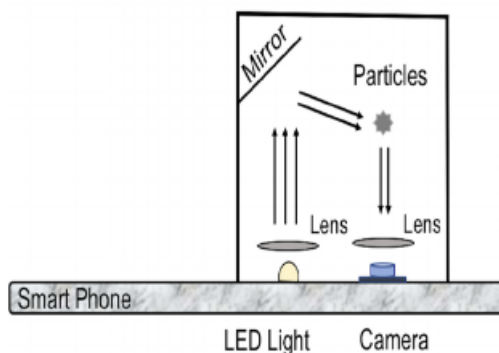
1.2.2 Kamerapohjaiset optiset hiukkasanturit (image-based sensing)

Kamerapohjaisten optisten hiukkasantureiden toiminta perustuu 2D-matriisianturin (kameran) ottamien kuvien analysointiin kuvankäsittelymenetelmien avulla. Anturin sisäänantulokammiossa taustavalaistus valaisee ilmassa olevat hiukkaset, minkä jälkeen kamera tallentaa niistä kuvasarjan. Kuvista analysoidaan hiukkasten aiheuttamat valonsirontajäljet, joiden perusteella voidaan arvioida hiukkasten lukumäärää ja ominaisuuksia, kuten niiden suhteellista kokoa. [15]

2D-kamera-anturin käytön ansiosta useiden hiukkasten samanaikainen esiintyminen mittausalueella ei aiheuta merkittävää ongelmaa edes suurilla pitoisuuksilla. Toisin kuin yksipikselisiin fotodetektoreihin perustuvissa antureissa, kamerapohjainen ratkaisu kykenee erottamaan yksittäiset hiukkaset toisistaan kuvatasolla. Näin anturi voi kerätä tietoa useista hiukkasista samanaikaisesti ja välttää summasignaalin aiheuttamat epävarmuudet mittauksessa [15].

Kuvassa 1.3 on havainnollistettu kamerapohjaisen optisen hiukkasanturin yleinen toimintaperiaate, jossa hyödynnetään älypuhelimien kameraa mittauseräjärjestelmän detektorina [15].

Kamerapohjaiset optiset hiukkasanturit ovat toistaiseksi pääosin tutkimus- ja prototyyppiasteella, eikä niitä ole vielä laajasti saatavilla kaupallisina mittalaitteina. Tästä syystä tässä raportissa keskitytään antureihin, jotka perustuvat perinteiseen optiseen valonsirontaan hiukkasmittauksessa.



Kuva 1.3: Kamerapohjaisen anturin yleinen toimintaperiaate

1.3 Kosteuden vaikutus mittausten luotettavuuteen

Hiukkasia mittaavat sensorit ovat edullinen vaihtoehto pölymäärän seurantaan, mutta niiden käytössä on huomioitava, että niissä ei ole lämmitystä tai kuivausta, joka poistaisi kosteuden mitattavasta ilmasta. Ilman kosteus voi saada hiukkaset kasvamaan tai muodostaa pieniä vesipisaroita, jolloin sensori tulkitsee ne lisähiukkasiksi. Tämän vuoksi sensori voi näyttää todellista suurempia hiukkasmääriä ja -pitoisuuksia. Tästä johtuen pölypitoisuuksia mitattaessa tulee seurata myös ilmankosteutta, sillä kosteuden ylittäessä määritellyt raja-arvot mittaustulosten luotettavuus heikkenee merkittävästi. Tutkimuksissa on havaittu merkittäviä lisäyksiä hiukkasten lukumäärä- ja massapitoisuuksissa, kun suhteellinen ilmankosteus ylittää noin 75 %. [13]

Ammattimaiset pölynmittauslaitteet on yleensä suunniteltu hallitsemaan kosteuden vaikutus mittauksiin, ja ne sisältävät usein lämmitys-, kuivaus- tai ilmankäsittelyjärjestelmän, joka poistaa ylimääräisen kosteuden mitattavasta ilmasta ennen varsinaista mittausta. Tällöin hiukkasten hygroskooppinen kasvu ja vesipisaroiden muodostuminen estyvät, eikä kosteus vääristä mittaustuloksia. Mittareissa voidaan lisäksi käyttää kosteuden vaikutusta huomioivia korjausmenetelmiä tai mittausalgoritmeja tai ne on kalibroitu toimimaan tietynlaisissa olosuhteissa.

1.3.1 Kosteuden aiheuttamat muutokset pölyhiukkaseen

Pölyksi määritellään kaikki kiinteät hiukkaset, jotka voivat leijua ilmassa. Pölyhiukkasen halkaisija on tyypillisesti 1 - 100 mikrometriä tai pienempi. Pöly voi olla epäorgaanista tai orgaanista tai sisältää sekä epäorgaanisia että orgaanisia aineksia. Pö-

lyn ja ilman seosta sanotaan aerosoliksi. [27]

Aerosoli tarkoittaa ilmakehässä leijuvien pienten kiinteiden tai nestemäisten hiukkasten ja niitä ympäröivän kaasun muodostamaa kokonaisuutta. Aerosolit koostuvat aerosolihiukkasista, joiden koko vaihtelee muutamista kymmenistä nanometreistä useisiin kymmeneen mikrometreihin. Aerosolit voivat olla peräisin epäorgaanisista, orgaanisista tai biologisista lähteistä. [16]

Aerosolihiukkasen hygroskooppisuutta, eli sen kykyä sitoa vettä ilmakehästä, kuvataan hygroskooppisuusparametrillä κ . Mitä suurempi κ -arvo, sitä helpommin hiukkanen sitoo vettä ympäröivästä ilmasta. Kun hiukkanen sitoo vettä, sen koko kasvaa suhteellisen kosteuden kasvaessa. Riittävän voimakkaan vedenoton seurauksena hiukkanen voi aktivoitua pilvikondensaation ytimenä, jolloin siitä muodostuu pilvipisara. [18]

Epäorgaanisilla suoloista koostuvilla aerosolihiukkasilla κ -arvot ovat tyypillisesti 0,5–1,4, kun taas orgaanisista yhdisteistä ja niiden seoksista koostuvilla aerosolihiukkasilla κ -arvo on vastaavasti välillä 0,01–0,5. Ilmakehän aerosoleilla tyypillinen κ -arvo on välillä 0,1–0,9. [18] Petters ja Kreidenweis [18] osoittivat, että aerosolihiukkasen hygroskooppinen kasvukerroin (GF), joka kuvaa hiukkasen halkaisijan kasvua kosteuden vaikutuksesta, voidaan yhdistää hygroskooppisuusparametriin κ .

Kasvukerroin (GF) määritellään kaavalla 1.1. Se ilmaisee kostean hiukkasen halkaisijan suhteen kuivan hiukkasen halkaisijaan. [14]

$$GF(RH) = \frac{D_{wet}(RH)}{D_{dry}} \quad (1.1)$$

missä D_{wet} on kostean hiukkasen keskihalkaisija ja D_{dry} kuivan hiukkasen keskihalkaisija.

Koehler ym. [14] osoittivat, että jo hiukkasen pieni kasvu voi vääristää hiukkasantureiden tuottamaa tietoa hiukkaskoosta ja sitä kautta johdetun massan arvoa. Optiset PM-anturit kalibroidaan usein oletuksena, että hiukkanen on pallomainen, kuiva, sen tiheys vakio sekä omaa vakiona pysyvän taitekertoimen. Kosteat olosuhteet voivat muuttaa näitä oletuksia, ja voi näin ollen johtaa hiukkaskoon, lukumäärän ja massapitoisuuksien systemaattiseen yliarviointiin erityisesti PM_1 , $PM_{2,5}$, PM_{10} -massapitoisuuksilla suhteessa kuivaan referenssiin. [14]

Kosteus muuttaa hiukkasen näennäistä kokoa sekä sen optisia ja sähköisiä ominaisuuksia jo ennen pilvipisaran muodostusta. Mineraalipölyn kasvukerroin on usein pieni, ja korkeissa ilmakehätasoisissa osa komponenteista aktivoituu tavalla, jo-

ta kasvukerroin yksin ei paljasta, mutta joka voimistaa optisia signaaleja ja muuttaa kokoluokittelua. Tästä seuraa systemaattinen taipumus yliarvioida PM-pitoisuuksia kosteissa olosuhteissa, ellei mittausjärjestelmässä huomioida hygroskooppisuutta ($\kappa \sim 0,01-0,08$) ja kasvukertoimen riippuvuutta suhteellisesta kosteudesta. [14]

Edellä esitettyjen tekijöiden vuoksi kosteuden vaikutus hiukkasten kokoon ja optisiin ominaisuuksiin on keskeinen epävarmuustekijä erityisesti edullisissa hiukkasantureissa, ja se on huomioitava mittaustulosten tulkinnassa sekä eri anturimallien vertailussa.

2 Kaupalliset liikuteltavat pölyä mittaavat laitteet

Nykyään on tarjolla useita valmiita hiukkaspitoisuuksien mittausratkaisuja, jotka eroavat toisistaan muun muassa tarkkuuden, vasteajan ja liitäntöjen osalta. Seuraavissa kohdissa perehdytään tarkemmin näihin mittalaitteisiin ja niiden keskeisiin ominaisuuksiin.

2.1 SidePak AM520 Personal Aerosol Monitor

SidePak AM520 Personal Aerosol Monitor on pieni, kannettava ja akkukäyttöinen laserpohjainen optiseen hajontaan perustuva aerosolimitari. SidePak on suhteellinen optinen mittalaite eli sen mittaustarkkuus riippuu aerosolityypistä ja käytetystä kalibrointikertoimesta. Valmistaja ei määrittele yleistä suhteellista tarkkuutta. [25]

Laite soveltuu reaaliaikaiseen pöly- ja hiukkasmittaukseen. Se mittaa aerosolien massakonsentraatiota sekä vastekonsentraatiota, ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi hengittyvän pölyn, hengittyvän kvartsin (silika) ja dieselhiukkasten (DPM) seurantaan. Laitteessa on OLED –näyttö, joka näyttää massapitoisuuden ja vastepitoisuuden reaaliaikaisesti. Lisäksi laitteessa on erilaisia hälytysmekanismeja. Valmistajan mukaan laite soveltuu yleisesti teollisuuden käyttöön. [25]

Kuvassa 2.1 esitetään SidePak AM520 Personal Aerosol Monitor valmistajan sivuilta [25].



Kuva 2.1: SidePak AM520 Personal Aerosol Monitor

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [24] ja verkkosivuilta [25] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: DPM, PM1.0, PM2.5, PM4, PM5 ja PM10

Liitäntä: Mittausarvot siirretään USB –portin kautta

Sertifikaatti: IECEX, ATEX, CSA, IECEX SIM-19.0009X

Käyttölämpötila: 0 ° C ... + 50 ° C

Säilytyslämpötila: –20 ° C +60 ° C

Akun kesto: yli 20 h

massa: 0,62 kg

Mittausjakso: Käyttäjän määrittämä, 1 – 60 s

Koko: 129,5 × 94 × 78,4 mm

Hinta: Ei ilmoitettu

2.2 Trolex XD1+

Trolex XD1+ on vaatteisiin kiinnitettävä, reaaliaikainen henkilökohtainen pölymittari, joka on suunniteltu pölylle altistumisen seurantaan erityisesti hengittyvien hiukasten osalta. Laite on kevyt ja tarkoitettu jatkuvaan käyttöön työympäristöissä. Laitteen toiminta perustuu laserpohjaiseen valonsirontamittaukseen. Ilma virtaa vapaasti laitteen läpi, eikä laitteessa siten ole erillistä puhallinta. Mittaustuloksia voidaan seurata sekä tietokoneelle asennettavan ohjelmiston että mobiilisovelluksen avulla. Laiteella on useita kiinnitysmahdollisuuksia, mikä mahdollistaa joustavan käytön erilaisissa työtilanteissa. IP66-luokituksen ansiosta laite soveltuu vaativiin ympäristöolosuhteisiin. Lisäksi laitteessa on useita säädettäviä hälytysrajoja, jotka tukevat käyttäjän turvallisuutta ja mahdollistavat nopean reagoinnin kohonneisiin pölypitoisuuksiin. [3]

Kuvassa 2.2 esitetään Trolex XD1+ laite valmistajan sivuilta [3].

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [4] ja verkkosivuilta [3] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: PM1, PM2.5, PM4.25, PM10 ja TSP

Liitäntä: USB, bluetooth LE

Sertifikaatti: CE ja UKCA



Kuva 2.2: Trolex XD1+ pölymittari

Käyttölämpötila: $-10^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$

Säilytyslämpötila: $-20^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$

Akun kesto: 16 h

massa: 0,170 kg

Mittausjakso: Mukautettavissa 1 s välein

Koko: $112 \times 64 \times 25$ mm

Hinta: 1744,45 €

2.3 Aeroqual Ranger PMX

Aeroqual Ranger on kädessä pidettävä ilmanlaadun seurantalaitte, joka on suunniteltu tuottamaan reaaliaikaisia mittauksia useista ilman epäpuhtauksista. Se pystyy mittaamaan erilaisia pöly- sekä kaasuarvoja. [1]

Laitteeseen voidaan vaihtaa erilaisia anturipäitä mitattavan epäpuhtauden mukaan. Näin ollen samalla laitteella voidaan kerätä tietoa useista yleisistä epäpuhtauksista. Laitteessa on pieni tuuletin, joka imee ilmaa suoraan anturille. Pölymittauksessa laitteen toiminta perustuu laserpohjaiseen valonsirontamittaukseen. Kaasumittauksissa mittaus tapahtuu elektrokemiallisilla kennoilla. Mittaustulosten tarkastelua voidaan tehdä laitteessa reaaliaikaisesti ja siirtää mittausarvot langattomalla tiedonsiirrolla tai kaapeliyhteydellä. Laitteessa on IP20 –luokitus. [1]

Kuvassa 2.3 esitetään Aeroqual Ranger –laite valmistajan sivuilta [1].



Kuva 2.3: Aeroqual Ranger PMX

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [2] ja verkkosivuilta [3] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: PM1, PM2.5, PM4, PM10, TSP

Liitäntä: USB-C, Wifi

Sertifikaatti: IEC/EN 61326-1, EN 55011:2010, FCC Part 15, IEC 61010-1:2010+A1:2016

Käyttölämpötila: 0 °C ... + 40 °C

Säilytyslämpötila: Ei ilmoitettu

Akun kesto: 20 h

massa: 0,430 kg

Mittausjakso: 1 s

Koko: 170 × 83 × 37 mm

Hinta: 3493,55 €

2.4 Atmotube PRO 2

Atmotube Pro 2 on kannettava ilmanlaadun mittauslaite. Se on suunniteltu yksittäisen käyttäjän liikkuvaan ilmanlaadun seurantaan sisä- ja ulkotiloissa. Laite kiinnitetään vaatteeseen, kuten vyöhön. Laitteen toiminta perustuu laserpohjaiseen valonsirontamittaukseen ja MEMS-pohjaisiin kaasuantureihin, jotka on integroitu pienen kannettavaan laitteeseen. Laite mittaa hengitettäviä hiukkasia (PM1, PM2.5 ja

PM10), hiilidioksidia (CO), haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (TVOC), NO_x-indeksiä sekä ympäristöparametreja, kuten lämpötilaa, suhteellista kosteutta ja ilmanpainetta. Mittausdata kerätään laitteen sisäisillä antureilla ja siirretään mobiilisovellukseen, jossa tuloksia voidaan tarkastella reaaliaikaisesti ja sijaintiin sidottuna. [5]

Laitteeseen on integroitu useita erilaisia Sensirion-valmistajan ja muiden valmistajan kaupallisia antureita. Kuvassa 2.4 esitetään Atmotube PRO 2-laitte valmistajan sivuilta [5].



Kuva 2.4: Atmotube PRO 2

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [6] ja verkkosivuilta [5] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: PM1, PM2.5, PM10, CO₂, TVOC, NO_x, Lämpötila, suhteellinen kosteus ja ilmanpaine

Liitäntä: Bluetooth, USB-C

Sertifikaatti: CE, MCERTS

Käyttölämpötila: 0 °C ... + 50 °C

Säilytyslämpötila: Ei ilmoitettu

Akun kesto: 10 päivää

massa: 0,106 kg

Mittausjakso: 1 s

Koko: 86 × 50 × 22 mm

Hinta: 219,0 €

2.5 Laitevertailu

Seuraavaksi vertaillaan raporttiin valittua neljää pölynmittauslaitetta (SidePak AM520, Trolex XD1+, Aeroqual Ranger PMX ja Atmotube PRO 2) niiden keskeisten teknisten ominaisuuksien perusteella. Tarkastelun kohteena ovat keskeisimmät tekniset ominaisuudet, kuten mittausalue, käyttölämpötila, akun kesto ja liitäntä. Kaikki tarkasteltavat anturit perustuvat laserpohjaiseen valonsirontatekniikkaan. Taulukossa 2.1 olevat tiedot on koottu laitteiden verkkosivuilta ja datasheet-tiedoista [5] [6] [1] [2] [3] [4] [25] [24].

Taulukko 2.1: Vertailu laitteiden ominaisuuksista

Ominaisuus	Atmotube PRO 2	Aeroqual Ranger PMX	SidePak AM520/i	Trolex XD1+
Mittaus-alue	PM1,PM2.5, PM10	PM1,PM2.5, PM4,PM10, TSP	PM1,PM2.5, PM4,PM5, PM10,DPM	PM1,PM2.5, PM4.25,PM10, TSP
Akun kesto	10 d	20 h	> 20h	16 h
IP-luokitus	Ei ilmoitettu	IP20	Ei ilmoitettu	IP66
Massa (g)	106	430	620	170
Käyttölämpötila (°C)	0 ... +50	0 ... +40	0 ... +50	-10 ... +40
Hinta (€)	219,0	3493,55	Ei ilmoitettu	1744,45
Liitäntä	USB-C, Bluethooth	USB-C, Wifi	USB	USB, Bluetooth LE

2.5.1 Mittausalue ja käyttölämpötila

Kaikki vertailussa olevat laitteet mittaavat pienhiukkasia (PM), mutta mittausalueissa on hieman eroja. Atmotube PRO 2 mittaa PM1-, PM2.5- ja PM10-hiukkasia, kun taas Aeroqual Ranger PMX ja Trolex XD1+ mittausalueeseen kuuluu myös PM4-luokan sekä kokonaisleijuman (TSP). SidePak AM520/i mittaa PM-hiukkaseten li-

säksi myös dieselhiukkasia (DPM).

Käyttölämpötila-alue on useimmilla laitteilla 0 ... +40/50 °C. Trolex XD1+ soveltuu myös kylmempiin olosuhteisiin, sitä voidaan käyttää jopa -10 asteessa.

TSP (total suspended particular)-arvo sisältää kaiken kokoiset ilmassa leijuvat hiukkaset. Se sisältää sekä hienot, että karkeat hiukkaset. TSP antaa yleiskuvan pölyn kokonaismäärästä ilmassa, mutta ei erottele hiukkasia koon perusteella. TSP soveltuu erityisesti kokonaispölykuorman ja ympäristöhaittojen arviointiin. [7]

DPM (Diesel particulate Matter) on dieselmottoreiden pakokaasusta syntyvää erittäin hienojakoista ainetta. [28]

2.5.2 Akun kesto ja massa

Akun kesto vaihtelee laitteiden välillä 16 tunnista jopa 10 päivään. Trolex XD+ akun kesto oli heikoin (16 h) ja Atmotube PRO 2:n akun kesto on paras (10 d). Laitteiden massoissa on merkittäviä eroja. Atmotube PRO 2 ja Trolex XD1+ on suunniteltu vaatteisiin kiinnitettäväksi, minkä vuoksi ne ovat kevytrakenteisia. SidePak AM520/i on selvästi raskaampi, mikä viittaa sen soveltuvuuteen kiinteämpään käyttöön. Aeroqual Ranger PMX on tarkoitettu kädessä pidettäväksi seurantalaitteeksi, ja sen massa on suurempi verrattuna kevyimpiin vertailtaviin laitteisiin.

2.5.3 Hinta

Laitteiden hintataso vaihtelee huomattavasti. Atmotube PRO 2 on selvästi edullisin vaihtoehto (219,0 €), kun taas Aeroqual Ranger PMX on kallein (3493,55 €). Trolex XD1+ sijoittuu hinnaltaan näiden väliin (1744,45 €). SidePak AM520/i:n hintaa ei ollut saatavilla raportin tekohetkellä.

2.5.4 Liitännät ja mittausarvojen lukeminen

Kaikissa vertailtavissa laitteissa on mahdollisuus tiedonsiirtoon, mutta liitännät eroavat toisistaan. Atmotube PRO 2 ja Trolex XD1+ tukevat Bluetooth-yhteyttä, mikä mahdollistaa mittausarvojen langattoman siirtämisen. Aeroqual Ranger PMX mitaustiedot voidaan siirtää USB-C- tai WiFi-yhteydellä, kun taas SidePak AM520/i käyttää USB-liitäntää.

3 Mobiiliin käyttöön soveltuvat PM-anturit

Vertailuun valittiin suomalaisista verkkokaupoista saatavilla olevia antureita, jotka soveltuvat liikkuvaan mittaukseen ja kestävät hyvin vaihtelevia sääolosuhteita. PM10-hiukkasia mittaavat anturit ovat projektissa erityisen kiinnostavia, sillä teollisuusalueilla ne tarjoavat olennaista tietoa ilmanlaadusta. Pienempiä hiukkasia esiintyy teollisuusalueilla käytännössä aina, vaikka niiden pitoisuudet vaihtelevat ajan ja toiminnan mukaan. Pienhiukkasanturien toimintaperiaate voi vaihdella valmistajasta ja mallista riippuen, mutta yleisesti niiden toiminta perustuu hiukkasten havaitsemiseen ja laskemiseen.

Liikkeessä tapahtuva mittaaminen asettaa anturijärjestelmille erityisiä vaatimuksia ja mittaustuloksiin voivat vaikuttaa muun muassa muuttuva ilmavirtaus, laitteen liike, tiedonsiirron luotettavuus sekä mittausdatan paikannuksen tarkkuus. Näiden tekijöiden huomioiminen on olennaista, jotta kerätty data olisi luotettavaa ja vertailukelpoista. Liikkuvassa mittauksessa on tärkeää huomioida, että vaikka monissa tutkimusprojekteissa käytetään edullisia hiukkasantureita, niiden mittaustarkkuutta parannetaan kalibroimalla anturi referenssiasemaa vasten, käyttämällä useita antureita rinnakkain sekä analysoimalla kerättyä dataa tilastollisin menetelmin.

3.1 Sensirion SPS30

Sensirion SPS30 anturin mittauseriaate perustuu lasersirontaan. Anturi on suunniteltu erityisesti ilmanlaadun seuranta- ja säätöjärjestelmiin, kuten ilmanpuhdistimiin, ilmanvaihtoon ja IoT-laitteisiin. Anturi ei sisällä lämpötila- tai kosteusanturia. [21] Kuvassa 3.1 esitetään Sensirion SPS30-anturi valmistajan sivuilta [21].



Kuva 3.1: Sensirion SPS30

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [23] ja verkkosivuilta [21] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: PM1.0, PM2.5, PM4, PM10

Liitäntä: I²C, UART

Tarkkuus: PM2.5: $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10: $\pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Käyttöikä: > 10 vuotta jatkuvassa käytössä

Käyttölämpötila: $-10^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$

Säilytyslämpötila: $-40^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$

Virran kulutus: 38 μA (sleep mode), 330 μA (idle mode) ja 55 mA (mittaus)

Käyttöjännite: 4,5 – 5,5 V

Mittausjakso: $1 \pm 0,04$ s

Koko: 41 × 41 × 12 mm

3.2 Sensirion SEN54 / SEN55

Sensirion SEN55 sekä SEN54 perustuvat myös lasersirontaan. Valmistajan sivuilla kerrotaan, että anturilla voidaan mitata PM - hiukkasten lisäksi myös VOC-indeksi, suhteellisen kosteus ja lämpötila. Lisäksi SEN55-anturilla voidaan mitata myös NO_x-arvo. [21]

Kuvassa 3.2 esitetään Sensirion SEN54-anturi valmistajan sivuilta [21].



Kuva 3.2: Sensirion SEN54

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [22] ja verkkosivuilta [21] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: PM1.0, PM2.5, PM4, PM10, RH/T, VOC (SEN54 ja SEN55)
ja NO_x (SEN55)

Liitäntä: I²C

Tarkkuus: PM2.5: $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10: $\pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Käyttöikä: > 10 vuotta jatkuvassa käytössä

Käyttölämpötila: $-10^\circ\text{C} \dots +50^\circ\text{C}$

Säilytyslämpötila: $-40^\circ\text{C} \dots +70^\circ\text{C}$

Virran kulutus SEN55: $3,8 \mu\text{A}$ (idle mode) ja 63 mA (mittaus)

Virran kulutus SEN54: $0,7 \mu\text{A}$ (idle mode) ja 70 mA (mittaus)

Käyttöjännite: 4,5 – 5,5 V

Mittausjakso: $1 \pm 0,03 \text{ s}$

Koko: $52,8 \times 43,6 \times 22,3 \text{ mm}$

3.3 Honeywell IH-PMC-002 / IH-PMC-001

Honeywell IPM – sarjan anturit käyttävät laserpohjaista valosirontaa, joka mittaa ilmassa kulkevien hiukkasten koon ja määrän tarkasti, ja niiden välillä keskeisin ero on ilmavirran ohjauksessa: IH-PMC-001 mallissa ilmanotto ja -poisto tapahtuvat samalta sivulta, kun taas IH-PMC-002-mallissa ilma virtaa anturin läpi vastakkaisien aukkojen kautta, mikä mahdollistaa tehokkaamman ja ohjatun ilmavirtauksen asennuksissa, joissa halutaan varmistaa tasainen partikkelien kulku laserin mittausalueen läpi. Anturissa on metallinen kotelo. [8] Kuvissa 3.3 ja 3.4 esitetään Honeywellin IH-PMC-001 ja IH-PMC-002-anturit valmistajan sivuilta [8].



Kuva 3.3: IH-PMC-001



Kuva 3.4: IH-PMC-002

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [12] ja verkkosivuilta [8] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: PM1.0, PM2.5, PM4, PM10

Liitäntä: I²C, UART, PWM

Tarkkuus: PM2.5: $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10: $\pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Käyttöikä: 8 vuotta jatkuvassa käytössä

Käyttölämpötila: $-20^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$

Säilytyslämpötila: $+10^\circ\text{C} \dots +30^\circ\text{C}$

Virran kulutus: 150 μA (sleep mode), 2,6 mA (idle mode) ja 50 mA (mittaus)

Käyttöjännite: 4,75 – 5,25 V

Mittausjakso: $1 \pm 0,03$ s

Koko: 45 × 32 × 11 mm (IH-PMC-002) ja 49 × 32 × 11 mm (IH-PMC-001)

3.4 Plantower PMS5003 Particulate Matter

Plantower PMS5003–hiukkasanturi tunnistaa erikokoisia hiukkasia, joita voi olla peräisin esimerkiksi savusta, pölystä, siitepölystä sekä metallisia ja orgaanisia hiukkasia. Anturi soveltuu hyvin ilmanlaadun seurantaan ja voidaan liittää erilaisiin kehitysalustoihin, kuten Raspberry Pi -ympäristöön, jolloin sen avulla on mahdollista rakentaa oma ilmanlaadun mittausasema. Anturin toiminta perustuu pieneen tuulettimeen, joka ohjaa ilman anturin läpi laserin ohi. Laser mittaa ilmassa olevien hiukkasten määrää ja kokoa, minkä perusteella voidaan arvioida hiukkaspitoisuutta ympäröivässä ilmassa. [20]



Kuva 3.5: PMS5003

Kuvassa 3.5 esitetään Plantower PMS5003–anturi valmistajan sivuilta [20].

Seuraavassa esitetään valmistajan datasheetistä [19] ja verkkosivuilta [20] poimitut keskeiset tekniset ominaisuudet.

Mittausalue: PM1.0, PM2.5, PM10

Liitäntä: UART

Tarkkuus: PM2.5: $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Käyttöikä: vähintään 3 vuotta jatkuvassa käytössä

Käyttölämpötila: $-10^\circ\text{C} \dots +60^\circ\text{C}$

Säilytyslämpötila: $-40^\circ\text{C} \dots +80^\circ\text{C}$

Virran kulutus: $200 \mu\text{A}$ (idle mode) ja 100mA (mittaus)

Käyttöjännite: 5V

Koko: $50 \times 38 \times 21 \text{mm}$

3.5 Anturien ominaisuudet ja valintakriteerit

Seuraavaksi vertaillaan raporttiin valittua neljää pölynmittausanturia (Sensirion SPS30, Plantower PMS5003, Sensirion SEN54 ja Honeywell IH-PMC002) niiden keskeisten teknisten ominaisuuksien perusteella. Tarkastelun kohteena ovat mm. tarkkuus, käyttölämpötila, virrankulutus ja liitettävyyys. Kaikki tarkasteltavat anturit perustuvat laserpohjaiseen valonsirontatekniikkaan, jota pidetään yleisesti luotettavana ja tarkkana menetelmänä ilman hiukkaspitoisuuksien mittaamiseen. Erot syntyvätkin

pääasiassa valmistajien toteutuksista, suorituskyvystä ja antureiden soveltuvuudesta erilaisiin käyttökohteisiin. Lopullinen valinta tulisi tehdä sen perusteella, painotetaanko järjestelmässä ensisijaisesti tarkkuutta, energiatehokkuutta, kustannuksia vai integraation helppoutta.

Antureiden tekniset tiedot, kuten mittausalueet, tarkkuudet ja virrankulutus, perustuvat valmistajien datasheet-tietoihin [21] [22] [23] [20] [19] [8] [12] ja tuotekuvauksiin. Hintatiedot on kerätty verkkokauppojen tuotesivuilta raportin kirjoitushetkellä. Taulukossa 3.1 on esitetty koontiantureiden ominaisuuksista.

Taulukko 3.1: Vertailu antureiden ominaisuuksista

Ominaisuus	Sensirion SPS30	Plantower PMS5003	Sensirion SEN54	Honeywell IH-PMC-002
Mittausalue	PM1,PM2.5, PM4,PM10	PM1,PM2.5, PM10,	PM1,PM2.5, PM4,PM10	PM1,PM2.5, PM4,PM10
Suhteellinen tarkkuus (PM10)	25 %	ei ilmoitettu	25 %	15 %
Käyttölämpötila (°C)	-10...+60	-10 ...+60	-10 ...+50	-20 ...+60
Hinta (€)	30	30	30	30
Vasteaika (s)	8–30	<10	<10	<6
Käyttöjännite (V)	4,5–5,5	4,5–5,5	4,5–5,5	4,75–5,25
Virrankulutus idle (mA)	0,33	0,2	0,7	2,6
Virrankulutus mittausta (mA)	55	100	63	50
liitettävyyden	I2C,UART	UART	I2C	I2C,UART, PWM

3.5.1 Mittaustekniikka

SEN54, SPS30, IH-PMC-002 ja PMS5003 perustuvat kaikki laserin ja valon sirontaan pohjautuvaan optiseen mittaustekniikkaan, jossa hiukkasten kulkiessa tunnelin läpi niiden sirontama valo havaitaan anturilla. Antureiden erot syntyvät lähinnä niiden rakenteesta, signaalinkäsittelystä sekä lisäominaisuuksista, kuten ympäristöolosuhteiden seurannasta tai vasteajan optimoinnista. Vaikka perusmittausperiaate on sama, toteutustapa vaikuttaa mittaustarkkuuteen, virrankulutukseen, reagointinopeuteen ja soveltuvuuteen eri käyttökohteisiin.

3.5.2 Mittausalue ja tarkkuus

Sensirion SPS30 ja SEN54 ja Honeywell pystyvät mittaamaan hiukkaspitoisuuksia PM1.0, PM2.5, PM4 ja PM10, kun taas Plantower PMS5003 mittaa vain PM1.0, PM2.5 ja PM10. Suhteellinen tarkkuus ilmoittaa kuinka paljon anturin mittaama arvo voi poiketa todellisesta arvosta prosenttiosuutena mitatusta lukemasta. Suhteellisen tarkkuuden osalta Honeywell IH-PMC-002 on PM10-mittauksessa tarkin (15 %) kun taas SPS30 ja SEN54 tarkkuus on 25 %. PMS5003:n PM2.5-mittaus on tarkka, noin 10 %, mutta PM10-tarkkuutta ei datasheetissä ole ilmoitettu, joten sen arviointi jää epävarmaksi. Näin ollen, jos tärkeintä on PM2.5-tarkkuus, PMS5003 on hyvä valinta. Mikäli tarvitaan laaja PM-mittaus PM1-PM10, erityisesti PM4:n osalta, SPS30 tai SEN54 sopivat paremmin. Seurattaessa PM10-hiukkasia Honeywellin anturi on tarkin vaihtoehto.

3.5.3 Käyttölämpötila

Kun mittalaitetta on tarkoitus käyttää Suomen sääolosuhteissa ympäri vuoden, käyttölämpötila on tärkeä valintakriteeri. Honeywell IH-PMC-002 toimii laajimmalla lämpötila-alueella, myös -20 asteessa, mikä tekee siitä hyvän vaihtoehdon kylmiin ympäristöihin. Muut anturit toimivat maksimissaan noin -10 asteeseen saakka, joten nekin soveltuvat käytettäväksi suurimman osan vuodesta Suomen vaihtelevissa sääolosuhteissa.

3.5.4 Virrankulutus ja vasteaika

Lepotilassa pienin virrankulutus on Sensirion SPS30 -anturilla (0,33 mA) ja lähes samaa tasoa on Plantower PMS5003 (0,2 mA). Sensirion SEN54 kuluttaa lepotilassa 0,7

mA, kun taas Honeywell IH-PMC-002 kuluttaa selvästi eniten (2,6 mA). Mittauksen aikana virrankulutus kasvaa kaikilla antureilla, koska anturin sisällä oleva tuuletin alkaa pyöriä, valo kytkeytyy päälle ja laite käsittelee mitattua dataa. Mitatessa eniten virtaa kuluttaa Plantower PMS5003 (100 mA), kun taas SPS30 (55 mA), SEN54 (63 mA) ja Honeywell IH-PMC-002 (50 mA) ovat virrankulutuksessa lähempänä toisiaan. Vasteajoissa Honeywell IH-PMC-002 on nopein (<6 s). Plantower PMS5003 ja SEN54 reagoivat myös nopeasti (<10 s), kun taas SPS30:n vasteaika on pidempi (8-30 s), mikä voi vaikuttaa sen soveltuvuuteen nopeaa reagointia vaativiin mittaustilanteisiin.

3.5.5 Liitettävyyys ja ohjelmistot

Sensirion SPS30 tukee sekä I2C- että UART-liitäntää, ja sen käyttöä helpottavat hyvin dokumentoidut kirjastot. Plantower PMS5003 käyttää UART-liitäntää, mikä on yksinkertainen mutta tehokas ratkaisu mikro-ohjaimen kanssa. SEN54 tukee I2C-liitäntää ja on yhteensopiva Arduino- ja Raspberry Pi -alustojen kanssa. Honeywell IPM tarjoaa laajimman liitäntävalikoiman, sillä se tukee I2C-, UART- ja PWM-liitäntöjä, mutta valmiita kirjastoja ei ole saatavilla, mikä voi tehdä käytöstä hieman työläämpää.

3.5.6 Kalibrointi

Kaikki vertailun anturit ovat tehdaskalibroituja, jonka lisäksi kolme niistä (Sensirion SPS30, SEN54 ja Honeywell IHPMC002) ovat itsekalibroituja, joten ne eivät vaadi käyttäjän tekemää erillistä kalibrointia mittausten tarkkuuden ylläpitämiseksi. Itsekalibroituviin antureiden sisäiset ohjelmistot ja algoritmit seuraavat laserin suorituskykyä, optiikan puhtautta ja ympäristöolosuhteita, ja korjaavat mittaustuloksia automaattisesti ajan myötä, mikä takaa tasaisen ja luotettavan datan pitkällä aikavälillä. Plantower PMS5003 ei sisällä jatkuvaa itsekalibrointia tai virheiden kompensointia, ja pitkäaikaisessa käytössä sen mittaustulokset voivat heikentyä ilman ulkoista kalibrointia tai vertailua luotettavaan referenssianturiin. Tämän vuoksi PMS5003 soveltuu parhaiten lyhytaikaisiin mittauksiin tai tilanteisiin, joissa tarkkuuden ylläpidosta voidaan huolehtia manuaalisesti.

3.6 Ilmankosteuden huomioiminen sensoridataa luettaessa

Kosteus voi vaikuttaa hiukkasmittauksiin, joten PM-arvot kannattaa korjata suhteellisen kosteuden (RH) perusteella esimerkiksi Köhler-kaavan tai lineaarisen mallin avulla. Tämä korjaus ei tuo takaisin yli 10 μm hiukkasia, mutta auttaa arvioimaan ilman todellista hiukkasmassaa tarkemmin. Mittaustulokset kannattaa aina raportoida yhdessä kosteusprosentin (RH) kanssa, jotta tulkinta on luotettava. Jos tarkkuus on erityisen kriittistä, kuten viranomaismittauksissa, kannattaa käyttää gravimetrisiä menetelmiä, eli suodattimen kautta kerättyä hiukkasmassaa punnitaan referenssimenetelmänä. [17]

Lähteet

- [1] AEROQUAL. Aeroqual. URL <https://www.aeroqual.com/products/ranger-handheld-air-quality-monitor>, viitattu 19.2.2026.
- [2] AEROQUAL. Aeroqual Ranger PMX datasheet. URL <https://aeroqual.imgix.net/assets/documents/Aeroqual-Ranger-Spec-Sheet-v7.pdf>, viitattu 21.2.2026.
- [3] ASTQ. Astq Supply house. URL <https://astq.fi/fi/tuote/mittarit-naytteenottopumput-ampullit/reaaliaikaiset-poly-ja-kuitumittarit/mittarit/TX8061.00.01/trolex-xd1-henkilokohtainen-polymittari>, viitattu 20.2.2026.
- [4] ASTQ. Trolex XD1+ datasheet. URL https://astq.fi/files/P5650.1601_C-TX8061-XD1-DS-EN%281%29.pdf, viitattu 21.2.2026.
- [5] ATMO. ATMO. URL <https://atmotube.com/atmotube-pro>, viitattu 19.2.2026.
- [6] ATMO. Atmotube PRO 2 datasheet. URL <https://support.atmotube.com/en/articles/10301124-atmotube-technical-specifications>, viitattu 21.2.2026.
- [7] ENVIROSUITE. Envirosuite. URL <https://envirosuite.com/insights/news/tsp-vs-pm25-vs-pm10-understanding-dust-metrics-that-matter-in-mining>, viitattu 10.3.2026.
- [8] FARNELL. Farnell. URL <https://fi.farnell.com/honeywell/ih-pmc-002/particle-sensor-air-i2c-uart-pwm/dp/4198290>, viitattu 17.2.2026.
- [9] HAGAN, D. H., JA KROLL, J. H. Assessing the accuracy of low-cost optical particle sensors using a physics-based approach. *Atmospheric Measurement Techniques* 13, 11 (2020), 6343–6355.
- [10] HELSINGIN SEUDUN YMPÄRISTÖPALVELUT -KUNTAYHTYMÄ. Ilmansaasteiden terveyshaitat. URL <https://www.hsy.fi/ilmanlaatu-ja-ilmasto/>

- ilmansuojelu-ja-terveys/ilmansaasteiden-terveyshaitat/, viitattu 25.1.2026.
- [11] HELSINGIN SEUDUN YMPÄRISTÖPALVELUT -KUNTAYHTYMÄ. Työmaapölyt heikentävät ilmanlaatua. URL <https://www.hsy.fi/ilmanlaatu-ja-ilmasto/katupoly-ja-ilmanlaatu/tyomaapolyt-heikentavat-ilmanlaatua/>, viitattu 25.1.2026.
- [12] HONEYWELL. Honeywell IH-PMC-002 datasheet. URL https://www.farnell.com/datasheets/3945622.pdf?_gl=1*y8bqof*_gcl_aw*R0NMLjE3NzA5Njk4MjguQ2p3S0NBaUF0THZNQmhCX0Vpd0ExdTZfUHF.*_gcl_au*MTc2MzQyNDc4Ny4xNzY0MjYxMTc0, viitattu 13.2.2026.
- [13] JAYARATNE, R., LIU, X., THAI, P., DUNBABIN, M., JA MORAWSKA, L. The influence of humidity on the performance of a low-cost air particle mass sensor and the effect of atmospheric fog. *Atmospheric Measurement Techniques* 11, 8 (2018), 4883–4890.
- [14] KOEHLER, K. A., KREIDENWEIS, S. M., DEMOTT, P. J., PETTERS, M. D., PRENNI, A. J., JA CARRICO, C. M. Hygroscopicity and cloud droplet activation of mineral dust aerosol.
- [15] MOLAIE, S., JA LINO, P. Review of the Newly Developed, Mobile Optical Sensors for Real-Time Measurement of the Atmospheric Particulate Matter Concentration. *Micromachines* 12, 4 (2021).
- [16] NASA EARTH SCIENCE. Aerosols and Their Importance. URL <https://earth.gsfc.nasa.gov/climate/data/deep-blue/aerosols>, viitattu 14.2.2026.
- [17] PATEL, M. Y., VANNUCCI, P. F., KIM, J., BERELSON, W. M., JA COHEN, R. C. Towards a hygroscopic growth calibration for low-cost PM_{2.5} sensors. *Atmospheric Measurement Techniques* 17, 3 (2024), 1051–1060.
- [18] PETTERS, M. D., JA KREIDENWEIS, S. M. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 8 (2007), 1961–1971.
- [19] PLANTOWER. Plantower PMS5003 datasheet. URL <https://www.scribd.com/document/365912000/Datasheet-Sensor-PMS5003>, viitattu 13.2.2026.

- [20] PLANTOWER. Plantower Technology. URL <https://www.plantower.com/en/>, viitattu 18.2.2026.
- [21] SENSIRION. Sensirion. URL <https://sensirion.com/products/catalog/SPS30>, viitattu 17.2.2026.
- [22] SENSIRION. Sensirion SEN54 datasheet. URL https://sensirion.com/media/documents/6791EFA0/62A1F68F/Sensirion_Datasheet_Environmental_Node_SEN5x.pdf, viitattu 13.2.2026.
- [23] SENSIRION. Sensirion SPS30 datasheet. URL <https://4donline.ihs.com/images/VipMasterIC/IC/SERI/SERI-S-A0010891602/SERI-S-A0010891602-1.pdf?hkey=6D3A4C79FDBF58556ACFDE234799DDF0>, viitattu 13.2.2026.
- [24] SIDEPAK. Sidepak AM520/i datasheet. URL https://tsi.com/getmedia/019986c6-dbbd-431b-a75c-04eb76d5b261/SidePak_AM520-AM520i_A4_5001738_RevD_Web.pdf?ext=.pdf, viitattu 21.2.2026.
- [25] SIDEPAK. SidePak AM520 Personal Aerosol Monitor. URL <https://tsi.com/products/aerosol-and-dust-monitors/aerosol-and-dust-monitors/sidepak-am520-personal-aerosol-monitor>, viitattu 19.2.2026.
- [26] SUZHOU SUJING AUTOMATION INSTRUMENT EQUIPMENT CO., LTD. the working principle of particle counters: How lasers see dust in the air. URL <https://www.sj-auto.com/news/the-working-principle-of-particle-counters-how-lasers-see-dust-in-the-air-239509.html>, viitattu 27.1.2026.
- [27] TEPA- TERMIPANKKI. Pöly. URL <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/p%C3%B6ly>, viitattu 14.2.2026.
- [28] U.S. DEPARTMENT OF LABOR. Diesel Exhaust. URL <https://www.osha.gov/diesel-exhaust>, viitattu 10.3.2026.