

4

SÄTEILYN KÄYTTÖ TEOLLISUUDESSA JA TUTKIMUKSESSA

Seppo Väisälä, Helinä Korpela,
Mauri Kaituri

SISÄLLYSLUETTELO

4.1	Röntgen- ja gammaradiografia	256
4.2	Ajoneuvojen ja matkalaukkujen tarkastuslaitteet	259
4.3	Säteilysterilointi	261
4.4	Radiometriset laitteet	263
4.5	Röntgenanalysaattorit	279
4.6	Kiihdyttimet	280
4.7	Avolähteiden käyttö	283
4.8	Radioaktiivisten aineiden vapaarajat	284
4.9	Radionuklidien vaarallisuusluokitus	285
4.10	Vaatimukset radionuklidilaboratorioille	286
4.11	Pintakontaminaatorajat	288
4.12	Johdetut annosrajat	289
4.13	Turvallinen työskentely avolähteillä	291
4.14	Radioaktiiviset jätteet ja niiden käsittely	291

4.1 | Röntgen- ja gammaradiografia

Metallirakenteiden valmistuksen ja käytön aikana on usein välttämättömää tarkastaa materiaalin ja hitsausliitosten laatua paineastioissa, laivoissa, siltarakenteissa, lentokoneissa ja niin edelleen. Tällöin pyritään löytämään erilaiset hitsausvirheet, huokokset tai halkeamat, jotka voivat huonontaa tuotteen lujuutta.

Radiografinen tarkastus on tärkeimpiä aineita rikkomattomia laadunvalvontamenetelmiä. Näistä käytetään yleisesti lyhennettä NDT, Non Destructive Testing. Muita NDT menetelmiä ovat esimerkiksi ultraäänitarkastus sekä magneettijauhe- ja tunkeumanestetarkastus.

Teollisuuden radiografiassa säteilylähteenä käytetään joko röntgenlaitetta tai pieneen kapseliin pakattua radioaktiivista ainetta. Tavalliset säteilylähteet ovat ^{60}Co ja ^{192}Ir sekä aiemmin käytetty radium. Säteily läpäisee tutkittavan kohteen ja valottaa kohteen taakse asetetun röntgenfilmin. Valotetussa ja kehitetyssä filmissä nähdään tummenemia vikojen kohdalla.

Radiografian kehitys

Säteilyn käytöllä radiografiassa on jo yli sadan vuoden kehitys takanaan, sillä jo vuonna 1896 W.C. Röntgen valmisti pyssyn piipusta kuvan, joka paljasti syöpymiä metallissa. Vasta paljon myöhemmin otettiin teollisuusradiografiassa käyttöön radiumlähteitä. Ensimmäiset radiumlähteiden avulla saadut kuvat otettiin Yhdysvalloissa vuonna 1929. Laivasto halusi tarkastaa paksuja valukappaleita, mutta käytössä olleilla röntgenlaitteilla voitiin ottaa kuvia vain alle kahdeksan senttimetrin paksuisista kappaleista, kun taas radiumia käyttäen oli mahdollista kuvata 25–30 senttimetriä paksuja kappaleita. Silloisten radiumlähteiden aktiivisuus oli yleensä vain muutama gigabecquerel. Sen vuoksi valotusajat olivat pitkiä: useita tunteja – jopa vuorokausia.

Toisen maailmansodan aikana ja sen jälkeen radiografia kehittyi voimakkaasti lähinnä laivanrakennusteollisuuden tarpeisiin. Ydinreaktoreissa tuotetut keinotekoiset säteilylähteet, kuten koboltti-60 ja iridium-192, otettiin käyttöön vuonna 1946 ja ne syrjäyttivät pian radiumin.

Radiografialaitteet

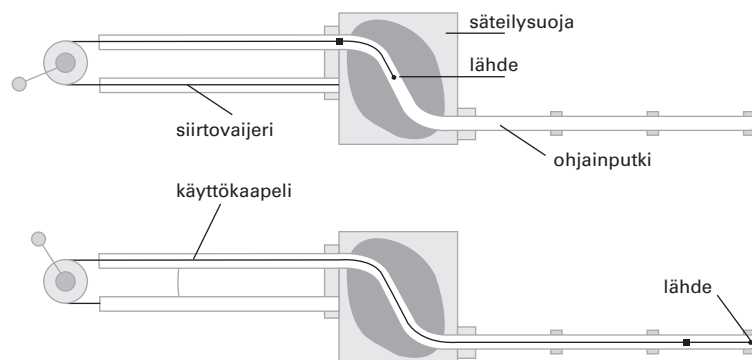
Radiografialaitteet ovat nykyään pääasiassa röntgenlaitteita, lineaarikiihdyttimiä tai gammakuvauslaitteita.

Laite	Käyttöjännite, radionuklidi tai fotonin maksimienergia	Kuvattavan aineen paksuus (mm Fe)
Röntgenlaite	150 kV	0–15
	200 kV	10–30
	300 kV	25–45
Gammakuvauslaite	^{192}Ir	20–100
	^{60}Co	50–175
Lineaarikiihdytin	2 MeV	50–175
	8 MeV	100–400

TAULUKKO 4.1 Teollisuuden radiografialaitteiden ominaisuuksia

Iridium-192 ja koboltti-60 ovat yleisimmät gammalähteet. Kuvauslaitteen valintaan vaikuttavat eniten kuvattavan aineen alkuainekoostumus ja paksuus, jotka määräävät tarvittavan läpäisykyvyn. Kuvattavan kohteen hankala sijainti voi myös aiheuttaa rajoituksia joidenkin laitteiden käytölle.

Röntgenlaitteiden käyttöä puoltaa niiden tehokkuus ja hyvä kuvanlaatu, koska säteilyn energiaa voidaan säätää. Haittapuolena on kalleus ja varsinkin suurten röntgenlaitteiden hankala liikuteltavuus.



KUVA 4.1 Gammakuvauslaitteen toimintaperiaate

Gammakuvauslaitteet ovat hinnaltaan edullisia ja helposti liikuteltavia. Niillä saatava kuvanlaatu on kuitenkin useimmiten huonompi kuin röntgenkuvien. Lisäksi gammalähteiden säteilysuojaus on hankalaa, koska säteilyn tuotto on jatkuvaa. Gammakuvauksessa onnettomuusriski on selvästi suurempi kuin röntgenkuvauksessa.

Lineaarikiihdyttimet ovat suuria ja painavia ja niiden käyttö on yleensä mahdollista vain erityisissä suojatuissa kuvaustiloissa. Lineaarikiihdyttimien toimintaperiaate on esitetty edellä luvussa 2.3.

Säteilysuojaus

Teollisuuden radiografiassa käytettävien röntgenlaitteiden annosnopeus on 5–20 Sv/h metrin etäisyydellä fokuksesta. Gammakuvauslaitteiden annosnopeudet ovat huomattavasti pienemmät, esimerkiksi 3,7 terabecquerelin (100 Ci) ^{192}Ir lähteellä noin 0,5 Sv/h metrin etäisyydellä, mutta lähteen pieni koko ja jatkuva säteily lisäävät onnettomuusriskiä muilla tavoin. Laitteiden käyttö vaatii tiukat turvallisuusjärjestelyt ja hyvin koulutetun käyttöhenkilökunnan.

Turvallisinta kuvaus on sitä varten rakennetussa suojatussa huoneessa, jossa on automaattinen merkkivalo, säteilyhälytin ja turvakytkimet. Kuvattavien kohteiden koko ja sijainti eivät kuitenkaan aina anna tähän mahdollisuutta. Siltoja, laivoja, paineastioita, putkistoja ynnä muuta sellaista kuvattaessa on kuvauspaikan ympäristö eristettävä varoitusmerkein ja köysin. Lisäksi on valvottava, ettei kukaan pääse vahingossakaan kuvauspaikalle. Erityisesti lähialuetta, jossa annosnopeus ylittää 60 $\mu\text{Sv/h}$, on valvottava, ja se on eristettävä tehokkaasti. Lisäksi on valvottava aluetta, jossa annosnopeus ylittää 7,5 $\mu\text{Sv/h}$. Muiden kuin kuvaukseen osallistuvien henkilöiden oleskelu tällä alueella on kielletty.

Gammakuvauslaitteen käyttö vaatii erityistä huolellisuutta. Vaikka annosnopeudet metrin etäisyydellä ovat pienempiä kuin röntgenkuvauslaitteella, on annosnopeus lähteen pinnalla hyvin suuri. Lähteen koskettaminen aiheuttaa vakavia palovamman tyyppisiä vaurioita jo muutamassa sekunnissa. Kuvauksen jälkeen on ehdottoman välttämätöntä varmistaa, että säteilylähde on siirtynyt takaisin suojukseen. Säteilylähteen irtoamisesta ja katoamisesta on viime aikoinakin aiheutunut maailmalla vakavia onnettomuuksia (katso luku 7).

4.2 Ajoneuvojen ja matkalaukkujen tarkastuslaitteet

Vuoden 1999 lopulla otettiin Vaalimaan tullissa käyttöön ”rekkaröntgen” eli raskaiden ajoneuvojen läpivalaisulaite. Laitteen valmistaja on saksalais-ranskalainen Heimann Systems. Maailmalla on käytössä vastaavia laitteita kymmenkunta, joista kuusi on Euroopassa.

Laitoksen tärkeimmät osat ovat säteilylähde, ilmaisain, kuvankäsittelyjärjestelmä ja suojarakennus. Säteilylähteinä käytetään kahta lineaari-kiihdytintä, joista toinen ottaa kuvan ylhäältäpäin ja toinen sivulta vaakasuoraan. Kun kuvattavana on kokonainen rekka-auto, vaaditaan säteilyltä tavallista parempaa läpäisykykyä. Normaalisti metallirakenteiden kuvauksissa käytetään korkeintaan 300 kilovoltin jännitteellä aikaansaatuja röntgensäteilyä. Vaalimaalla kiihdyttimissä fotonien maksimienergia on 9 MeV.

Kuvauksessa säteily johdetaan rajoittimien läpi ilmaisinyksikköön siten, että viuhkamainen säteilykeila on vain viisi millimetriä leveä ja noin kolmen metrin korkuinen. Tietokone muodostaa kuvan ja näyttää sen monitorilla samalla kun ajoneuvoa hinataan kuvaustunnelin läpi. Kuvaa voidaan edelleen käsitellä nykyaikaisin keinoin ja tulostaa paperille. Monitoreja on käytössä useita, joten seuraava ajoneuvo voidaan ajaa tarkastettavaksi heti kun edellinen on ajanut ulos. Mikäli kuormassa on jotain mielenkiintoista voivat kuvantulkitsijat antaa tulitarkastajille paperitulosteen, johon on merkitty epäilyttävän kohteen koordinaatit.

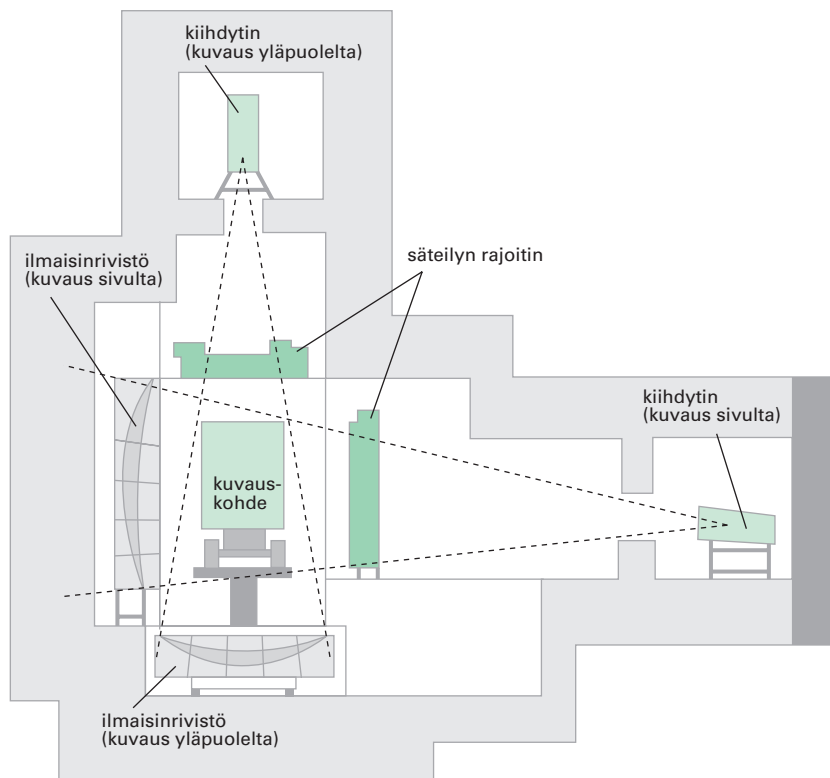
Suojarakennuksen keskeinen osa on kuvaustunneli, jonka läpi kuvattava ajoneuvo vedetään. Tunnelin molemmissa päissä on raskaat liukuovet, jotka suojaavat ulkopuolella olevia ihmisiä säteilyltä. Ovirakenteessa on 25 senttimetriä betonia ja kaksi senttimetriä terästä. Lisäksi tunnelissa on hinauslaite, joka vetää kuvattavan ajoneuvon tunnelin läpi. Rakennuksen muissa osissa suojusten paksuudet vaihtelevat. Paksuimmillaan ne ovat horisontaalikiihdyttimen primaarisuunnassa, jossa on 240 senttimetriä betonia. Tunnelin uloimmat osat ovat vain 50 senttimetriä paksut.

Laitoksen suunnittelussa ja toteutuksessa on otettu huomioon turvallisuusseikat siten, ettei laitoksen sisällä eikä ympäristössä työskenteleville aiheudu säteilyvaaraa. Turvakytkimet, merkkivalot, äänisignaalit, valvontatelevisio ja sisäinen kommunikointijärjestelmä varmistavat, ettei kukaan joudu vahingossa säteilylle altistetuksi. Turvallisuusluvassa on

nimetty vastuhenkilö huolehtimaan turvallisuusjärjestelmien ylläpidosta. Laitoksen käyttäjät on luonnollisesti koulutettu turvalliseen työskentelyyn ja heillä on myös tarpeelliset henkilökohtaiset annosmittarit sekä säteilyhälyttimet. Säteilyturvakeskus valvoo laitoksen työskentelyä ja suorittaa aika ajoin turvallisuuteen kohdistuvia tarkastuksia.

Lopuksi kysymys, joka tulee kaikille ennemmin tai myöhemmin mieleen. Mitä tapahtuu, jos joku salamatkustaja jää autoon kuvauksen ajaksi? Vaikka säteilylaitteet ovat tässä tapauksessa järeimmästä päästä, on saatu säteilyannos kuitenkin yllättävän pieni, kiitos nykyaikaisen tekniikan. Annos on samaa luokkaa, jonka ihminen saa lentokoneessa ylittäessään Atlantin valtameren.

Lentokenttien ja tulliasemien matkalaukkujen tarkastuslaitteet toimivat periaatteessa samalla tavalla kuin Vaalimaan laitekin. Röntgenkoneen suurjännite on niissä vain yleensä 150 kilovolttia.



Kuva 4.2 Poikkileikkaus ajoneuvojen läpivalaisulaitoksesta

4.3 | Säteilysterilointi

Elintarviketeollisuudessa, lääketeollisuudessa ja sairaanhoitotarviketeollisuudessa on usein kiinnitettävä huomiota paitsi tuotteiden, myös käytettävien pakkausmateriaalien, mikrobiologiseen puhtauteen. Sterilointi voidaan tehdä kostean tai kuivan lämmön avulla, etyleenioksidikaasulla tai säteilyttämällä. Koska monet materiaalit eivät kestä lämpöön perustuvia sterilointimenetelmiä ja koska etyleenioksidin käyttöön liittyy työturvallisuus ja jäämäongelmia, on ionisoivan säteilyn käyttö yleistynyt erityisesti muovisten kertakäyttötuotteiden ja pakkausmateriaalien käsittelyssä.

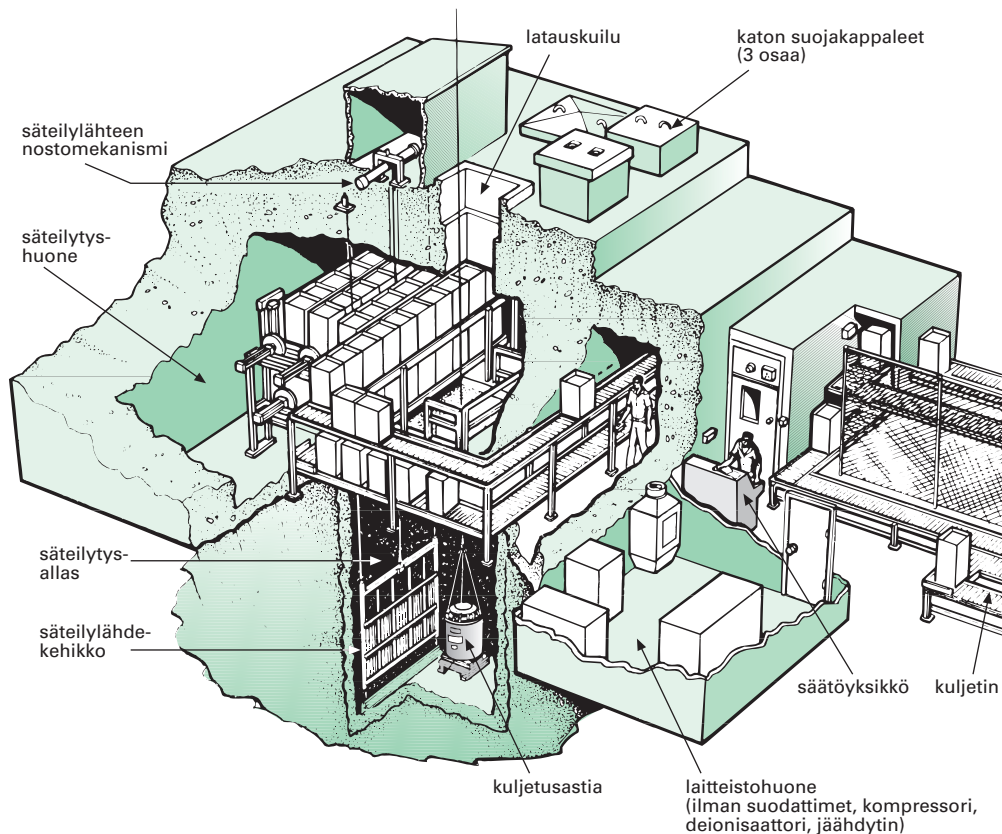
Teollinen säteilysterilointi alkoi Yhdysvalloissa vuonna 1956, jolloin katgutteja (suolesta valmistettuja ommelaineita) sterilointiin elektronisäteilyn avulla. Aiemmin lasiputkiin pakatut katgutit voitiin nyt pakata alumiinifolioon ja steriloida suljetuissa pakkauksissa.

Vuonna 2000 maailmassa oli yli 200 gammasterilointilaitosta, joista yksi toimi Suomessa Ilomantsissa vuoteen 2002 saakka (kuva 4.3). Tavallisin säteilylähde on ^{60}Co . Suurin osa laitoksista steriloi kertakäyttöisiä sairaanhoitotarvikkeita. Myös elintarvikkeita säteilytetään useissa maissa, vaikka kuluttajien epäluulot ja lainsäädäntö usein rajoittavat tällaista säteilyn käyttöä. Perunan, sipulin, jyvien, hedelmien ja mausteiden säteilyttämisen tarkoituksena on itämisen estäminen tai mikrobien määrän vähentäminen. Suomessa elintarvikkeiden säteilyttämistä koskeva asetus tuli voimaan marraskuussa 1988. Vuonna 2000 annetun asetuksen mukaan noudatetaan EY:n direktiiviä 1999/2/EY, ja siinä annetaan määräyksiä muun muassa pakkausmerkinnöistä. Tarkempaa tietoa aiheesta on luettavissa tämän kirjasarjan osan 2 ”Säteily ympäristössä” luvussa 6.8.

Elintarvikkeiden säteilyannosten turvallinen yläraja on kymmenen kilograytä (kGy). Se vähentää mikrobien määrää, mutta ei steriloi elintarviketta. Perunan ja sipulin itämisen estoon riittää 0,1–0,2 kilograyn annos. Steriloinnissa annoksen suuruus on 10–50 kGy.

Vaikka käytössä on teknisiltä ratkaisuiltaan erilaisia gammasterilointilaitoksia, seuraavat pääosat ovat yhteisiä: säteilylähde, säteilysuoja ja tuotteiden kuljetusmekanismi. Suomalaisessa laitoksessa säteilylähteenä oli ohuita kobolttisauvoja, jotka oli sijoitettu pystysuoraan telineeseen. Säteilysuojana oli betonikammio, jonka seinät olivat lä-

hes kaksi metriä paksut. Kobolttiteline voitiin laskea alas kuusi metriä syvän vesialtaan pohjalle, jolloin vesikerros esti säteilyä pääsemästä ylös kammioitaan. Vesialtaan pohjalla siirrettiin myös kobolttisauvat kuljetusastiasta telineeseen pitkiä manipulointipihtejä käyttäen. Käytön aikana telineen ollessa ylhäällä annosnopeus kammiossa oli niin suuri, että tappava annos saavutettiin muutamassa kymmenessä sekunnissa. Laitoksessa oli moninkertaiset turvajärjestelmät ja automaattiset hälytyslaitteet, joilla estettiin ihmisen pääsy epähuomiossa kammioon säteilyttämisen aikana. Käyttöhenkilökunnan koulutus, säännölliset huollot ja viranomaisvalvonta kuuluivat luonnollisesti turvallisuustoimiin.



KUVA 4.3 Ilomantsissa käytössä olleen gammasterilointilaitoksen rakenne

Valmistaja MDS Nordion, Kanada

4.4 Radiometriset laitteet

Radiometriset (säteilyn käyttöön perustuvat) mittalaitteet tuovat usein ratkaisun mittauskohdeissa, joissa tavanomaisten sähköisiin, optisiin ja mekaanisiin ilmiöihin perustuvien mittalaitteiden käyttö on epäluotettavaa tai mahdotonta vaikeiden mittaolosuhteiden takia. Esimerkkejä tällaisista kohteista ovat kiinteää polttoainetta käyttävän lämpökattilan polttoaineen syötön ohjaus, selluloosatehtaan vuokeittimen hakepinnan säätö, metallurgisen teollisuuden lukuisat tiheysmittaukset, masuuniin syötettävän koksen kosteusmittaus sekä paperin pinta-alamassan mittaaminen. Kaikki mainitut tapaukset ovat sellaisia, joissa mittaaminen ei saa häiritä materiaalivirtaa. Kattilan syöttötorven sisäpuolelle ei voida asentaa anturia, sillä tähän tarttuva polttoaine tukkisi syöttötorven. Vuokeitin taas on paineastia, jossa on korkea lämpötila ja syövyttäviä kemikaaleja. Tiheysmittauksissa olosuhteet ovat usein niin vaikeita, että mekaaniset massan ja tilavuuden mittaukset ovat laitteiston likaantumisen takia epätarkkoja. Koksen kosteuden mittaaminen masuunissa sekä paperin pinta-alamassan mittaaminen nykyaikaisissa nopeissa paperikoneissa muuten kuin radiometrisesti on käytännössä mahdotonta.

Mittalaitteiden rakenne

Säteilyyn perustuva mittalaite koostuu säteilysuojukseen sijoitetusta umpilähteestä, säteilyn ilmaisimesta ja mittauselektronikasta. Säteilylähteen isotooppi valitaan säteilyominaisuuksiltaan parhaiten kyseiseen mittaustarkoitukseen sopivaksi. Umpilähdettä käyttämällä varmistetaan, että radioaktiivinen aine ei leviä laitteen ulkopuolelle eikä aiheuta laitteen käyttäjälle sisäistä säteilyannosta. Säteilysuojuksen tehtävä on pienentää ulkoisen säteilyn annosnopeus laitteen ympärillä hyväksyttävälle tasolle. Säteilyn ilmaisimen valitaan mittalaitteen käyttötarkoituksen mukaan. Yksinkertaisimmissa mittauksissa voidaan käyttää geigerilmaisinta ja vaativammassa ionisaatiokammiota tai tuikeilmaisinta. Mittauselektronikka voi vaihdella ilmaisimeen kytketystä merkkilampusta monimutkaiseen tietokonejärjestelmään.

Umpilähteet

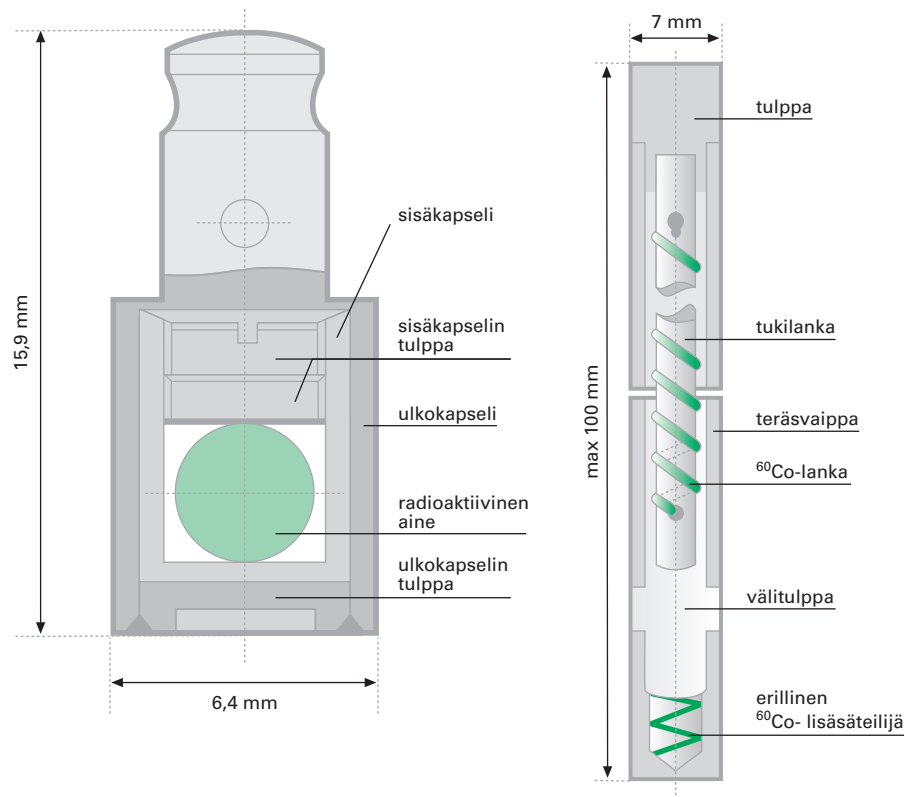
Umpilähteellä tarkoitetaan säteilylähdettä, jossa radioaktiivinen aine on suljettu tiiviiseen kapseliin tai päällystetty siten, ettei sitä voi kosketella eikä radioaktiivinen aine leviä kapselin tai päällyksen ulkopuo-

lelle niissä käyttöoloissa, joihin säteilylähde on suunniteltu (kuvat 4.4 a, b). Umpilähteet valmistetaan ja testataan kansainvälisesti hyväksytyjen standardien mukaisesti (ISO 2919, Radiation protection – Sealed radioactive sources – General requirements and classification ja ISO 9978, Radiation protection – Sealed radioactive sources – Leakage test methods). Kyseisissä standardeissa vaaditaan, että umpilähde on tiivis ja pinnaltaan riittävän puhdas. Edellinen vaatimus on selvä jo umpilähteen määritelmän perusteella. Toisella vaatimuksella varmistetaan, että lähdekapselin pinnalla ei ole irtoavaa radioaktiivista kontaminaatiota, jolla radiometrisen mittalaitteen valmistaja voisi lähdettä käsitellessään kontaminoida työpaikkansa. Standardeissa esitetään myös menetelmät, miten kapselin tiiviys ja puhtaus todetaan. Jokaisen umpilähteen mukana seuraa ostettaessa sertifikaatti, jossa on ilmoitettu säteilylähteen olennaiset tiedot (nuklidi, aktiivisuus, valmistuspäivä ja -numero) sekä vakuutus lähteen tiiviyydestä ja ilmoitus siitä miten tiiviys on todettu.

Umpilähteisiin valitaan radioaktiivisen aineen kemiallinen ja fysikaalinen olomuoto siten, että se on mahdollisimman vähän liukenevaa. Lisäksi kapselimateriaalit valitaan mahdollisimman hyvin ympäristöolosuhteita kestäviksi. Näin pyritään varmistamaan, että radioaktiivinen aine pysyy kapselissa eikä leviä ympäristöön aiheuttamaan käyttäjilleen ja muille lähistöllä oleville sisäistä säteilyaltistusta.

Koska umpilähteitä käytetään hyvin monenlaisiin tarkoituksiin ja niiden sisältämä radioaktiivinen aine voi olla säteilyominauksiltaan hyvinkin erilainen (alfa-, beeta-, gamma- tai neutronisäteilijä), kapselit poikkeavat rakenteeltaan ja muodoltaan huomattavasti toisistaan.

Alfasäteilylähteen kapselin säteilyikkunan on oltava hyvin ohut, jotta alfasäteily pääsisi ulos kapselista. Tällöin kapseli on tietenkin mekaanisesti hyvin heikko ja siksi kapselia on käsiteltävä erittäin varovasti. Myös beetasäteilylähteen kapselissa on oltava ohut ikkuna, joka voi kuitenkin olla jonkin verran paksumpi kuin alfasäteilylähteen. Gammasäteilylähteiden kapselit voidaan yleensä tehdä mekaanisesti hyvin vahvoiksi. Tällöin radioaktiivinen aine on usein kaksinkertaisen teräskapselin ympäröimä. (Jos kyseessä on pienienergistä säteilyä lähettävä nuklidi, kapselissa on myös tällöin oltava ohut ikkuna.) Umpilähteet voivat olla lähes pistemäisiä, levymäisiä tai jopa metrin pituisia sauvoja. Umpilähteitä käsiteltäessä on tietenkin otettava huomioon, paitsi kapselin rikkoutumisvaara, myös muutoinkin radioaktiivisesta aineesta aiheutuva säteilyvaara.



KUVAT 4.4 a ja 4.4 b Säteilylähteitä

- a) Pistemäinen gammasäteilylähde. Sisä- ja ulkokapselit ruostumatonta terästä, radioaktiivinen aine metallipellettinä tai keraamisena massana.
- b) Berthold-pinnankorkeusmittarin sauvamainen säteilylähde. ^{60}Co -lanka on kierretty tukilangan ympärille ja lähde on suljettu tiiviseen teräsvaippaan. Saumat on hitsattu. Lisäsäteilijän avulla parannetaan mittausvasteen lineaarisuutta.

Gammasäteilylähteet

Radiometrisissä mittalaitteissa käytetään yleisimmin gammasäteilijöinä nuklideja ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{241}Am ja ^{55}Fe . Lisäksi röntgenfluoresenssi-analysaattoreissa käytetään joitakin pienienergisiä gammasäteilijöitä kuten ^{109}Cd ja ^{244}Cm .

Koboltilähteiden tyypillinen aktiivisuus on välillä 37 MBq - 3,7 GBq. Niitä käytetään yleisesti pinnankorkeusmittareissa, pintakytkimissä ja erilaisissa kuljetinvaaioissa. ^{60}Co -isotooppia valmistetaan säteilyttämällä stabiilia ^{59}Co -isotooppia ydinreaktorissa neutroneilla. Säteilyn suuren läpäisykyvyn takia (puoliintumispaksuus 21 millimetriä terästä tai 12

millimetriä lyijyä) säteilylähteet vaativat varsinkin suuremmilla aktiivisuuksilla raskaan säteilysuojuksen, jotta annosnopeus yhden metrin etäisyydellä laitteesta ei ylitä yleisesti hyväksyttyä annosnopeutta 7,5 $\mu\text{Sv/h}$. Aktiivisuudeltaan 3,7 GBq ^{60}Co -lähteen säteilysuojuksessa on tyypillisesti noin kymmenen senttimetriä paksu lyijykerros. Tällainen suojuus painaa noin 80 kg. Koska ^{60}Co :n puoliintumisaika on 5,27 vuotta, lähteet on uusittava melko lyhyen käytön jälkeen. Tämä ei kuitenkaan ole pelkästään haitta, sillä jätteeksi jouduttuaan koboltilähteet eivät säteile ”ikuisesti”.

^{137}Cs -lähteiden tyypillinen aktiivisuus on välillä 37 MBq - 37 GBq, mutta käytössä on muutamia lähteitä, joiden aktiivisuus on jopa $1,85 \times 10^{12}$ Bq. ^{137}Cs on uraanin halkeamistuote ja sitä saadaan erottamalla käytetystä ydinpolttoaineesta. Säteilyn vähäisemmän läpäisykyvyn (puoliintumispaksuus 16 mm terästä ja 6,5 mm lyijyä) takia tullaan toimeen paljon pienemmillä säteilysuojuksilla kuin koboltilähteiden tapauksessa. Cesiumlähteitä käytetään yleisesti pintakytkimissä, pinnankorkeus- ja tiheysmittareissa ja erilaisissa kuljetinvaaoissa. Koska ^{137}Cs :n puoliintumisaika on noin 30 vuotta, säteilylähteitä ei juuri tarvitse vaihtaa laitteen käyttöänsä aikana. Laitteiden ominaisuudet pysyvät myös hyvin stabiileina ajan kuluessa; säteilylähteen heikkeneminen vaikuttaa mittaustuloksiin vain vähän. Jätteeksi jouduttuaan cesiumlähde on kuitenkin hankalan pitkäikäinen.

Nuklidi	Puoliintumisaika	Säteilylaji	Energia MeV	Tyypillinen käyttötarkoitus
^{60}Co	5,27 a	γ	1,17; 1,33	Pinnankorkeusmittari, pintakytkin, kuljetinvaaka
^{137}Cs	30,2 a	γ	0,662	–”–
^{241}Am	432,7 a	α, γ	5,5 α 0,060 γ	ioni-ilmaisoin, neutronilähde, tiheysmittari, analyysointilaitte
^{109}Cd	1,27 a	γ	0,022; 0,087	analyysointilaitte
^{55}Fe	2,68 a	γ	0,0059	tuhkamittari, analyysointilaitte
^{192}Ir	74,0 d	γ	0,32; 0,47	gammaradiografialaitte
^{85}Kr	10,7 a	β	0,687	pinta-alamassamittari
^{147}Pm	2,62 a	β	0,225	pinta-alamassamittari
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	29,1 a	β	0,546; 2,284	pinta-alamassamittari

TAULUKKO 4.2. Teollisuudessa eniten käytettyjä nuklideja

Beetasäteilylähteet

Yleisimmät nuklidit, joita käytetään beetasäteilyyn perustuvissa mittalaitteissa, ovat nykyisin ^{147}Pm , ^{85}Kr ja $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. Näitä kaikkia isotooppeja saadaan erottamalla käytetystä ydinpolttoaineesta. ^{147}Pm - ja ^{85}Kr -lähteitä käytetään pääasiassa ohuiden tuotteiden, kuten paperin tai muovikalvon, paksuus- tai pinta-alamassan mittauksissa. $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ -lähteitä käytetään puolestaan pinta-alamassan mittauksiin kartonkikoneilla ja selluloosan kuivauskoneilla, joissa tarvitaan tuotteen paksuuden takia beetasäteilyn suurempaa läpäisykykyä. Tyyppillinen krypton- ja prometiumlähde on aktiivisuudeltaan 3,7–37 GBq, strontium/yttriumlähteen aktiivisuus on yleensä alle 1,85 GBq. Yleisimpien beetasäteilylähteiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 4.2.

Beetasäteilyn yhteydessä syntyy elektronien hidastuessa gamma-säteilyyn verrattavaa jarrutussäteilyä, jonka energiaspektri on jatkuva ja maksimienergia on sama kuin beetasäteilyn suurin energia. Lisäksi syntyy kohtiomateriaalin karakteristista röntgensäteilyä kohtiomateriaalin virittyessä. Syntyvän jarrutussäteilyn määrä riippuu siitä, mihin aineeseen elektronit törmäävät. Jarrutussäteilyä syntyy sitä enemmän mitä suurempi kohtiomateriaalin järjestysluku on. Jos halutaan valmistaa puhdas beetasäteilylähde, on kapselin sisäosat tehtävä mahdollisimman kevyestä aineesta esimerkiksi alumiinista ja kapselin ikkuna mahdollisimman ohueksi. Toisaalta, kun säteilylähteen isotooppi ja kapselin materiaalit valitaan sopivasti, saadaan säteilylähde, joka lähettää lähes puhdasta karakteristista röntgensäteilyä. Voidaan esimerkiksi valmistaa säteilylähteitä, joissa prometium-147 sekoitetaan zirkoniumia sisältävään massaan. Tällöin lähde säteilee paitsi jatkuvaa jarrutussäteilyä myös zirkoniumin K-röntgensäteilyä, jonka energia on 15,7 kiloelektronivoltia.

Neutronilähteet

Neutronilähteet perustuvat yleisimmin (α , n)-reaktioon. Nämä lähteet valmistetaan siten, että sekoitetaan pitkäikäistä alfasäteilijää ja berylliumpulveria mahdollisimman homogeenisesti ja puristetaan seos tabletkiksi tai sintrataan yhdessä keraamisen massan kanssa. Saatu seos suljetaan tämän jälkeen kaksinkertaiseen teräskapseliin. Kun alfahiukkaset törmäävät berylliumytimeen, tapahtuu ydin-

reaktioita, joissa berylliumytimet muuttuvat hiiliytimiksi. Lisäksi vapautuu nopeita neutroneja, joiden suurin energia on noin 12 megaelektronivoltia. Sen lisäksi reaktiossa syntyy suurienergistä (3–4 MeV) gammasäteilyä. Aikaisemmin neutronien tuottamiseen käytettiin lähes pelkästään radium-beryllium-lähteitä. Radiumin käytöstä on nykyisin kuitenkin säteilysuojelusyistä luovuttu, sillä radiumin hajoamiseen liittyy myös paljon kovaa gammasäteilyä, joka aiheuttaa hyvin suuren annosnopeuden lähteen ympärille. Huomatavasti turvallisempaa on käyttää alfasäteilijänä ^{238}Pu - tai ^{241}Am -nuklideja, sillä niiden hajoamiseen ei liity kovaa gammasäteilyä. Koska plutonium on ydinaine¹, sitä ei ole yleisesti saatavilla. Tämän takia nykyisin suurin osa neutronilähteistä on amerikum-berylliumlähteitä. ^{241}Am -nuklidia saadaan erottamalla sitä käytetystä ydinpolttoaineesta. Koska ^{241}Am -nuklidin puoliintumisaika on 432,7 vuotta, lähteen neutronituotto ei juuri muutu pitkänkään ajan kuluessa.

Kalifornium-252 on paitsi alfasäteilijä myös spontaanisti fissioituva. Jokaisessa fissiossa vapautuu neutroneja. Näin ollen ^{252}Cf -isotopia voidaan käyttää neutronilähteenä. Koska ^{252}Cf :n efektiivinen puoliintumisaika on vain 2,65 vuotta, joudutaan lähteitä vaihtamaan melko usein. Taulukossa 4.3 on tietoja yleisimmin käytetyistä neutronilähteistä.

Nuklidi	Puoliintumisaika	Neutronituotto n/s MBq:iä kohti	γ -annosnopeus $\mu\text{Sv/h}$ MBq:iä kohti 1 m etäisyydellä	Lähdetyyppi
^{227}Ac	21,8 a	405	0,032	Ac-Be
^{241}Am	432,7 a	60	0,0007 ¹	Am-Be
^{244}Cm	18,1 a	68	0,0007	Cm-Be
^{238}Pu	87,8 a	60	0,0003	Pu-Be
^{226}Ra	1 600 a	351	0,21	Ra-Be
^{228}Th	1,91 a	540	0,16	Th-Be
^{252}Cf	2,64 a	$1,15 \times 10^5$	0,08 ²	spontaani fissio

¹ (Am-Be)-lähteen neutroneiden aiheuttama annosnopeus metrin etäisyydellä lähteestä on suunnilleen yhtä suuri kuin gammasäteilyn annosnopeus.

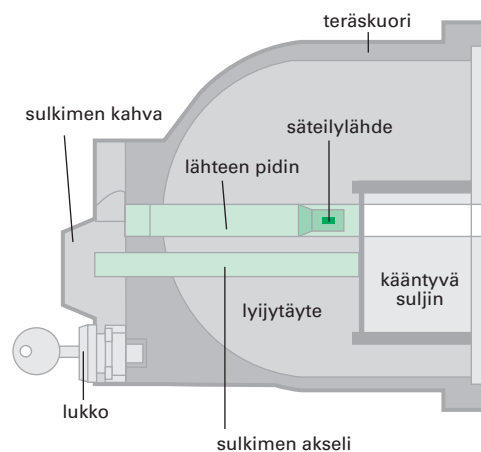
² Neutroneiden aiheuttama annosnopeus on noin $1,15 \mu\text{Sv/h}$ MBq:iä kohti metrin etäisyydellä lähteestä.

TAULUKKO 4.3 Yleisimmät neutronilähteet

¹ Ydinaineella tarkoitetaan ydinenergian aikaansaamiseen soveltuvaa erityistä halkeamiskelpoista ainetta tai lähtöainetta, kuten uraania, plutoniumia tai toriumia.

Säteilysuojus

Radiometrisen laitteen säteilylähde on aina sijoitettu säteilysuojukseen, jonka tehtävänä on suojata laitteen käyttäjät ja muut henkilöt riittävästi säteilyltä ja päästää säteilyä vain siihen suuntaan, jossa säteilyä tarvitaan eli kohti tutkittavaa ainetta ja säteilyn ilmaisinta. Standardin ISO 7205 (Radionuclide gauges – Gauges designed for permanent installation) mukaan annosnopeus yhtä metriä kauempana laitteesta ei saa ylittää arvoa $7,5 \mu\text{Sv/h}$ muualla kuin säteilykeilassa. Säteilysuojuksen on oltava rakenteeltaan sellainen, että säteilylähde pysyy suojuksen sisällä myös tulipalossa eikä suojuksen suojauskyky saa vähetä oleellisesti tulipalossa. Säteilysuojuksessa on yleensä aina suljin, jolla säteilykeila voidaan tarvittaessa vaimentaa esimerkiksi laitteen läheisyydessä tehtävien korjaustöiden ajaksi. Sulkimen on toimittava luotettavasti kaikissa olosuhteissa eikä se saa avautua vahingossa. Toisaalta se on voitava sulkea ilman työkaluja. Jos sulkimen asentoja ohjataan sähköisesti tai pneumaattisesti, täytyy sulkimen sulkeutua automaattisesti sähkövirran tai paineilman syötön katketessa. Kauko-ohjatussa sulkimessa on oltava myös sulkimen asentoa osoittavat merkkivalot, joiden ohjauksen pitää tapahtua suoraan sulkimen liikkeistä. Kuvassa 4.5 on esitetty erään pistemäisen gammasäteilijän säteilysuojuksen rakenne.



KUVA 4.5 Säteilysuojus pistemäiselle säteilylähteelle

Säteilyä käytettäessä sylinterimäisessä sulkimessa oleva reikä käännetään lähteen kohdalle.

Sovelluksia

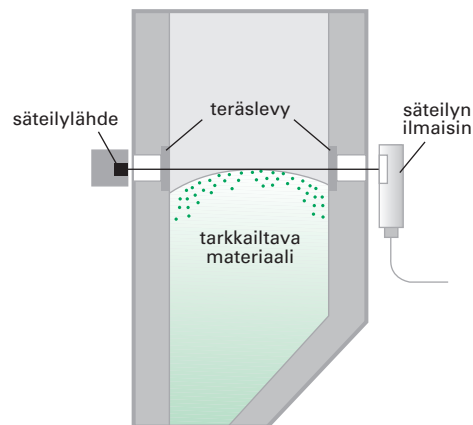
Kaikki radiometriset mittalaitteet perustuvat säteilyn ja tutkittavan aineen välisiin vuorovaikutuksiin: absorptioon, sirontaan, väliaineen viirtymiseen, ydinreaktioihin, sekundaarisen säteilyn syntymiseen - joko yhteen ilmiöön tai näiden yhdistelmiin. Radiometristen laitteiden suurin etu on, että ei tarvita mekaanista kosketusta mitattavaan aineeseen. Lisäksi nämä laitteet soveltuvat erittäin hyvin nopeisiin tuotantolinjoihin ja äärimmäisen vaikeisiin olosuhteisiin. Mittaukset ovat ainetta rikkomattomia eivätkä ne muuta mitattavan aineen rakennetta. Suurienerginen gammasäteily tai neutronit mahdollistavat mittaukset säiliöiden ja putkien tai muiden sellaisten ulkopuolelta häiritsemättä mitattavan aineen liikettä. Mittaukset tapahtuvat yleensä suurista ainemääristä, jolloin mittauksen antama tulos on edustavampi kuin pienestä näytteestä tehdyssä laboratorioanalyysissä. Prosessien automatisointi vaatii myös automaatiojärjestelmään kytketyiltä kenttälaitteilta suurta luotettavuutta, joka usein saavutetaan valitsemalla säteilyyn perustuva mittalaite.

Pintakytkin

Kaikkein yleisin radiometrinen laite on pintakytkin, jota tarvitaan materiaalipinnan havaitsemiseen ja materiaalivirran ohjaamiseen erilaisissa säiliöissä, suppiloissa ja muissa paikoissa. Mitattava aine voi olla malmia, happoa, haketta, hiiltä, turvetta ynnä muuta. Pintakytkimen avulla voidaan havaita, onko säiliössä ainetta asetetun rajan ylä- vai alapuolella. Halutulle korkeudelle asennetaan säteilysuojuksessa oleva umpilähde, josta lähtee kapea säteilykeila kohti säiliön vastakkaisella puolella olevaa säteilynilmaisinta. Jos ainepinta on säteilykeilan alapuolella, säteily pääsee lähes vaimentumatta ilmaisimelle. Heti kun ainepinta nousee säteilykeilan kohdalle, ilmaisimelle tuleva säteily vähenee täyteaineessa tapahtuvan säteilyn vaimentumisen takia. Ilmaisimen havaitseman säteilyintensiteetin pieneneminen osoittaa säiliön täyttymisen. Usein säiliöön asennetaan kaksi pintakytkintä, joista toinen estää säiliön tyhjenemisen ja toinen sen ylitäytön. Säiliötä täytävä kuljetin käynnistyy, kun pinta alittaa alarajan ja alarajan ilmaisimen havaitsema säteily lisääntyy. Kuljetin pysähtyy, kun pinta ylittää ylärajan eli ylärajan ilmaisimen havaitsema säteily vähenee.

Pintakytkimissä käytetään yleisesti ^{137}Cs - tai ^{60}Co -lähteitä ja ilmaisimena useimmiten geigerilmaisinta tai ionisaatiokammiota. Lähteen aktiivisuus ^{137}Cs -lähteillä vaihtelee tyypillisesti välillä 37 MBq - 37 GBq

säiliön seinämän paksuudesta ja säiliön halkaisijasta riippuen. ^{60}Co -lähteillä aktiivisuus on tyypillisesti välillä 37 MBq - 3,7 GBq. Laitteessa käytettävän säteilylähteen aktiivisuus riippuu säiliön tai siilon seinämien paksuudesta ja aineesta sekä säteilylähteen ja ilmaisimen välisestä etäisyydestä ja lisäksi laitteen ilmaisimen herkkyydestä. Jos kyseessä on esimerkiksi paksuseinäinen betoni-siilo (kuva 4.6), on usein edullista tehdä betoniin reiät sekä lähteen että ilmaisimen puolelle ja paikata ne riittävän paksuilla teräslevyillä. Täten saadaan poistetuksi huomattavasti vaimentavaa ainetta säteilylähteen ja ilmaisimen välistä ja laitteen säteilylähteen aktiivisuus voidaan pienentää jopa kymmenesosaan. Lisäksi voidaan käyttää pienempää ja halvempaa säteily-suojusta.



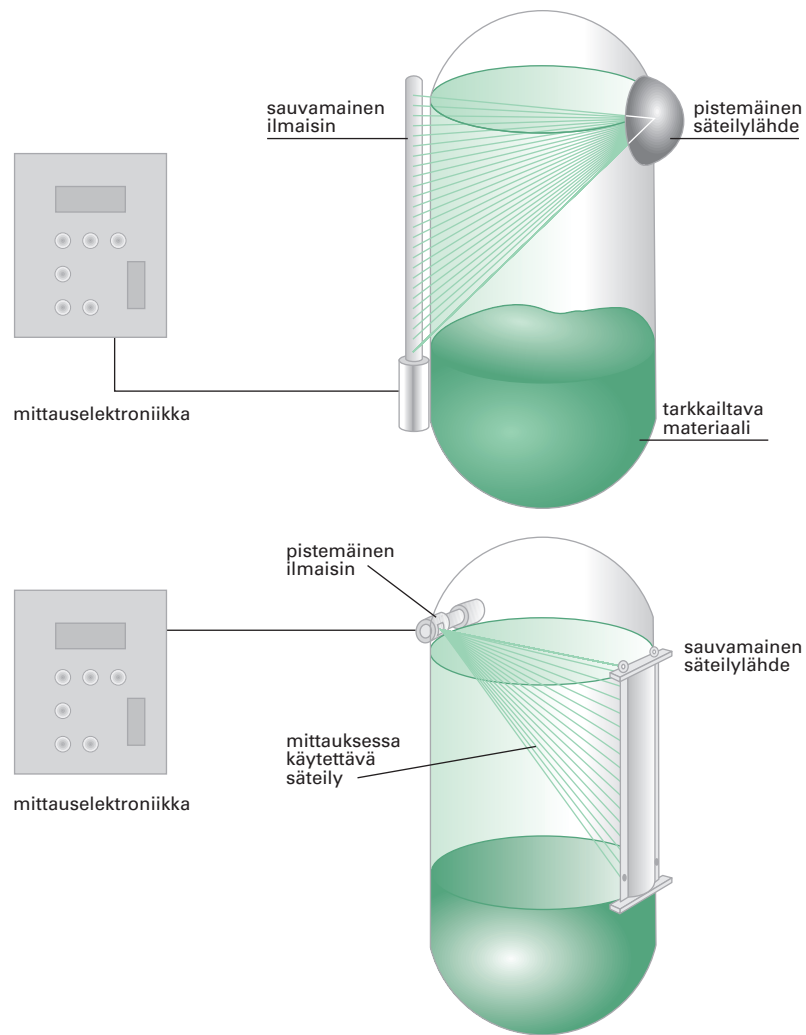
KUVA 4.6 Pintakytkin betoniseinäisessä siilossa

Paksu betoniseinä on mittauskohdassa korvattu säteilyä vähemmän vaimentavalla teräslevyllä; näin menetellen voidaan käyttää aktiivisuudeltaan pienempää säteilylähdettä ja kevyempää lähteen säteily-suojusta.

Pinnankorkeusmittari

Jos halutaan tietää säiliön tarkka täyttöaste tietyllä alueella, käytetään pinnankorkeusmittaria. Pinnankorkeusmittarin säteilylähteestä lähtee säiliön korkeussuunnassa leveä ja sivusuunnassa kapea säteilykeila kohti säiliön toisella puolella olevaa halutun mittausalueen pituista säteilyn ilmaisinta, joka voi olla joko ionisaatiokammio tai muovituikeilmaisim (kuva 4.7 a). Joskus käytetään myös usean ilmaisimen muodostamaa ilmaisinketjua. Kun mitattavan aineen pinta säiliössä nousee tai laskee, vähenee tai lisääntyy ilmaisimen havaitsema säteily.

Tästä voidaan päätellä säiliön täyttöaste. Usein sijoitetaan pinnankorkeusmittarin yläpuolelle vielä pintakytkin, joka keskeyttää säiliön täytön, jos pinta jostakin syystä nousee liian korkealle. Tyypillinen pinnankorkeusmittarin ja yläpintakytkimen käyttöpaikka on selluloosa-tehtaan keitin. Pinnankorkeusmittari voidaan tehdä myös siten, että käytetään mittausalueen pituista säteilylähdettä ja halutun yläpinnan



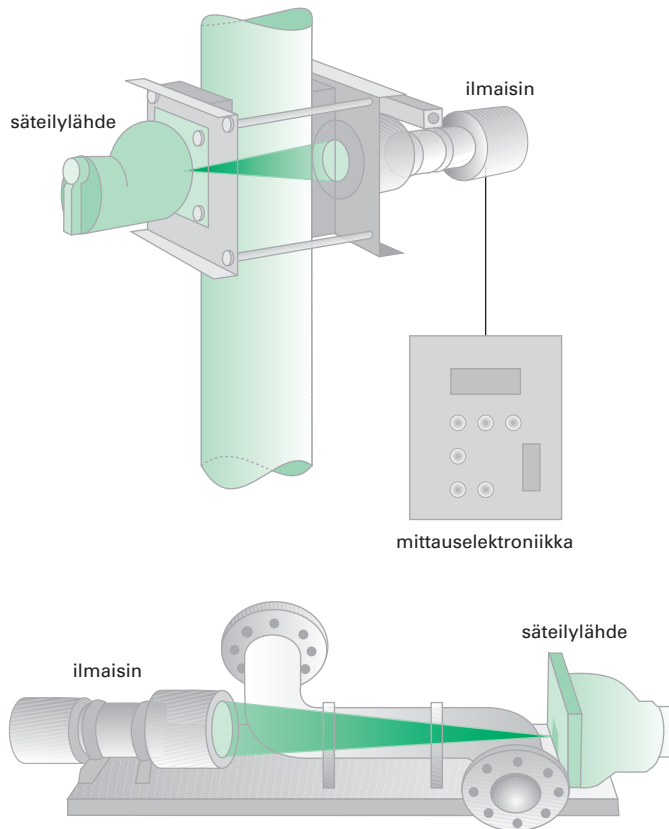
KUVAT 4.7 a ja 4.7 b Erilaisia pinnankorkeusmittareita

- a) Pistemäinen säteilylähde ja sauvamainen ilmaisin.
 b) Sauvamainen säteilylähde ja pistemäinen ilmaisin. Kuvaan on piirretty vain mittauksessa käytettävä osuus säteilykeilasta. Todellisuudessa säteilyä suuntautuu myös muualle.

korkeudelle säiliön vastakkaiselle puolelle sijoitettua pistemäistä säteilyn ilmaisinta (kuva 4.7 b). Pinnan nousu vähentää nytkin ilmaisimelle tulevan säteilyä. Tästä voidaan päätellä säiliön täyttöaste. Pinnan korkeusmittareiden pistemäisten ^{137}Cs -lähteiden tyypillinen aktiivisuus on 1,85–18,5 GBq ja ^{60}Co -sauvalähteiden 37–370 MBq. Joskus on edullista sijoittaa joko säteilylähde tai ilmaisim tai molemmat säiliön sisäpuolelle.

Radiometrinen tiheysmittari

Radiometrisellä tiheysmittarilla voidaan mitata putkessa kulkevan lietteen, lipeän tai muun aineen tiheys. Putken toiselle puolelle sijoitetaan säteilylähde ja vastakkaiselle puolelle ionisaatiokammio tai tuikeilmaisim säteilyilmaisimeksi. Säteily vaimenee kulkiessaan putken läpi. Vaimeneminen riippuu putkessa kulkevan aineen tiheydestä. Jos laite on sopivasti kalibroitu putkessa kulkevan aineen tiheys saadaan selville havaitsemalla putken läpi päässeeseen säteilyn intensiteetti (kuva 4.8 a). Tiheysmittareissa käytetään yleensä ^{137}Cs -lähteitä, jonka aktiivisuus tavallisesti on välillä 370 MBq – 1,11 GBq. Cesiumlähdettä käytetään, koska pitkän puoliintumisajan vuoksi säteilylähteen heikkeneemisestä johtuva mittaustuloksen muuttuminen on vähäistä. Nykyisissä laitteissa säteilylähteen heikkenemiskorjaus mittaustulokseen tapahtuu automaattisesti, aikaisemmin korjaus tehtiin käsin ker-



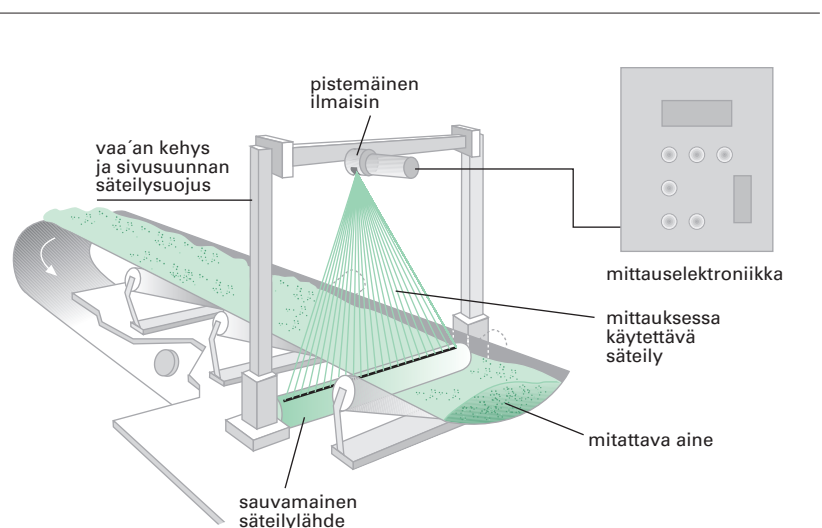
KUVAT 4.8 a ja 4.8 b Tiheysmittari

- a) paksussa putkessa, (mittausväli putken halkaisija).
b) ohuessa putkessa, (mittausväliä pidennetty putkea taivuttamalla).

ran kuukaudessa. Cesiumlähde valitaan myös siksi, että jo pienikin muutos tiheydessä saa aikaan riittävän muutoksen ilmaisimelle tulevaan säteilyyn. Jos putken halkaisija on hyvin pieni (noin 50 mm), voidaan mittaussäilyä suurentaa taivuttamalla putkea, kuten kuvassa 4.8 b on esitetty tai käyttää säteilylähteenä ^{241}Am -nuklidia, jonka lähettämällä 60 keV gammasäteilyllä voidaan mitata pieniä tiheyden muutoksia myös ohuessa putkessa. Tiheysmittarin tarkkuus riippuu siitä, miten pieniä säteilymäärän muutoksia ilmaisin pystyy luotettavasti havaitsemaan. Radiometrisen mittauksen etu on, että mitattavan aineen kemialliset ja useimmat fysikaaliset ominaisuudet, esimerkiksi lämpötila, paine, viskositeetti ja johtokyky eivät vaikuta mittaustulokseen. Tiheysmittarilta saatavaa viestiä voidaan käyttää suoraan kyseisen teollisuusprosessin ohjaukseen.

Kuljetinvaaka

Radiometrisellä kuljetinvaakalla mitataan hihna- tai ruuvikuljettimen kuljettama ainemäärä. Laite muodostuu hihnan tai ruuvin vastakkaisille puolille sijoitetusta säteilylähteestä ja säteilynilmaisimesta (kuva 4.9). Säteilylähteestä lähtee hihnan tai ruuvin levyinen säteilykeila kohti ilmaisinta, joka tässä tapauksessa yleensä on joko tukeilmaisimien tai ionisaatiokammio. Kuljettimella, ilmaisimen ja säteilylähteen välissä, oleva materiaali vaimentaa osan säteilystä. Kun kuljettimella oleva ainemäärä lisääntyy, säteily vaimenee enemmän. Säteilyn vaimeneminen riippuu siis mitattavan aineen tiheydestä, ainekerroksen paksuudesta



KUVA 4.9 Hihnavaaka

ja leveydestä eli kuljettimella olevan aineen massasta kuljettimen pituusyksikköä kohti (kg/m). Kun tunnetaan aineen kulkunopeus kuljettimella, saadaan selville hihnan tai ruuvin aikayksikössä kuljettava ainemäärä. Säteilylähteessä voidaan käyttää mitattavasta materiaalista riippuen ^{241}Am -, ^{137}Cs - ja ^{60}Co -nuklideja.

Kuljettimen alapuolella on sauvamainen säteilylähde ja yläpuolella pistemäinen tuikeilmaisoin. Kuvaan on piirretty vain mittauksessa käytettävä osuus säteilykeilasta. Todellisuudessa säteilyä suuntautuu kaapeana keilana myös muualle. Vaa'an kehys on lyijytetty ja suojaa säteilyltä sivusuunnissa.

Kosteusmittari

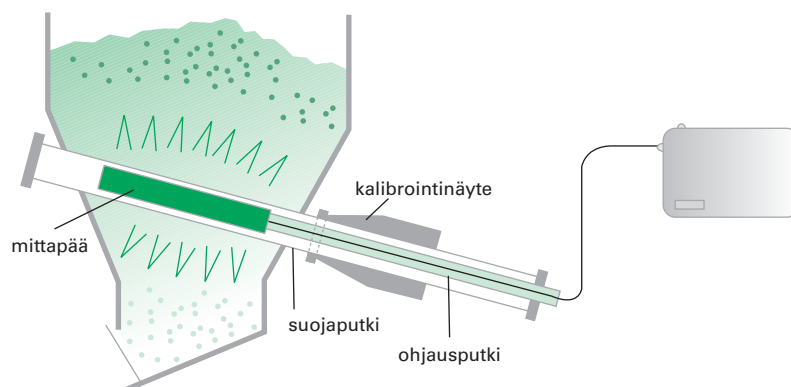
Radiometrisen kosteusmittarin toiminta perustuu neutroneiden ja mitattavan aineen sisältämässä vedessä olevien vetyatomien väliseen vuorovaikutukseen. Neutronin massa on suunnilleen yhtä suuri kuin vety-ytimen (protonin) massa. Mittaustilanteessa kaikki muut ytimet ovat 10–200 kertaa raskaampia. Jos nopea neutroni törmää raskaaseen atomiytimeen, se siroaa siitä elastisesti ilman merkittävää energian menetystä. Jos neutroni törmää vety-ytimeen, neutroni menettää sitä vastoin yhdessä törmäyksessä keskimäärin puolet liike-energiastaan. Jo noin 20 törmäyksen jälkeen nopeasta neutronista on tullut terminen neutroni. Jos samanlainen nopea neutroni törmää happitai lyijy-ytimiin, tarvitaan neutronin termalisoitumiseen noin 150 tai 2 000 törmäystä. Keskimääräinen matka, jonka neutroni kulkee lähteestä lähdettyään ennen termiseksi tuloa, on vedyssä hyvin paljon lyhyempi kuin muissa alkuaineissa. Termiset neutronit siroavat ytimestä toiseen, kunnes ytimet viimein sieppaavat ne. Myös neutronisieppaukseen on vetypitoisuudella merkittävä vaikutus. Säteilylähteen ympärille syntyy hitaiden neutroneiden pilvi, jossa neutronitiheys pienenee etäisyyden kasvaessa. Neutronitiheyden pienenemiseen vaikuttaa etäisyyden lisäksi myös neutronien absorboituminen. Neutronipilvi on sitä tiheämpi ja painottuu sitä lähemmäksi lähdettä mitä suurempi vetypitoisuus on.

Neutronilähteen viereen sijoitettu termisille neutroneille herkkä ilmaisimain, joka yleisimmin on BF_3 -verrannollisuuslaskuri, antaa näyttämän, joka on likimain verrannollinen ilmaisimen lähellä olevan aineen vetypitoisuuteen (kuva 4.10). Jos kohdemateriaali ei itse sisällä sitoutunutta vetyä, neutronit hidastuvat tällöin pääasiassa materiaalissa olevan kosteuden (veden) sisältämien vety-ytimien vaikutuk-

sesta, ilmaisain antaa aineen kosteusprosenttiin verrannollisen lukeman. Tutkittavassa aineessa voi myös olla sitoutunutta vetyä tai kidevettä. Silloinkin neutroneilla tapahtuva kosteusmittaus on mahdollista, jos kuivan materiaalin koostumus ei vaihtelee. Sitoutunut vety aiheuttaa kuitenkin mittariin tietyn ”pohjalukeman”. Jos sitoutuneen vedyn osuus vaihtelee, heikkenee kosteusmittauksen tarkkuus (yksi painoprosentti vetyä aiheuttaa saman vaikutuksen kuin yhdeksän painoprosenttia vettä). Koska eri aineet hidastavat eri tavalla neutroneja, on kosteusmittari kalibroitava kullekin aineelle erikseen. Edellä kuvattu mittausmenetelmä soveltuu hyvin koksen ja soran kosteuden mittaamiseen, mutta huonosti esimerkiksi hakkeen tai turpeen kosteuden mittaamiseen, koska niiden sisältämää vetymäärää ei tunneta riittävän tarkasti ja se lisäksi vaihtelee eri puolajaeilla ja turvetyypeillä. Neutroneihin perustuvan kosteusmittauksen etu on, että kosteus mitataan suuresta tilavuudesta. Lisäksi mittaus on jatkuvaa ilman erillisiä näytteenottoja. Ilmaisimelta saatavaa viestiä voidaan myös käyttää kyseessä olevan prosessin ohjaukseen.

Menetelmällä on käyttöä myös maaperän kosteuden (ja öljypitoisuuden) mittaamisessa. Esimerkiksi Kansainvälisen atomienergiajärjestön IAEA:n kehitysprojekteihin on aina kuulunut tämän alan tekninen asiantuntija-apu kuivuudesta kärsivien maiden maankäytön suunnittelua varten.

Pelko siitä, että mitattava aine aktivoituisi neutronien vaikutuksesta haitallisessa määrin on aiheeton, sillä kosteusmittareissa käytettävien



KUVA 4.10 Kosteusmittari sorasiilossa

neutronilähteiden neutronituotto on vähäistä ja lisäksi aine, johon neutronit vaikuttavat vaihtuu jatkuvasti. Myöskään tavallisesti mitattavat aineet (koksi ja sora) eivät sisällä alkuaineita, joista niiden mahdollisesti aktivoituessa syntyisi pitkäikäisiä radionuklideja.

Pinta-alamassamittari

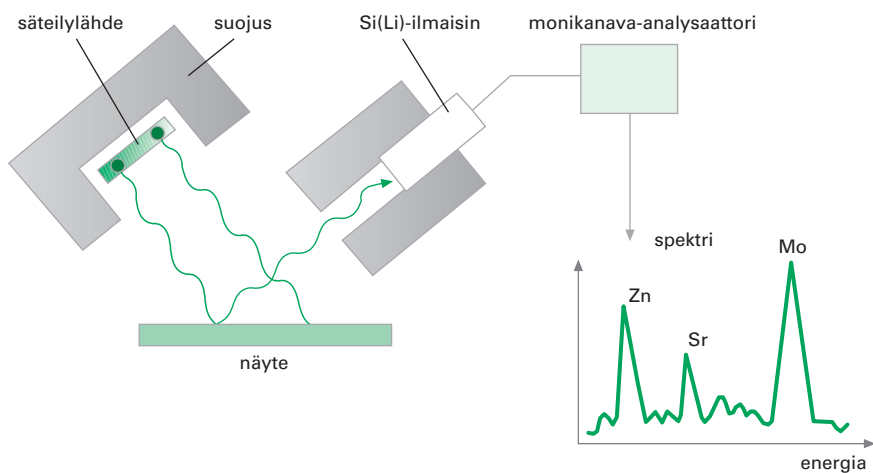
Valmistettaessa paperia, kartonkia tai muovikalvoja on beetasäteilyn absorptioon perustuva pinta-alamassamittari yksi tärkeimmistä mittalaitteista. Mittalaitteessa on yleensä paperi- tai muun vastaavan radan alapuolella säteilylähdeosa ja yläpuolella säteilyn ilmaisimen. Ilmaisimena käytetään yleisesti ohutikkunaista ionisaatiokammiota. Käytännössä mittalaite rakennetaan siten, että säteilylähdettä ja ilmaisinta voidaan liikuttaa edestakaisin erityisessä mittakehyksessä paperiradan poikittaissuunnassa. Jotta mittaus olisi tarkka, täytyy lähteen ja ilmaisimen keskinäisen asennon ja etäisyyden pysyä tarkoin vakiona. Tämä asettaa mittakehyksen rakenteelle hyvin suuria vaatimuksia etenkin leveillä paperikoneilla. Koska beetasäteily vaihtelee erittäin tehokkaasti kulkiessaan väliaineen läpi, aiheuttaa pienikin muutos lähteen ja ilmaisimen välissä olevan aineen pinta-alamassassa merkittävän muutoksen ilmaisimesta saatavaan viestiin. Mittaustulokseen vaikuttavat merkittävästi myös mittausvälissä olevan ilman paineen ja lämpötilan muutokset sekä ilmaisimen ja lähteen ikkunoihin kertynyt lika. Kun laite on oikein kalibroitu ja kaikki virhetekijät on otettu huomioon ja korjattu, tulokseksi saadaan paperin pinta-alamassa (g/m^2) ja sen vaihtelu radan poikittaissuunnassa. Pinta-alamassamittarin, kosteusmittarin ja muiden paperin ominaisuuksien mittaamiseen tarvittavien antureiden antamia mittaustuloksia käytetään suoraan paperikoneen säätöön mahdollisimman tasalaatuisen paperin aikaansaamiseksi.

Säteilysuojelu radiometristen laitteiden yhteydessä

Radiometriset mittalaitteet pyritään aina rakentamaan ja sijoittamaan siten, että ne aiheuttavat mahdollisimman vähän haittaa tai vaaraa käyttäjilleen. Tämän takia laitteissa käytetään aina umpilähteitä, jotka on sijoitettu massiivisen yleensä lukittavalla sulkimella varustetun säteilysuojuksen sisälle. Säteilylähteen aktiivisuus valitaan mahdollisimman pieneksi kyseisen mittaustilanteen ja käytettävissä olevan ilmaisimen herkkyuden mukaan ottaen kuitenkin huomioon laitteelle tarkoitettu käyttöaika. Esimerkiksi nykyaikaisen pintakytkimen ilmaisimelle

tulevan annosnopeuden muuttuminen arvosta 5 $\mu\text{Sv/h}$ taustasäteilyn tasolle (noin 0,1 $\mu\text{Sv/h}$), antaa riittävän tiedon rajapinnan ohittamisesta. Jos kielletään oleskelu yhtä metriä lähempänä säteilylähdetta ja rajoitetaan vuotuinen oleskeluaika metrin päässä laitteesta korkeintaan 133 tuntiin, ei ole mahdollista ylittää muille kuin säteilytönte-kijöille asetettua vuosiannosrajaa 1 mSv. Käytännössä laitteet sijaitsevat yleensä paikoissa, joiden läheisyydessä ei työskennellä vaki-tuisesti, joten mittalaitteista aiheutuvat säteilyannokset jäävät erittäin pieniksi.

Umpilähteitä sisältävien mittalaitteiden rakenteeseen ja käyttöön liit-tyviä ohjeita ja määräyksiä on annettu edellä mainituissa standar-deissa ja Säteilyturvakeskuksen antamassa ohjeessa ST 5.1. Mitta-laitteiden käyttö edellyttää aina laitteen käyttöön oikeuttavan turval-lisuusluvan hakemista Säteilyturvakeskukselta. Säteilyturvakeskus myös tarkastaa laitteiden asennuksen ja niihin liittyvät turvalaitteet ja -merkinnät. Kun säteilylähteitä poistetaan käytöstä tai toiminta lo-petetaan paikassa, jossa on käytetty umpilähteitä sisältäviä mittalait-teita, on erikoisesti huolehdittava siitä, että säteilylähteet siirretään paikkaan, josta ne eivät katoa. Laitteen käyttäjän vastuu säteilyläh-teestä päättyy vasta sitten, kun säteilylähde on luovutettu joko toi-selle turvallisuusluvan haltijalle tai Säteilyturvakeskuksen jäteva-rastoon.



KUVA 4.11 Isotooppiherättäisen röntgenfluoresenssianalysaattorin toimintaperiaate

Säteily virittää näytteessä olevat alkuaineet lähettämään karakteristista röntgensäteilyä, joka havaitaan Si(Li)-ilmaisimella. Näytteen sisältämät alkuaineet tunnistetaan spektristä.

4.5 | Röntgenanalysaattorit

Valmistettaessa korkealaatuista terästä analysoidaan seosaineiden ja epäpuhtauksien määrä ja laatu, jotta voidaan olla varmoja tuotteen laatuvaatimusten täyttymisestä. Raaka-aineiden hintojen noustessa on kannattavaa analysoida ja ottaa talteen metalliromua ja muita raaka-aineita, joilla ei aikaisemmin ole ollut käyttöä. Kontrollimittauksin valvotaan myös myrkyllisten aineiden, esimerkiksi kadmiumin esiintymistä leikkikaluissa ja raskasmetallien pitoisuuksia ravintoaineissa. Edellä olevissa esimerkeissä on yhteistä materiaalianalyysin tarve. Halutaan tietää mitä ja kuinka paljon alkuaineita näyte sisältää. Jos halutaan tarkka kvalitatiivinen tai kvantitatiivinen analyysi, tehdään spektrometrinen tutkimus röntgenfluoresenssianalyysaattorilla. Analyysi tehdään siten, että röntgensäteilyllä säteilytetään näytettä, jolloin näytteen alkuaineiden atomit virittyvät ja lähettävät niille ominaista karakteristista röntgensäteilyä. Virittävän säteilyn lähteenä voidaan käyttää joko röntgenputkea tai pienienergistä gamma- tai röntgensäteilyä lähettävää nuklidia, esimerkiksi ^{55}Fe , ^{109}Cd , ^{241}Am tai ^{244}Cm . Käyttämällä radionuklidilähteitä laitteesta saadaan pienikokoinen ja helposti kuljetettava, jotta laitetta voidaan käyttää esimerkiksi romukentällä metalliromun analysointiin. Määrittämällä ja analysoimalla näytteen lähettämä röntgensäteilyspektri, saadaan selville näytteen sisältämät alkuaineet ja niiden pitoisuus.

Joissakin tapauksissa tarvitaan äärimmäisen tarkkoja selvityksiä aineen fysikaalisista ominaisuuksista esimerkiksi kiderakenteesta ja hi-laparametreista. Tällöin käytetään röntgendiffraktiolaitetta, jolla tutkitaan aallonpituudeltaan tunnetun röntgensäteilyn taittumista sen kohdatessa tutkittavan näytteen.

Säteilysuojelu röntgenanalysaattoreiden yhteydessä

Useimmat nykyaikaiset röntgenanalyysilaitteet ovat täysin suojattuja. Tämä tarkoittaa sitä, että koko laitteisto on sijoitettu suljettuun koteloon ja suojattu siten, että laitteen käyttäjä ei voi päästä kosketukseen säteilykeilan kanssa. Röntgendiffraktio- ja -spektrometrialaitteita voidaan käyttää normaaleissa laboratoriotiloissa. Huoneen ulkopuolelle on tarvittaessa asennettava punainen merkkivalo, joka palaa röntgenlaitteen suurjännitteen ollessa kytkettynä.

Röntgenanalyysilaitteita huollettaessa on joskus välttämätöntä tehdä säätö- tai huoltotoimia säteilykannan välittömässä läheisyydessä. Joskus joudutaan jopa ohittamaan laitteessa olevia turvakytkimiä. Tällaisissa tilanteissa on erikoisesti varottava, ettei mikään kehon osa joudu säteilykeilaan. Huoltotoimet on pyrittävä tekemään siten, että röntgenlaitetta käytetään mahdollisimman pienellä jännitteellä ja virralla, jolloin laitteessa syntyvän säteilyn määrä on pienin mahdollinen.

Onnettomuudet röntgenanalyysilaitteita käytettäessä johtuvat usein vääristä työmenetelmistä. Koska annosnopeudet röntgenputken säteilykannan läheisyydessä ovat hyvin suuria, 50–500 Sv/min, johtaa lyhytaikainenkin altistus huomattavaan säteilyannokseen.

Radionuklidiherätteiset röntgenanalyysilaitteet, joissa käytetään pienienergistä säteilyä lähettäviä radionuklideja, voidaan helposti suojata rakenteellisesti siten, että niiden aiheuttama säteilyvaara on hyvin pieni. Koska laitteisiin joskus liittyy myös sellaisia mittapäitä, joita käytettäessä on mahdollista joutua myös säteilykeilaan, laitteen turvallinen käyttö edellyttää käyttöohjeiden tarkkaa noudattamista.

4.6 | Kiihdyttimet

Kiihdyttimet tutkimuksessa

Suurienergistä hiukkas- tai röntgensäteilyä tarvitaan muun muassa radionuklidien valmistukseen, ydinrakenteen tutkimukseen, aineiden fysikaalisten ominaisuuksien tai kemiallisen olomuodon muuttamiseen ja paksujen kappaleiden läpivalaisuun. Suurienergistien hiukkasten aikaansaamiseksi on kehitetty erilaisia hiukkaskiihdyttimiä, joilla varauksiset hiukkaset voidaan kiihdyttää hyvin suuriin nopeuksiin. Kovaa röntgensäteilyä (jarrutussäteilyä) saadaan aikaan kiihdyttämällä elektroneja, joiden annetaan törmätä tarkoitusta varten rakennettuun kohtioon. Nopeat varauksiset hiukkaset aiheuttavat kohtiomateriaalisissa myös vaurioita, jotka muuttavat kyseisen aineen ominaisuuksia.

Radionuklideja tuotetaan yleensä syklotronilla, mutta myös Van de Graaffin generaattoria on käytetty tähän tarkoitukseen eräissä erityistapauksissa. Näissä laitteissa kiihdytetään varaukseltaan positiivisia tai negatiivisia hiukkasia, esimerkiksi protoneja, alfahiukkasia tai raskaampia ioneja. Kun hiukkassuihkun annetaan törmätä kohtioon, täs-

sä tapahtuu ydinreaktioita, joiden tuloksena syntyy haluttuja radioaktiivisia aineita. Kiihdytettävän hiukkasen liike-energian on ylitettävä kyseisen ydinreaktion kynnyksenergia. Syklotronista saatavan protonisuihkun energia on tyypillisesti 10–100 MeV. Moniasteisen Van de Graaffin generaattorin tuottaman hiukkassuihkun energia on kiihdytettävien ionien varaustilasta riippuen yhdestä useihin kymmeneen megaelektronivolttiin.

Suomessa on tutkimuskäytössä Helsingin yliopiston fysiikan laitoksen kaksiasteinen Van de Graaffin generaattori eli tandemkiihdytin ja kemian laitoksen radiokemian osaston pieni syklotroni sekä Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen syklotroni. Åbo Akademin fysiikan laitoksen syklotronia käytetään pääasiassa viereisen yliopistosairaalan tarvitsemien lyhytikäisten radionuklidien tuotantoon. Myös Turun yliopistosairaalassa on pieni syklotroni lyhytikäisten isotooppien tuotantoa varten.

Paksujen kappaleiden läpivalaisuun tai kuvaukseen voidaan käyttää säteilyä, jota saadaan elektronikiihdyttimestä, beetatronista tai lineaarikiihdyttimestä. Näissä laitteissa elektronin energia on 1–15 MeV ja syntyvän röntgensäteilyn maksimienergia vastaavasti 1–15 MeV.

Kiihdyttimellä tuotettujen ammusydinten ja kohtioydinten välisissä ydinreaktioissa saadaan aikaan pysymättömiä ytimiä, jotka hajoavat ”välittömästi” lähettäen gammasäteilyä. Analysoimalla säteilyn ominaisuuksia voidaan tehdä päätelmiä lähettäjädinten ominaisuuksista. Ydintilojen ominaisuuksista herkimmin kertova suure on niiden elinaika. Nykyaikaisella mittaustekniikalla pystytään mittaamaan elinaikoja, jotka ovat vain 10^{-15} s, jonka kuluessa valo ehtii kulkea vain 0,0003 mm. Vertailun vuoksi mainittakoon, että valo tulee Kuusta Maahan noin sekunnissa.

Kiihdyttimillä saatavia ionisuihkuja voidaan käyttää myös aineen alkuaineostoituksen selvittämiseen. Aine, jota pommitetaan kiihdyttimellä tuotetuilla nopeilla ioneilla, lähettää tämän aineen alkuaineille ominaista röntgensäteilyä. Analysoimalla näin synnytettyä röntgensäteilyä saadaan selville näytteen alkuaineostoitus. Tällä menetelmällä voidaan määrittää hivenainepitoisuus mitä erilaisimmista näytteistä. Ionipommituksen herättämän röntgensäteilyn avulla voidaan selvittää esimerkiksi öljyväripigmenttien koostumusta, ja selvittää esimerkiksi onko jokin maalaus aito vai väärennös. Lääketieteessä menetelmää on sovellettu muun muassa kudoksen-, luu-, seerumi- ja verinäytteiden alkuaineanalyyseihin.

Protoneilla aiheutettua röntgenemissiota ei voi kuitenkaan käyttää keveimpien alkuaineiden analysointiin. Tämä johtuu siitä, että syntyvän röntgensäteilyn energia jää röntgenilmaisimien erotusrajaa pienemmäksi. Joissakin tapauksissa voidaan tällöin turvautua protonipommituksen aiheuttaman gammasäteilyn havainnoimiseen. Esimerkiksi ainoa tarkka hampaiden fluoripitoisuuden määrittäminen perustuu tähän menetelmään.

Eräs mahdollisuus tunnistaa keveitä alkuaineita on analysoida neutroneilla aktivoitujen näytteiden lähettämää säteilyä. Tähän tarkoitukseen on käytetty 150–500 keV jännitteellä toimivia sähköstaattisia kiihdyttimiä, neutronigeneraattoreita. Näistä enemmän tämän kirjasarjan osan 1, ”Säteily ja sen havaitseminen” luvussa 1.6.

Helsingin yliopiston tandemkiihdyttimen pääasiallinen käyttöala on materiaalitutkimus. Kohtioon osuvat nopeat ionit tunkeutuvat kohtioatomien väleihin muuttaen aineen mekaanisia, sähköisiä ja optisia ominaisuuksia. Ionipommitusta on käytetty muun muassa pinnan kovouden ja korroosionkesto-ominaisuuksien parantamiseen. Sovellutuksista mainittakoon esimerkiksi tekonivelten kulutusta kestävien pinnoitteiden tuottaminen sekä nanokiteisten päällysteiden, kuitujen ja seostettujen puolijohteiden valmistaminen.

Säteilysuojelu kiihdyttimien käytössä

Annosnopeudet kiihdyttimien ympärillä saattavat nousta hyvin suuriksi. Usein suurin ulkoisen säteilyn lähde ei ole suinkaan kohtio, vaan kaikista materiaaleista, joihin kiihdytettävät ionit kiihdytyksen aikana törmäävät, irtoaa elektroneja, jotka kiihtyvät vastavirtaan ja synnyttävät jarrutussäteilyä, samoin ionilähde saattaa olla jarrutussäteilyn lähde. Tämän vuoksi laitteistot sijoitetaan aina massiivisten betonirakenteiden sisälle. Kiihdytinlaboratoriossa on oltava riittävästi säteilymittareita, joilla voidaan monitoroida kiihdytintä ympäröivät tilat ja määrittää ne alueet, joilla oleskelu on kielletty tai joilla oleskeluaikaa on rajoitettava.

Kiihdyttimet teollisuudessa

Ionisoivaa säteilyä voidaan käyttää myös muovien polymerisointiin. Lämpöä, UV-säteilyä ja liuottimia käyttävät polymerisointimenetelmät vaativat paljon energiaa ja tilaa. Lisäksi liuottimien haihduttaminen

tuottaa haitallisia kaasuja ympäristöön. Näistä haitoista päästään, kun käytetään muoviyhdisteitä, jotka kovettuvat ionisoivan säteilyn vaikutuksesta. Säteilylähteenä käytetään tällöin elektronikiihdytintä, jossa kiihdytysjännite on 150–400 kV.

Eräs sovellus on paperin päällystäminen muovikalvolla. Tällöin kiihdyttimestä lähtevä elektronisuihku levitetään tuoteradan levyiseksi ja päästetään ohuen ikkunan läpi typpikaasussa olevan tuotteen pinnalle levitettyyn pinnoitemateriaaliin. Säteilyn vaikutuksesta muovi polymerisoituu ja tarttuu paperiin.

Muovien polymerisointiin tarkoitettujen kiihdyttimien on rakennettu ja suojattu yleensä siten, että ne eivät normaalissa toiminnassa aiheuta säteilyvaaraa.

Elektronikiihdytintä on käytetty myös tuhohyönteisten hävittämiseen maahantuotavasta viljasta. Tällöin satamassa oleva kiihdytin on sijoitettu laivasta varastoon johtavan viljakuljettimen yhteyteen.

4.7 | Avolähteiden käyttö

Radioaktiivisia aineita käytetään avolähteinä isotooppilääketieteen lisäksi korkeakoulujen sekä tutkimus- ja teollisuuslaitosten radionuklidilaboratorioissa tutkimustyössä merkkiaineina. Tutkimustyössä yleisimmin käytettäviä radionuklideja ovat ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , ^{35}S , ^{51}Cr ja ^{125}I . Kun radioaktiivisia aineita käytetään merkkiaineena tutkimustyössä, käytettävät määrät ovat yleensä melko pieniä.

Radioaktiivisia aineita käytetään merkkiaineina myös laboratorion ulkopuolella muun muassa teollisuuslaitoksissa virtausmittauksissa ja seurattaessa teollisuuden prosessien kulkua.

Suomessa toimii yksi radioaktiivisia lääkeaineita valmistava yritys ja muutamia yrityksiä, jotka valmistavat leimattuja yhdisteitä käytettäväksi tutkimustyössä merkkiaineina.

Säteilylainsäädäntö ja turvallisuuslupa

Säteilylainsäädännöstä ja turvallisuuslupamenettelystä on kerrottu enemmän tämän kirjan luvussa 5. Ainoastaan avolähteiden käyttöä

koskevia turvallisuusmääräyksiä on otettu tarkemmin esille tässä luvussa.

4.8 | Radioaktiivisten aineiden vapaarajat

Peruskriteerit vapaarajoille ja säteilyn käytön vapauttamiselle turvallisuusluvasta ja ilmoitusvelvollisuudesta ovat seuraavat:

- Ihmisille aiheutuvien säteilyriskien on oltava niin vähäiset, että kyseiseen säteilyn käyttöön ei ole tarkoituksenmukaista soveltaa turvallisuuslupa- ja ilmoitusmenettelyä.
- Väestön säteilyaltistuksen on oltava kokonaisuudessaan niin pieni, ettei toimintaa vallitsevissa olosuhteissa ole tarkoituksenmukaista sisällyttää valvonnan piiriin.
- Säteilysuojelun kannalta toiminta on merkityksetöntä ja todennäköisyys, että siitä aiheutuisi tilanteita, joiden johdosta edellä mainitut kriteerit eivät täytyisi, on merkityksettömän pieni.

Säteilyn käyttö voidaan vapauttaa edellä esitettyjä peruskriteerejä noudattaen ilmoitusvelvollisuudesta ja turvallisuusluvasta, jos seuraavat lisävaatimukset täyttyvät kaikissa mahdollisissa olosuhteissa:

- Efektiivinen annos, jonka kenen tahansa väestöön kuuluvan henkilön arvioidaan saavan kyseisestä säteilyn käytöstä, on enintään 10 μ Sv vuodessa.
- Yhden vuoden aikana kyseisestä säteilyn käytöstä aiheutuva väestön efektiivinen annos kokonaisuudessaan on enintään 1 mSv, tai säteilysuojelun optimoinnin arviointi osoittaa, että vapauttaminen on parempi vaihtoehto kuin ilmoitus- tai turvallisuuslupamenettely.

Säteilyn käyttöä varten ei tarvita turvallisuuslupaa jäljempänä mainittuja poikkeuksia lukuun ottamatta eikä siitä tarvitse tehdä ilmoitusta, jos toimintaan liittyvän radioaktiivisen aineen aktiivisuus tai aktiivisuuspitoisuus on pienempi tai yhtä suuri kuin kyseiselle radionuklidille asetettu vapaaraja. Radioaktiivisten aineiden vapaarajat on annettu ohjeessa ST 1.5.

Kun kyseessä on radionuklidiseos tai useampi kuin yksi radionuklidi, säteilyn käyttöä varten ei tarvita turvallisuuslupaa eikä siitä tarvitse tehdä ilmoitusta, jos seuraava ehto toteutuu:

$$\sum_k \frac{A_k}{A_{E,k}} \leq 1 \quad \text{tai} \quad \sum_k \frac{C_k}{C_{E,k}} \leq 1 \quad (4.1)$$

Kaavoissa

A_k on radionuklidin k aktiivisuus,

$A_{E,k}$ on aktiivisuuden vapaaraja radionuklidille k ,

C_k on radionuklidin k aktiivisuuspitoisuus ja

$C_{E,k}$ on aktiivisuuspitoisuuden vapaaraja radionuklidille k .

Vapaarajoja ei sovelleta säteilyn käyttöön, vaan turvallisuuslupa on oltava aina, kun kyseessä on

- säteilylain 38 §:ssä tarkoitettu säteilyn lääketieteellinen käyttö
- radioaktiivisten lääkeaineiden valmistus, kauppa sekä tuonti ja vienti
- radioaktiivista ainetta sisältävien kulutustavaroiden valmistus sekä tuonti ja vienti
- radioaktiivisten aineiden antaminen eläimille diagnostiikassa, hoidossa tai tutkimustarkoituksessa.

Vapaarajoja ei sovelleta silloin, kun kyseessä on ilmoitusvelvollisuuden tai turvallisuuslupamenettelyn alaisista toiminnoista peräisin olevien radioaktiivisten materiaalien loppusijoitus, kierrätys tai uudelleenkäyttö. Näitä toimintoja varten on oltava Säteilyturvakeskuksen hyväksyntä, jolla kyseiset aineet tai materiaalit vapautetaan säteilylainsäädännön vaatimuksista. Vapaarajoja ei sovelleta myöskään luonnon radioaktiivisia aineita sisältävien materiaalien hyödyntämiseen.

4.9 Radionuklidien vaarallisuusluokitus

Radionuklidit on luokiteltu niiden säteilymyrkyllisyyden perusteella neljään vaarallisuusluokkaan.

Vaarallisuusluokka 1						
210Pb	210Po	226Ra	228Ra	227Ac	228Th	230Th
232U	238Pu	240Pu	241Pu	242Pu	241Am	244Cm
252Cf						
Vaarallisuusluokka 2						
60Co	68Ge	90Sr	106Ru	110mAg	124I	125I
131I	134Cs	137Cs	144Ce	151Sm	152Eu	210Bi
Vaarallisuusluokka 3						
14C	22Na	24Na	32P	33P	35S	36Cl
43K	45Ca	46Sc	54Mn	52Fe	55Fe	59Fe
57Co	58Co	63Ni	67Cu	62Zn	65Zn	67Ga
72Ga	73As	76As	75Se	82Br	84Rb	86Rb
82Sr	85Sr	89Sr	88Y	90Y	95Zr	95Nb
99Mo	103Ru	103Pd	111In	113Sn	124Sb	125Sb
132Te	123I	132I	133Ba	140Ba	140La	141Ce
147Pm	153Sm	153Gd	166Ho	170Tm	169Yb	182Ta
185W	187W	188W	186Re	191Os	192Ir	198Au
197Hg	203Hg	204Tl	237Pu			
Vaarallisuusluokka 4						
3H	11C	18F	51Cr	56Mn	64Cu	68Ga
99mTc	113mIn	165Dy	193Pt	201Tl		

TAULUKKO 4.4. Yleisimmin käytettävien radionuklidien vaarallisuusluokitus

Taulukossa 4.4 on esitetty yleisimmin käytettävien radionuklidien vaarallisuusluokat. Säteilyturvakeskus antaa tarvittaessa vaarallisuusluokituksen muille radionuklideille.

4.10 | Vaatimukset radionuklidilaboratorioille

Radioaktiivisten aineiden käytön turvallisuuden kannalta on tärkeää, että jo laboratorion tai muun käyttöpaikan suunnittelussa otetaan huomioon työn laadusta ja käytettävistä radionuklideista johtuvat säteilyturvallisuusvaatimukset. Suunnittelun lähtökohtana on, että työskentely laboratoriossa on turvallista, radioaktiivisten aineiden päästöt ympäristöön jäävät vähäisiksi sekä normaali- että poikkeustilanteissa ja radioaktiivisten aineiden joutuminen laboratoriotiloista sivullisten haltuun on estetty.

Radionuklidilaboratoriolla tarkoitetaan laboratoriota, jossa käsitellään radioaktiivisia aineita avolähteinä. Radionuklidilaboratoriot luokitetaan C-, B- ja A-tyyppin laboratorioiksi. Tiettyyn toimintaan vaadittavan laboratoriotyyppin määräävät käytettävien radionuklidien vaarallisuusluokka, kerralla käsiteltävä aktiivisuus ja työn laatu. Radionuklidilaboratorioissa on myös määriteltävä ja rajattava valvonta- ja tarkkailualueet siten kuin ohjeessa ST 1.6 on esitetty.

Kun radioaktiivisia aineita käsitellään käyttäen tavanomaisia kemiallisia menetelmiä, laboratorio on varustettava joko C-, B- tai A-tyyppin laboratoriovaatimuksia vastaavaksi ohjeessa ST 6.1 esitettyjen aktiivisuusrajojen mukaisesti. Jos kerralla käsiteltävä aktiivisuus on pienempi kuin vapaaraja, laboratoriolle ei aseteta rakenteellisia säteilyturvallisuuksivaatimuksia.

Radionuklidin vaarallisuusluokka*	Laboratoriotyyppi ja kerralla käsiteltävä aktiivisuus		
	C-tyyppi	B-tyyppi	A-tyyppi**
Vaarallisuusluokka 1	< 0,5 MBq	0,5 MBq – 0,5 GBq	> 0,5 GBq
Vaarallisuusluokka 2	< 5 MBq	5 MBq – 5 GBq	> 5 GBq
Vaarallisuusluokka 3	< 50 MBq	50 MBq – 50 GBq	> 50 GBq
Vaarallisuusluokka 4	< 500 MBq	500 MBq – 500 GBq	> 500 GBq

* Yleisimpien radionuklidien vaarallisuusluokitus on taulukossa 4.4.

** Enimmäisaktiivisuudet määrätään turvallisuusluvassa.

TAULUKKO 4.5 Laboratoriotyyppin määräytyminen käytössä olevien radionuklidien vaarallisuusluokan ja kerralla käsiteltävän aktiivisuuden perusteella

Taulukossa 4.5 esitettyjä raja-arvoja sovelletaan siten, että ne kerrotaan työn laadun mukaan määräytyvillä muuntokertoimilla. Eri toiminoille käytetään seuraavia muuntokertoimia:

- Radioaktiivisten nesteiden varastointi 100
- Nesteiden yksinkertainen käsittely 10
- Tavanomainen kemiallinen käsittely 1
- Nesteiden monimutkainen käsittely, jossa on roiskumisen tai haihtumisen vaara sekä kuivan aineen yksinkertainen käsittely ja eläinrokotukset 0,1
- Kuivan aineen käsittely, jossa on pölyämisen vaara 0,01

C-tyyppin laboratorio on tarkoitettu pienten aktiivisuuksien käsittelyyn. Rakenteellisesti ja varustetasoltaan C-tyyppin laboratorio vastaa nykyaikaista, hyvin suunniteltua kemian laboratoriota. B-tyyppin laboratorio on erityisesti radioaktiivisten aineiden käsittelyyn suunniteltu laboratorio. A-tyyppin laboratorio on radioaktiivisten aineiden laajamittaiseen käyttöön tarkoitettu laboratorio. A-tyyppin laboratorioissa käytettävien radioaktiivisten aineiden enimmäismäärät määrätään turvallisuusluvas- sa ottaen huomioon ympäristöolosuhteet, laboratorion turvajärjestelmät, käytettävien radionuklidien ominaisuudet ja aktiivisuudet sekä muut säteilyturvallisuuteen liittyvät tekijät. Radiofarmasian laboratorion tulee täyttää C- tai B-tyyppin laboratoriota koskevat vaatimukset.

Radionuklidilaboratoriota suunniteltaessa on otettava huomioon käytettävän aktiivisuuden lisäksi radionuklidien säteilyvaarallisuusluok- ka ja työn laatu. Jos kyseessä on C-tyyppin laboratorio ja radioaktiivisen liuoksen normaali kemiallinen käsittely, josta ei ole roiskumisen vaa- raa, työssä saa kerralla käyttää

- ensimmäisen vaarallisuusluokan nuklideja enintään 0,5 MBq,
- toisen vaarallisuusluokan nuklideja enintään 5 MBq,
- kolmannen vaarallisuusluokan nuklideja enintään 50 MBq ja
- neljännen vaarallisuusluokan nuklideja enintään 500 MBq.

Suurinta sallittua aktiivisuutta voidaan muuttaa työn laadun mukaan käyt- tämällä kertoimia, jotka vaihtelevat välillä 100–0,01. Esimerkiksi C-tyy- pin laboratorioissa saa toiseen vaarallisuusluokkaan kuuluvia aineita va- rastoida enintään $100 \cdot 5 \text{ MBq} = 500 \text{ MBq}$, kun taas kuivassa ja pölyisessä käsittelyssä aktiivisuus saa olla enintään $0,01 \cdot 5 \text{ MBq} = 0,05 \text{ MBq}$.

Erityyppisten radionuklidilaboratorioiden rakenteita ja varustusta kos- kevat säteilyturvallisuus-vaatimukset on annettu ohjeessa ST 6.1. Ra- dioaktiiviset aineet ja jätteet on varastoitava siten, että ne eivät aiheuta säteilyvaaraa ympäristölle eivätkä joudu helposti asiattomien haltuun.

4.11 | Pintakontaminaatorajat

Radionuklidilaboratorioissa ja muilla säteilyn käyttöpaikoilla radioak- tiivisten aineiden määrä erilaisilla pinnoilla ei saa ylittää taulukossa

4.6 esitettyjä pintakontaminaatorajoja. Toimenpiteisiin kontaminaation poistamiseksi tai eristämiseksi on ryhdyttävä, kun pintakontaminaatorajat ylittyvät. Jos työpaikkaa, työvälineitä tai vaatteita ei voida puhdistaa riittävästi, on niiden käyttöä rajoitettava sekä radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen kehoon ja leviäminen ympäristöön estettävä erityisin suojatoimenpitein.

Radioaktiivinen aine	Työpaikat ja työvälineet		Työntekijät	
	Valvonta- alue* Bq/cm ²	Tarkkailu- ja muu alue Bq/cm ²	Vaatteet Bq/cm ²	Iho Bq/cm ²
Vaarallisuusluokkaan 1 kuuluvat radionuklidit	4	0,4	0,4	0,2
Muut radionuklidit	40	4	4	2

* Valvonta- ja tarkkailualueen määrittely ja vaatimukset on esitetty ohjeessa ST 1.6.

TAULUKKO 4.6. Pintakontaminaatorajat

Pintakontaminaatorajat eivät koske vetokaappien ja muiden vastaavanlaisten käsittelytilojen, esimerkiksi hansikaskaappien sisäpintoja eikä kontaminaatiosuojaimia, joita käytetään tavanomaisen suojavaatteiden lisäksi työskenneltäessä kontaminoituneissa tiloissa. Näissä tapauksissa kontaminaatio on kuitenkin pidettävä niin pienenä kuin se käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Radionuklidilaboratoriossa on oltava pintakontaminaation mittaamiseen soveltuva säteilymittari.

Pintakontaminaatiota määritettäessä otetaan huomioon sekä irtoavien että kiinnitarttuneiden radioaktiivisten aineiden määrä. Pintakontaminaatio määritetään keskimääräisenä aktiivisuutena enintään 100 cm²:n suuruiselta alueelta. Pyyhintämenetelmä on esitetty standardissa SFS 4575.

4.12 | Johdetut annosrajat

Avolähteiden käyttöön liittyy ulkoisen säteilyn lisäksi säteilyvaara, joka voi aiheutua hengitysilmaan tai iholle joutuneista radioaktiivisista aineista. Sisäisen säteilyannoksen ja ympäristön saastumisen rajoittamiseksi avolähteiden käytössä on noudatettava vuosiannosrajojen lisäksi myös niin sanottuja johdettuja annosrajoja.

Vuosisaantoraja

Vuosisaantoraja *ALI* (Annual Limit on Intake) on saanto, josta aiheutuu vuosiannosrajan suuruinen efektiivisen annoksen kertymä. Radionuklidin *j* vuosisaantoraja *ALI* lasketaan seuraavasti:

$$ALI = D_{AL}/h_j, \quad (4.2)$$

missä D_{AL} on vuosiannosraja ja h_j on kyseisen nuklidin annosmuuntokerroin (efektiivisen annoksen kertymä aktiivisuuden yksikköä kohti).

Vuosisaantorajan yksikkö on Bq.

ALI_{min} -arvo tarkoittaa kyseisen radionuklidin pienintä *ALI*-arvoa riippumatta radioaktiivisen aineen kemiallisesta muodosta ja kulkeutumisesta kehoon.

Pitoisuusrajat hengitysilmassa

Radionuklidin pitoisuusraja ilmassa *DAC* (Derived Air Concentration) on se radionuklidin keskimääräinen pitoisuus, missä voidaan työskennellä 2 000 tuntia vuodessa annosrajojen ylittymättä. Pitoisuusraja *DAC* lasketaan *ALI*-arvosta seuraavasti, silloin kun se koskee vain sisäistä säteilyä:

$$DAC = ALI/V, \quad (4.3)$$

missä *V* on työssäoloaikana hengitetty ilmamäärä. Pitoisuusrajan yksikkö on Bq/m³. Kevyessä työssä ihmisen hengitysnopeus on noin 1,2 m³/h, jolloin *V*:n arvoksi saadaan 2 400 m³.

Päästöt ulkoilmaan

Kun radioaktiivisia aineita päästetään ulkoilmaan, on päästöt rajoitettava siten, että enimmäispitoisuus (*MAC*) päästöaukon välittömässä läheisyydessä on – esimerkiksi muutaman metrin päässä poistoaukosta – enintään yksi sadasosa säteilyöntekijän hengitysilmaille johdetusta pitoisuusrajasta (*DAC*). Päästöistä aiheutuva aktiivisuuspitoisuus lasketaan keskiarvona ajalle, joka saa olla enintään yhden vuoden pituinen.

MAC-arvot on johdettu pienimmistä *DAC*-arvoista, jotka määräytyvät radionuklidin fysikaalisen ja kemiallisen olomuodon mukaan. Tritiidulle vedelle *MAC*-arvoa laskettaessa on otettu lisäksi huomioon se, että tritiumia imeytyy kehoon myös suoraan ihon lävitse. Radionuklideille ^{18}F ja ^{24}Na *MAC*-arvoa laskettaessa on otettu huomioon myös ulkoinen säteily, joka aiheutuu poistoilman radioaktiivisuudesta. Ilmapäästöjä koskevat enimmäispitoisuudet yleisimmin käytetyille radionuklideille on esitetty ohjeessa ST 6.2.

4.13 Turvallinen työskentely avolähteillä

Radioaktiivisten aineiden käytössä ja erityisesti avolähteiden käytössä on otettava huomioon työntekijöiden säteilyturvallisuuden lisäksi toiminnasta mahdollisesti ympäristölle aiheutuvat haitat. Säteilysuojelulainsäädännön edellyttämän turvallisuustason saavuttamiseksi toiminta on suunniteltava ja järjestettävä siten, että seuraavat perusvaatimukset toteutuvat:

- Avolähteiden käyttöpaikan on sekä rakenteellisesti että varustetasonsa puolesta täytettävä toiminnan laadusta ja sen aiheuttamasta riskistä johtuvat erikoisvaatimukset.
- Työmenetelmät, käytettävät radionuklidit ja aktiivisuudet on valittava siten, että säteilyvaara on mahdollisimman vähäinen.
- Jos on oletettavissa, että toiminnasta voi aiheutua radioaktiivisten aineiden leviämistä, on saatavilla oltava riittävät suojautumis-, mittaus- sekä puhdistusvälineet ja henkilökunta on perehdytettävä niiden käyttöön.
- Radioaktiivisten aineiden varastointi sekä jätteiden käsittely ja hävittäminen on järjestettävä turvallisesti ottamalla huomioon myös ympäristölle aiheutuva säteilyvaara.

4.14 Radioaktiiviset jätteet ja niiden käsittely

Yleiset periaatteet

Radioaktiivisella jätteellä tarkoitetaan radioaktiivisia aineita ja radioaktiivisten aineiden saastuttamia laitteita, tavaroita ja materiaaleja, joilla

ei ole käyttöä ja jotka radioaktiivisuutensa vuoksi on tehtävä vaarattomiksi. Menetelmä, jolla jätteet tehdään vaarattomiksi, riippuu jätteen laadusta, aktiivisuudesta ja jätteessä olevien radionuklidien ominaisuuksista kuten puoliintumisajasta ja säteilylajista. Lähtökohtana jätetuollon suunnittelussa ja toteutuksessa on se, että radioaktiivisten aineiden leviäminen ympäristöön ja jätteiden joutuminen asiattomien käsiin estetään tehokkaasti.

Teollisuudessa, tutkimuksessa ja lääketieteessä käytetyt umpilähteet on useimmissa tapauksissa varastoitava tai loppusijoitettava erityisiin radioaktiivisille jätteille tarkoitettuihin paikkoihin. Radionuklidilaboratorioissa syntyvä jäte on usein niin vähäaktiivista, ettei jätettä ole tarpeen varastoida ja loppusijoittaa radioaktiivisena jätteenä.

Jos toiminnan laatu edellyttää radioaktiivisten aineiden vähäisiä päästöjä ilmaan, viemäriverkkoon tai muutoin ympäristöön, on erityisesti varmistettava, että päästettävät ainemäärät pidetään Säteilyturvakeskuksen asettamien raja-arvojen alapuolella ja niin pieninä kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista (säteilyasetus 23 §).

Radioaktiivisten jätteiden käsittelyssä yleiset säteilyturvallisuusvaatimukset ovat seuraavat:

- Niin sanotun kriittisen ryhmän yksilön efektiivinen annos ei ylitä arvoa 10 μSv vuodessa. (Kriittisellä ryhmällä tarkoitetaan väestöryhmää, jolle voidaan sen asuinpaikan ja elintapojen perusteella arvioida aiheutuvan suurimmat säteilyannokset.)
- Yhden vuoden toiminnasta aiheutuva kollektiivisen efektiivisen annoksen sitouma ei ylitä arvoa 1 manSv.
- Raja-arvoja sovelletaan erikseen kaasumaisten ja nestemäisten aineiden päästöille sekä kiinteille radioaktiivisille jätteille.

Toiminnan harjoittaja, joka aikoo päästää radioaktiivisia aineita viemäriverkkoon, ilmaan tai toimittaa kiinteitä radioaktiivisia jätteitä kaatopaikalle tai jätteenpolttolaitokseen, on velvollinen tekemään jätteiden käsittelysuunnitelman. Suunnitelma on esitettävä Säteilyturvakeskukselle hyväksyttäväksi. Jätteiden käsittelyssä noudatettavat ehdot ja erityismääräykset annetaan hyväksyntäpäätöksessä. Nämä erityismääräykset koskevat esimerkiksi päästöjen mittaamista, ympäristön radioaktiivisuuden ja ulkoisen annosnopeuden valvontaa, valvonta-

mittauksissa noudatettavia suoritusvälejä, sekä tulosten raportointia Säteilyturvakeskukselle väestön ja kriittisen ryhmän säteilyannosten arvioimista ja tulosten tallentamista varten. Annosarviota varten raportissa on ilmoitettava valvontamittausten tulokset, ympäristöön päästetyt radionuklidit, niiden fysikaalinen ja kemiallinen olomuoto sekä aktiivisuudet.

Toiminnan harjoittajan on toimitettava jätteiden käsittelysuunnitelmaa koskeva päätös tiedoksi vesien- ja ilmansuojelun sekä jätehuollon valvontaviranomaisille.

Jos jäte sisältää radioaktiivisten aineiden lisäksi muita ympäristölle vaarallisia aineita, on jätteiden hävittämisessä otettava huomioon myös vesi-, ilmansuojelu- ja jätelainsäädännön määräykset.

Jätteiden käsittelysuunnitelmaa ei kuitenkaan tarvitse tehdä, jos jäte on ohjeen ST 6.2 kohdan 3.1 mukaista tavanomaista laboratoriojätettä, tai toiminta järjestetään siten, että päästöissä ja kiinteiden jätteiden vaarattomaksi tekemisessä ei ylitetä ohjeessa ST 6.2 kohdissa 3.2 - 3.4 esitettyjä raja-arvoja. Säteilyturvakeskus voi tällöinkin määrätä poistoilman radioaktiivisuuden seurannan ja tulosten raportoinnin, jos se ympäristöolosuhteiden, työn laadun ja käytössä olevien radioaktiivisten aineiden laadun ja määrän vuoksi on tarpeen.

Jätteiden käsittelyohjeita

Radioaktiivisten jätteiden käsittelyssä on otettava aktiivisuusrajojen lisäksi huomioon seuraavat ohjeet:

- Ympäristöön joutuvien radioaktiivisten aineiden määrät on pidettävä niin vähäisinä kuin käytännöllisin toimenpitein on mahdollista. Lyhytikäisiä radionuklideja (puoliintumisaika alle 100 vrk) sisältävän jätteen vanhentaminen ja poistoilman suodattaminen on suositeltavaa myös silloin, kun jätteen aktiivisuus ja päästöt ovat ohjeen ST 6.2 kohdassa 3 esitettyjä raja-arvoja pienempiä.
- Pitkäaikaiseen varastointiin ja loppusijoitettaviksi tarkoitetut jätteet (korkea-aktiivinen jäte) on pidettävä erillään vähäaktiivisista jätteistä, jotka voidaan toimittaa kaatopaikalle tai jätteenpolttolaitokseen. Inaktiiviseksi luokiteltava jäte on kerättävä erilliseen jäteastiaan ja poistettava laboratoriosta muun laboratoriojätteen mukana.

- Radioaktiivisuuden lisäksi jätteiden käsittelyssä on otettava huomioon myös jätteen fysikaaliset, kemialliset ja biologiset ominaisuudet, kuten kemiallinen myrkyllisyys ja mikrobin aiheuttama tartuntavaara.
- Jäte, joka toimitetaan kaatopaikalle tai jätteenpolttolaitokseen vähäaktiivisena jätteenä, on pakattava siten, että radioaktiivisia aineita ei pääse leviämään pakkauksen ulkopuolelle kuljetuksen aikana. Jätepakkauksiin on merkittävä lähettäjän nimi sekä pääasialliset radionuklidit ja niiden aktiivisuus. Jätepakkauksia ei tarvitse merkitä säteilyvaaraa osoittavalla merkillä, jos jätteet kuljetetaan ilman keskeytystä kaatopaikalle tai jätteenpolttolaitokseen ja hävitetään ilman välivarastointia. Jos jätteitä joudutaan varastoimaan, on varastointipaikka tai jätepakkaukset varustettava säteilyvaaraa osoittavalla merkillä.
- Jos jätettä ei toimiteta valvotulle kaatopaikalle, on jätteessä olevat materiaalit ja esineet, joilla on uudelleenkäyttöarvoa, mikäli mahdollista rikottava tai muuten tehtävä käyttökelpottomiksi.
- Jokaisen radioaktiivisten aineiden viemäriin päästökerran jälkeen allas ja viemäri on huuhdeltava runsaalla vesimäärällä.
- Isotooppihoitoa saaneita potilaita varten on oltava erillinen WC, jota muut eivät käytä.
- Radioaktiivisia jätteitä ei pidä tarpeettomasti säilyttää laboratoriossa.

KIRJALLISUUTTA

DIN 25425, Teil 1. Radionuklidlaboratorien. Regeln für die Auslegung.

DIN 25425, Teil 2. Radionuklidlaboratorien. Grundlagen für die Erstellung betriebsinterner Strahlenschutzregeln.

International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996.

International Commission on Radiological Protection. The Handling, Storage, Use and Disposal of Unsealed Radionuclide in Hospitals and Medical Research Establishments. ICRP Publication 25, Oxford: Pergamon Press, 1976.

National Radiological Protection Board. Guidance Notes for the Protection of Persons against Ionising Radiations arising from Medical and Dental Use. 1988.

Principles and Methods for Establishing Concentrations and Quantities (Exemption Values) Below which Reporting is not required in the European Directive. Doc. XI-028/93, Commission of the European Communities.

Principles for the Exemption of Radiation Sources and Practices from Regulatory Control. Safety Series No. 89. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1988.

Safe Handling of Radionuclides. Safety Series No. 1. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1973.

SFS 4575. Radioaktiivisen pintakontaminaation mittaus. Pyyhintämenetelmä.

