

Pyyhkäisyelektronimikroskopian sovellukset rikostutkimuksessa

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2026
Olivia Haanmäki
Tarkastaja:
FT Ermei Mäkilä

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Olivia Haanmäki Pyyhkäisyelektronimikroskopian sovellukset rikostutkimuksessa

LuK-tutkielma, 24 s., 1 liites.

Fysiikka

Huhtikuu 2026

Pyyhkäisyelektronimikroskopia (*Scanning Electron Microscopy, SEM*) on löytänyt paikkansa rikostutkimuksessa, sillä tarve luotettavimmille ja tarkemmille kuvantamismenetelmille on ollut suuri. SEM on tehokas menetelmä todisteiden luokittelussa ja erottelussa korkean resoluution ja suurennoksen ansioista. Yhdistettynä energiaerotteeseen röntgenspektroskopiaan (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS*) voidaan samanaikaisesti tutkia näytteiden rakennetta ja alkuainekoostumusta näytettä tuhoamatta, ja siksi se on usein parempi vaihtoehto kuin muut tekniikat rikostutkimuksessa.

Tutkielmassa käydään läpi SEM:n ja EDS:n toimintaperiaatteet ja näytteenvalmistus. Käydään läpi SEM-EDS -menetelmän rooli ja sovellukset rikostutkimuksessa.

Asiasanat: SEM, EDS, GSR, pyyhkäisyelektronimikroskopia, energiaerotteinen röntgenspektroskopia, rikostutkimus, ampuma-asejäämä, ase, auto-onnettomuus, materiaalitodiste

Sisällys

Johdanto	1
1 Pyyhkäisyelektronimikroskopia	1
1.1 Toimintaperiaate	1
1.2 Laitteisto	4
1.3 Näytteiden valmistus	6
2 Energiaerotteinen röntgenspektroskopia	9
2.1 Toimintaperiaate	9
3 SEM ja EDS rikostutkimuksessa	12
3.1 Ampuma-asejäämien analyysi	12
3.2 Materiaalitodisteiden analyysi	14
3.2.1 Auto-onnettomuudet	15
3.2.2 Maaperäanalyysi	16
3.2.3 Teräase	18
3.2.4 Tylppä ase	20
4 Yhteenveto	21
A Tekoölyn käyttö tutkielmassa	25

Johdanto

Rikostutkimuksessa fyysisillä todisteilla on kaksi päätavoitetta: selvittää ovatko näytteet peräisin samasta kohteesta sekä määrittää kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien perusteella todistusaineiston alkuperä. Rikospaikalla todisteita voi löytyä hyvin vähän ja pieninä määrinä. Jotta pienistä määristä voidaan saada luotettavia tuloksia, tarvitaan herkkää analyysimenetelmää. Menetelmä ei saa myöskään tuhota näytteitä, sillä todisteita saatetaan analysoida uudelleen. Pyyhkäisyelektronimikroskopia (*Scanning Electron Microscopy, SEM*) on tehokas menetelmä todisteiden luokittelussa ja erottelussa korkean resoluution ja suurennoksen ansioista. Yhdistettynä energiaerotteiseen röntgenspektroskopiaan (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy, EDS*) voidaan samanaikaisesti tutkia näytteiden morfologiaa ja alkuaine-koostumusta näytettä tuhoamatta, ja siksi se on usein parempi vaihtoehto kuin muut analyysitekniikat rikostutkimuksessa. [1]

SEM-EDS:n sovelluksiin rikostutkinnassa kuuluu materiaalien alkuperän ja koostumuksen tutkiminen, sekä rikostutkinnan kannalta ratkaisevien mikroskooppisten yksityiskohtien analysointi ja dokumentointi. SEM:n korkearesoluutisten kuvien ansiosta on mahdollista saada tärkeää tietoa rikoksen ratkaisemiseen. Erityisesti SEM-EDS:n soveltaminen ampuma-asejäämien tutkimiseen (*Gun shot residue, GSR*) on ollut merkittävä edistysaskel rikostutkimuksessa, sillä tarve luotettavimmille ja tarkemmille kuvantamismenetelmille on ollut suuri. [2]

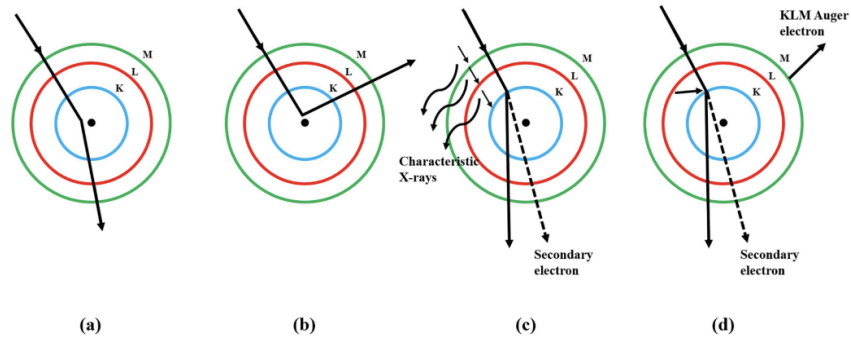
1 Pyyhkäisyelektronimikroskopia

1.1 Toimintaperiaate

Pyyhkäisyelektronimikroskopia on yksi monipuolisimmista aineen mikrorakenteen, morfologian ja kemiallisen koostumuksen tutkimiseen ja analysoimiseen käytettävistä laitteistoista. Kuvanmuodostus elektronimikroskopiolla perustuu elektronien

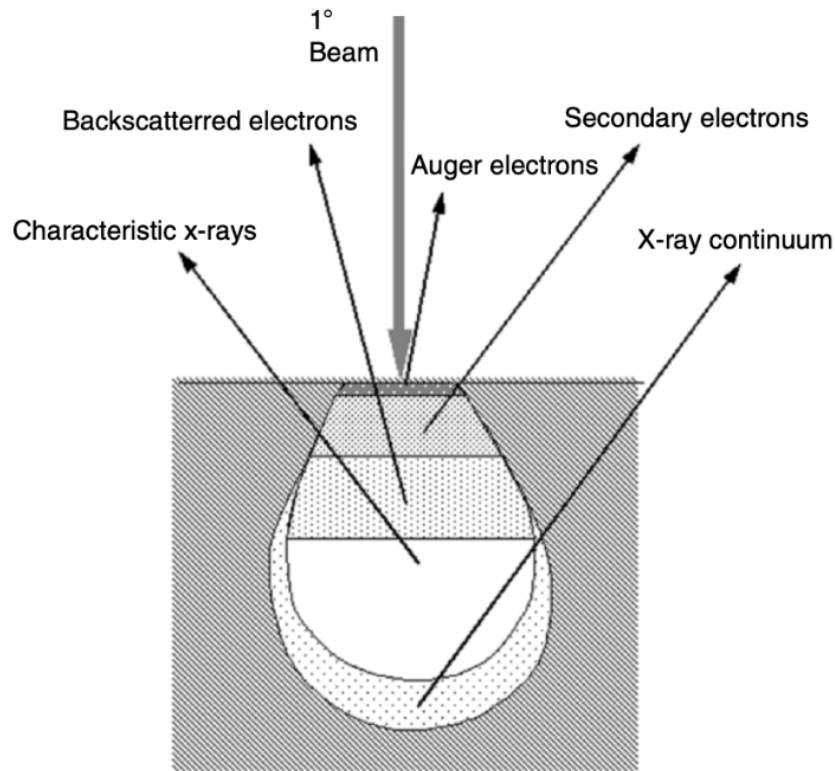
tuottamiin signaaleihin, jotka muodostuvat elektronisäteen ja näytteen keskinäisestä vuorovaikutuksesta. Elektronien mahdolliset vuorovaikutukset atomien kanssa on esitetty kuvassa 1. Nämä vuorovaikutukset voidaan jakaa kahteen eri pääluokkaan: elastisiin- ja epäelastisiin vuorovaikutuksiin. Elastinen sironta syntyy, kun elektroni ohjautuu pois radaltaan joko näyteatomien ytimen, tai atomien elektronipilven sähköisten vuorovaikutusten seurauksena. Elastisen vuorovaikutuksen törmäyksessä syntyy hyvin pieni energiahäviö. Osa näistä elastisesti sironneista elektroneista voivat sirota yli 90 asteen kulmassa, jolloin ne palaavat takaisin kulkusuuntaansa kohden, ja poistuvat näytteestä. Näitä elektroneja kutsutaan takaisinsironneiksi elektroneiksi (*Backscattered Electrons, BSE*), ja ne tuottavat signaalia, jota voidaan käyttää näytteen kuvantamista varten. Epäelastinen sironta koostuu useiden tulevien elektronien ja näytteen atomien välisistä vuorovaikutuksista. Primäärisäteen elektronit siirtävät suuren määrän energiaansa näytteen atomeille, minkä seurauksena näytteen elektronit virittyvät. Atomien ionisaation seurauksena syntyy sekundääri elektroneja (*Secondary electrons, SE*). Näiden lisäksi elektronisäteen osuessa näytteeseen voi syntyä myös karakterisia röntgensäteitä ja auger-elektroneja. [3]

Karakteriset röntgensäteet syntyvät primäärin elektronisuihkun ja näytteen välisessä vuorovaikutuksessa, kun atomin sisäkuoren elektroni irtoaa törmäyksessä, jolloin sisäkuorella jää aukko. Ulkokuoren elektroni siirtyy sisäkuorelle palauttaakseen orbitaaleille oikean varaustasapainon ionisaation jälkeen. Röntgenfotonin emisioilla ionisoitunut atomi palaa perustilaan. Karakteristen röntgensäteiden analyysi on yleisin käytetty tekniikka näytteen kemiallisen tiedon saamiseksi. Samassa prosessissa syntyy myös Auger-elektroneja, jolloin vapautuva ylimääräinen energia voi kulkeutua pois Auger-elektronin mukana. Tätä ominaisenergiaa käytetään näytteen kemiallisen tiedon saamiseksi. [3]



Kuva 1. Korkeaenergistien elektronien mahdolliset vuorovaikutukset atomien kanssa. Atomikuoret merkitty standardilla merkintätavalla (K, L, M) tuleva hiukkanen esitetty yhtenäisellä nuolella. a) Pienen kulman sironta: tulevat elektronit menettävät hyvin vähän energiaa ja siroavat seuraavalle atomikuorelle; b) suuren kulman sironta (tai takaisinsironta); c) karakterisen röntgensäteilyn ja sekundäärielektronin emissio; d) Auger-elektronin ja sekundäärielektronin emissio. [4]

Elektronisäteen ja näytteen vuorovaikutuksessa syntyvät signaalit kerätään laitteen keräyskammiossa oleville ilmaisimille, minkä perusteella kuva muodostetaan ja saadaan tietoa tutkittavasta näytteestä. Kuvantamiseen käytetyt signaalit syntyvät näytteen eri syvyyksissä, mikä on esitetty kuvassa 2. Sekundäärielektronikuvaus antaa tietoa näytteen topografiasta, kuten pinnan rakenteesta, muodosta ja ominaisuuksista, kun taas takaisinsironneiden elektronien kuvantaminen antaa tietoa näytteen materiaalikoostumuksesta: mitä korkeampi atomiluku, sitä kirkkaammin alkuaine esiintyy BSE-kuvissa. Auger-elektronien alhaisen energian vuoksi niitä emittoidaan lähelle näytteen pintaa, minkä takia menetelmää käytetään pääosin pinta-analyysissä. Jatkuva röntgensäteily, tai toiselta nimeltään jarrutussäteily (*X-ray continuum*) syntyy karakterisen röntgensäteilyn yhteydessä, kun primäärielektronien kulkusuunta muuttuu niiden vuorovaikutuksessa näytteen atomien kanssa. Elektronit menettävät kineettistä energiaa, joka esiintyy jatkuvana taustasäteilynä. Karakterista röntgensäteilyä ja jarrutussäteilyä käytetään EDS:n yhteydessä alkuaineanalyysissä. [4]



Kuva 2. Signaalin läpäisy eri tasoilla näytteen pinnan läpi [3]

1.2 Laitteisto

SEM-laitteiston rakenne voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri osaan: elektronipylväeseen, näytekammioon sekä tietokoneen ohjausjärjestelmään. Näiden eri osien komponentit ovat esitetty tarkemmin kuvassa 3. [5] Elektronitykki (*Electron gun*), joka toimii elektronilähteenä, tuottaa elektroneita ja kiihdyttää ne 0,1–30 keV energiata- solle. Elektronilähdetyyppejä on useita, ja niistä yleisimmin käytettävä on volframi- lanka. Sen luotettavuus ja edullinen hinta on mahdollistanut käytön monissa sovel- luksissa, erityisesti pienen suurennoksen kuvauksissa ja alkuaineanalyysissä EDS:n yhteydessä. Tämä elektronitykki koostuu kolmesta osasta: volframilangasta (kato- di), Wehnelt-sylinteristä ja anodista. Volframilangan halkaisia on noin 100 μm , ja se kuumennetaan hehkuvirran avulla yli 2800 K lämpötilaan, jolloin elektronit irtoavat langan kärjen pinnalta. Koska anodi on maadoitettu, volframilangan ja anodilevyn

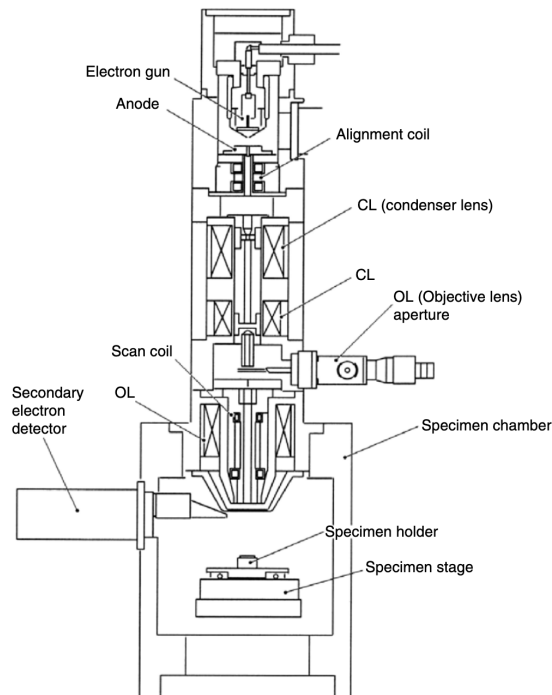
välille syntyvä sähkökenttä irrottaa ja kiihdyttää elektronit kohti anodia. [3]

Lantaaniheksaboridi-elektronitykki LaB_6 on vaihtoehtoinen elektronilähde volframilangalle. LaB_6 -elektronitykki tuottaa voimakkaamman elektroniemission samalla kuumennuslämpötilalla, sillä sen materiaalilla on pienempi irrotustyö (2,4 eV) kuin volframilla (4,5 eV). Tämän ansiosta LaB_6 -elektronitykit pystyvät tuottamaan 5-10 kertaisesti suuremman kirkkauden ja niiden käyttöikä on pidempi kuin perinteisillä volframitykkeillä. LaB_6 tuottamalla elektronisuihkulla on kapeampi energiajakauma, mikä parantaa SEM-kuvien resoluutiota. LaB_6 -lähteet kuitenkin hapettuvat herkästi korkeissa lämpötiloissa, eikä perinteisen SEM:n kammion tyhjiö riitä estämään LaB_6 -katodin hapettumista, mikä lyhentää merkittävästi tykin käyttöikää. [3]

Kenttäemissiotykki (*field emission gun, FEG*) käyttää elektronilähteenään teräväkärkistä yksikiteistä volframilankaa. Kärkeen muodostuu voimakas sähkökenttä, minkä seurauksesta anodit vetävät elektroneja puoleensa sen sijaan, että hehkulanka kuumentaisi niitä. Kenttäemissiotykkejä on kahta eri tyyppiä, joita hyödynnetään SEM-laitteistoissa: kylmäkenttäemissio (*Cold field emission, CFE*) ja Schottky-emitteri (*Schottky emitter*). CFE:ssä elektronilähteet toimivat huoneenlämmössä, jolloin emittoitujen elektronisuihkujen virta on hyvin pieni. Suuri kirkkaus saavutetaan elektronisuihkun halkaisijan ja emissioalueen ansiosta. Schottky-emitteriä käytetään korkeissa lämpötiloissa. Korkea lämpötila vähentää kaasumolekyylien absorptiota, ja vakauttaa elektronisuihkun emission jopa heikentyneen tyhjiön ilmetessä. Schottky-emitterin ja CFE-lähteiden suorituskyky on termisiä lähteitä parempi kirkkauden, lähteen koon ja käyttöiän suhteen. Schottky-emitteriä suositetaan kuitenkin CFE-lähteeseen verrattuna sen paremman vakauden ja helpomman käytön vuoksi. Koska Schottky-emitterin emittoiva pinta-ala on huomattavasti suurempi kuin CFE-lähteen, se pystyy tuottamaan monta kertaa suuremman emissiovirran samalla energiahajonnalla kuin CFE. Lisäksi suurempi emissiolähteen koko

vähentää värinäälttiutta. kenttäemissiotykit tarvitsevat huomattavasti korkeampaa tyhjiötä toimiakseen kuin termiset lähteet. [3]

Elektronitykin tuottaman elektronisäteen halkaisija on liian suuri muodostaakseen korkearesoluutisia kuvia. Tämän vuoksi elektronisäteen tarkentamiseen ja muokkaamiseen käytetään apuna elektromagneettisia linssejä ja apertuureja, joiden avulla saadaan pieni ja tarkasti fokusoitu elektronipiste näytteelle. Jotta elektroni saa esteettömän kulun näytteelle, vaaditaan korkean tason tyhjiötä. Näytepidike, elektronisäteen pyyhkäisykelat, ilmaisimet ja käsittelyjärjestelmät mahdollistavat näytteen pinnan reaaliaikaisen havainnon ja kuvien tallentamisen. [3]



Kuva 3. Havainnekuva pyyhkäisy-elektronimikroskoopin rakenteesta [3]

1.3 Näytteiden valmistus

Jotta näytteistä saadaan luotettavia ja tarkkoja tuloksia, on tärkeää tuottaa laadukkaita näytteitä. SEM-analyysi on altis vääristymille, artefakteille ja muille ongelmille, jos näytteen valmistus on tapahtunut väärin. Näyte tulee kiinnittää kaksipuolis-

la johtavalla teipillä, tai muilla kiinnitysmenetelmillä kiinni näytepidikkeeseen, joka asetetaan sähköä johtavalle näytealustalle. [4] Johtavia ja puolijohdemateriaaleja ei tarvitse erikseen valmistaa kuvantamista varten, mutta eristemateriaalit varautuvat elektronisuihkussa, ellei näytteen pinnalle tai sen sisälle luoda keinotekoista johtavaa reittiä, jonka kautta näytteen virta voidaan maadoittaa. Yksinkertaisin tapa välttää varausongelmat on pinnoittaa eristemateriaali hyvin ohuella kerroksella johtavaa materiaalia. Tämä ohut johtava kerros voidaan levittää näytteen pinnalle haihdutusmenetelmällä, jossa johtava metalli kuumennetaan sen höyrystymislämpötilaan korkeassa tyhjiössä, jolloin höyrystyneet metalliatomit tiivistyvät näytteen pinnalle esimerkiksi muodostaen ohuen kalvon. Toinen yleisesti käytetty tapa on sputterointimenetelmä, jossa negatiivisesti varautunutta metallipintaa pommitetaan positiivisesti varautuneilla kaasuatomeilla tai ioneilla, useimmiten argonioneilla, matalassa tyhjiössä. Pommituksen seurauksena metalliatomeja irtoaa, jonka seurauksesta ne tiivistyvät näytteen pinnalle ohueksi kalvoksi. [6]

Vesi ja orgaaniset nesteet tulee poistaa tai immobilisoida ennen näytteen tarkastelua SEM:llä. Kosteus aiheuttaa sekä näytteen varautumista että sen vaurioitumista nesteen höyrystyessä ulos näytteestä kammion alhaisen paineen seurauksena. Kuivausmenetelmiä on olemassa useampia, ja onkin tärkeää ottaa huomioon näytteen luonne menetelmää valitessa. Kovien ja kestävien materiaalien, kuten metallien ja kivien kuivatus on suhteellisen suoraviivaista: pintavesi voidaan imeä paperilla tai kankaalla niin, ettei näytteen pinnan rakenne muutu. Tämän jälkeen jäljelle jäänyt vesi saa haihtua. Orgaanisten materiaalien, polymeerien ja biologisten näytteiden kuivatus vaatii sen sijaan enemmän työtä. Näytteiden sisältämä vesi voidaan poistaa kemiallisesti kahdella eri menetelmällä: liuottamalla se orgaanisiin kemikaaleihin, tai saamalla se reagoimaan orgaanisten kemikaalien kanssa siten, että muodostuu ei-vesipohjainen orgaaninen neste. Kylmäkuivaus on menetelmä, jossa näytteen luontainen vesipitoisuus muutetaan ensin jääksi, minkä jälkeen se poistetaan

sublimoitumalla matalassa lämpötilassa ja korkeassa tyhjiössä. Ylikriittinen kuivaus perustuu aineen kriittiseen pisteeseen, jossa neste- ja kaasufaasien tiheys on sama, jolloin molekyylien vaihto neste- ja kaasufaasien välillä on tasapainossa, eikä pintajännitystä synny. Yleisin ylikriittisessä kuivauksessa käytettävä aine on hiilidioksidi. Ylikriittisessä tilassa vesi ei liukene hiilidioksidiin, joten tällöin vesi tulee ensin korvata, esimerkiksi etanolilla tai asetonilla. Tätä menetelmää sovelletaan yleisesti biologisten näytteiden kuivauksessa. [6]

Näytteen sisäosaa tutkiessa on tarpeen varmistaa näytteen tukeva kiinnitys. Eri-tyisesti hauraat ja pehmeät näytteet, jotka eivät itsessään kestä halkaisemista, voidaan kiinnittää osaksi tiivistä kokonaisuutta. Yleisimmin käytetty menetelmä on nestemäisen upotusmateriaalin imeyttäminen näytteeseen, jolloin saadaan muodostettua tiivis kokonaisuus. Tätä tekniikkaa sovelletaan useimmille biologisille materiaaleille, jotka eivät ole riittävän kiinteitä leikattavaksi sisällön paljastamiseksi. Samaa periaatetta voidaan myös soveltaa pienten metallihiukkasten, epäorgaanisten ja orgaanisten materiaalien sekä jopa huokoisten mineraalien kanssa. Toinen käytetty menetelmä on käyttää nestemäistä tai kiinteää upotusmateriaalia, esimerkiksi epoksia, tiiviin sidoksen muodostamiseksi pääosin läpäisemättömän näytteen ulkopinnan kanssa ennen materiaalin polymerointia. Tämä mahdollistaa pienten ja ohuiden näytteiden tukevan kiinnityksen, jolloin niitä voidaan leikata, murtaa, syövyttää ja kiillottaa. Tätä menetelmää sovelletaan usein metallisten ja geologisten näytteiden kanssa. [6]

Tutkittavan näytteen pinnan puhdistaminen on erittäin tärkeää, sillä pinnalla voi olla erilaisia ei-toivottuja kerrostumia ja epäpuhtauksia. Epäpuhtauksien laatu ja määrä riippuvat näytteen alkuperästä sekä mahdollisista kokeista, jotka on tehty ennen SEM-näytteen valmistusta. [7] Puhdistusmenetelmiä on kahta tyyppiä: kosketukseton puhdistus, jossa puhdistusaine ei ole fyysisessä kosketuksessa näytteen kanssa, sekä kosketuspuhdistus, jossa puhdistusaine on fyysisessä sekä kemiallisessa

kontaktissa näytteen kanssa. Ennen puhdistusmenetelmän valintaa on tärkeää ottaa huomioon miksi SEM:iä käytetään näytteen tutkimiseen. Puhdistusprosessi ei saa vahingoittaa näytettä, eikä muuttaa sen ominaisuuksia. [6]

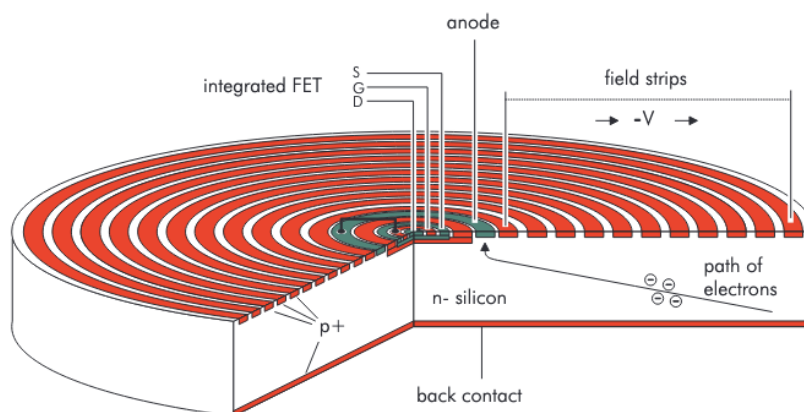
2 Energiaerotteinen röntgenspektroskopia

2.1 Toimintaperiaate

EDS on näytteen alkuainekoostumuksen karakterisointiin käytettävä tekniikka, jossa SEM:ssä syntyneiden karakteristen röntgensäteiden energiaa analysoidaan alkuainneiden tunnistamiseksi. Nämä röntgensäteet ovat jokaiselle alkuaineille ominaisia niiden atomirakenteesta riippuen. EDS:n avulla pystytään tunnistamaan melkein kaikki alkuaineet. Poikkeuksena ovat vety ja helium, sillä ne eivät pysty tuottamaan röntgensäteitä niiden atomirakenteen takia. [8]

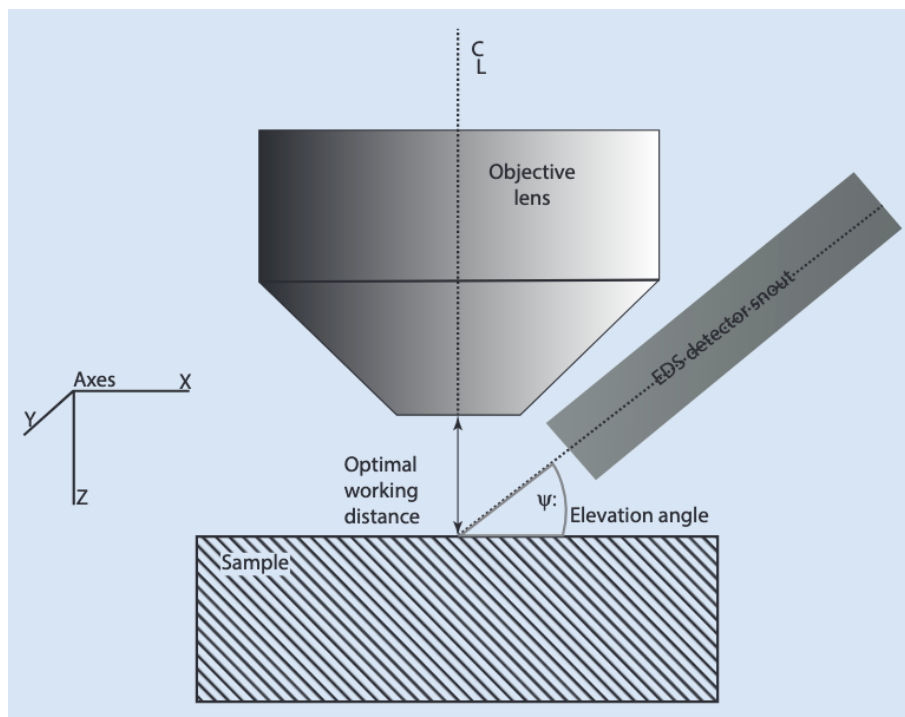
EDS:n toimintaperiaate perustuu röntgenfotonin fotoelektriseen absorptioon puolijohteen, yleensä piin, aktiivisessa tilavuudessa. Fotonin koko energia siirtyy sidotulle sisäkuoren elektronille, joka saa liike-energiaa ja irtoaa kuoreltaan. Irronnut fotoelektroni menettää energiaa sirotessaan epäelastisesti piikiteessä. Yksi energiahäviön seurauksista on sidottujen ulkokuoren valenssielektronien virittyminen puolijohteen johtavuusvyöhykkeelle, jolloin valenssivyöhykkeelle jää positiivisesti varautuneita aukkoja. Johtavuusvyöhykkeellä olevat vapaat elektronit voivat liikkua piikiteen paksuuden poikki sisääntulopinnan elektrodin ja takapinnan elektrodin väliin syötetyn jännitteen vaikutuksesta. Johtavuusvyöhykkeen positiiviset aukot ajautuvat vastakkaiseen suuntaan, mikä aiheuttaa elektronien kerääntymisen EDS-detektorin takapinnan anodille. Alunperin EDS:n kanssa on käytetty Si(Li)-ilmaisinta, jossa on yhtenäinen elektrodi etu- ja takapinnoilla. Viime vuosikymmenen aikana Si(Li)-ilmaisimien on korvattu suuriltaan osin SDD-ilmaisimella (*Silicon drift detector*). SDD-detektorin toimintaperiaate on sama kuin Si(Li)-detektorilla, mutta siinä takapin-

nan elektrodi muodostaa sisäkkäisistä rengaselektrodeista koostuvan rakenteen, jonka keskellä on pieni anodi. Rakennekaavio esitetty kuvassa 4. Yksittäisiin rengaselektrodeihin kytketty potentiaalijakauma synnyttää ilmaisimen sisään keräyskanavan, joka ohjaa missä tahansa ilmaisimen tilavuudessa syntyneet vapaat elektronit keskusanodille kerättäväksi. Ilmaisimessa tehtävä varauksen mittausta tuottaa informaation, jossa yksittäisen ilmaisinelementin keräämä varauspulssi muunnetaan elektronivolteiksi pulssin korkeuden perusteella. Tämän pohjalta EDS-spektri voidaan muodostaa. [9]



Kuva 4. Rakennekaavio sylinterimäisestä SDD:stä. Sähkökenttä ohjaa elektroneja kohti laitteen keskellä sijaitsevaa pientä keräysanodia. Vahvistuselektronikan ensimmäinen transistori on integroitu ilmaisinsirulle. [10]

Useammassa EDS-laitteissa ilmaisimien on asennettu kiinteään laippaan, jotta näytteen ja ilmaisimen välinen geometria ja korkeuskulma pysyvät vakiona. Tämä geometria esitetty kuvassa 5. Lähes kaikki nykyaikaiset EDS-ilmaisimet ovat asennettu putkimaiseen kuonoon, jonka päässä kide sijaitsee siten, että aktiivisen ilmaisinelementin pinta on kohtisuorassa kuonon pääakseliin nähden. Kuonon pääakseli on suunnattu siten, että se leikkaa elektronisuihkun akselin optimaalisella työtäisyydellä. [9]



Kuva 5. EDS -laitteiston geometria[9]

Näytteen kontaminoituminen tulee ottaa huomioon tutkittaessa näytteitä EDS:llä. Näytteen valmistusprosessissa näytteeseen voi tulla epäpuhtauksia valmistuksessa käytettyjen aineiden ja laitteiden takia. Happi ja hiili esiintyy lähes poikkeuksetta näytteissä: ilmassa esiintyvä happi reagoi helposti näytteen pinnan kanssa muodostaen oksideja, kun taas hiili on usein peräisin ilman hiilivetyjen absorptiosta tai näytteen valmistusprosessista ja kiinnitysmateriaaleista. Myös itse laitteiston rakenteet ja komponentit voivat vaikuttaa näytteestä saatuun EDS-spektriin. [8] Automaattinen piikkien tunnistusohjelma voi tunnistaa piikit virheellisesti. Tunnistusvirheet kasvavat alkuaineen pitoisuustason laskiessa. Karkeapintaisten ja topografialtaan monimutkaisten näytteiden geometria voi aiheuttaa virheitä, sillä elektronisirona, röntgensäteilyn synty ja säteilyn kulku poikkeavat usein ideaalisista tasaisista näytteistä. [11]

3 SEM ja EDS rikostutkimuksessa

3.1 Ampuma-asejäämien analyysi

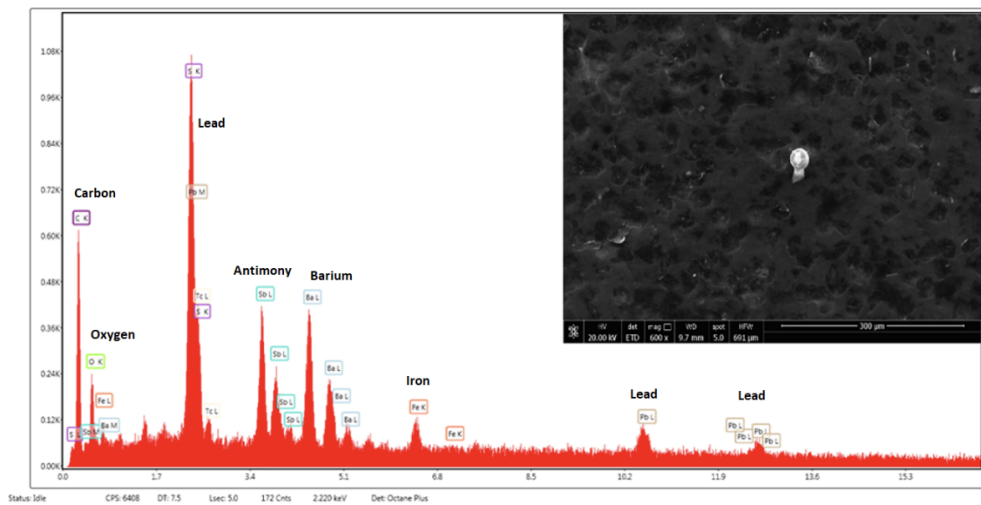
Aineen rakenteeseen ja alkuainekoostumukseen perustuvien indikaattorien käyttö mahdollistaa sekä ampuma-asejäämien että eri ammus- ja asetyyppien tunnistamisen. Ensimmäisen kerran SEM-EDS -menetelmää sovellettiin ampuma-asejäämien rikosteknisessä tutkimuksessa Englannissa vuonna 1968. [12]

Ampuma-aseen lauetessa ammuksen lisäksi räjähdyksestä leviää myös kaasuja, höyryjä ja hiukkasia, jotka ovat peräisin nallin aiheuttamasta ponneaineen syttymisestä. [13] Nämä jäänteet ovat joko orgaanisia tai epäorgaanisia; orgaaniset ovat peräisin ponneainejauheesta ja voiteluaineista, epäorgaaniset jäänteet ovat pohjamaalista, sekä ammuksen ja ampuma-aseen metalleista. Pääosin ampuma-asejäämien analyysi keskittyy epäorgaanisiin jäänteisiin. Ampuma-asejäämien olemassaolon osoittamiseksi vaaditaan lyijyn, bariumin ja antimonin samanaikainen esiintyminen. Lisäksi viimeaikoina myös kalsiumin, piin ja tinan esiintymistä on pidetty ominaispiirteenä ampuma-asejäämien olemassaololle, sillä niitä on harvoin havaittu missään muissa lähteissä. [14]

Koska nämä hiukkaset ovat hyvin kevyitä, ne tarttuvat helposti ampujan käsiin, vaatteisiin, hiusten ja kasvojen pinnalle sekä ympäristöön. Tapauksissa, jossa ase on laukaistu uhria kohti, ruutijäämät voivat antaa merkittävää tietoa luodin kulkusuunnasta, ampujan sijainnista ja rikoksen luonteesta. [15]

Kuvassa 6 esitetty SEM:llä saatu kuva ampuma-asehiukkasista sekä EDS-spektri esiintyvistä alkuaineista. Kuvan näytteet kerättiin hiilipäällysteisillä alustoilla. Näytteet analysoitiin SEM-EDS -menetelmällä, jossa hiukkanen tunnistettiin rakenteensa puolesta elektronikuvassa ampuma-asejäämäksi, jos sen rakenne oli pallomainen tai ei-kiteinen, ja karakterisen röntgensäteiden perusteella se sisälsi samanaikaisesti lyijyä, bariumia ja antimonia. Näiden lisäksi tunnistettiin myös muita alkuaineita, kuten

kaliumia, rautaa ja rikkiä. Tutkittujen hiukkasten alkuaineprofiilit vastasivat ASTM E1588 -standardin mukaista ampuma-asejäämille ominaisten hiukkasten luokittelua, jonka mukaan vain SEM-EDS:llä määritetyt ampuma-asejäämahiukkaset hyväksytään todisteeksi henkilön läsnäolosta ampumatapahtumassa. ASTM-luokittelun mukaan ampuma-asejäämahiukkaset ovat kolmikomponenttisia pallomaisia hiukkasia, jotka sisältävät samanaikaisesti PbBaSb:tä. [16]



Kuva 6. SEM-kuva ja EDS-spektri ampuma-aseen laukauksesta syntyneistä hiukkasista.[16]

Ampumatapauksen ja näytteenoton välinen aika on kriittinen, sillä se määrittää havaitaanko ampuma-asejäämiä epäilystä. Tutkimukset ovat osoittaneet suurimman hiukcashäviön tapahtuvan 3–6 tunnin aikana laukauksesta, riippumatta laukausten määrästä ja aseiden tyypistä. Kun ampumisesta on kulunut yli viisi tuntia, näytteitä tulisi kerätä myös epäillyn käsien lisäksi kasvoista, hiuksista ja vaatteista. [16]

Ampuma-asejäämien analyysin luotettavuudessa ja tarkkuudessa on edelleen haasteita. Yksi suurimmista ongelmista on näiden hiukkasten erottaminen ympäristön muista epäpuhtauksista, jolla on samankaltainen alkuainekomposiitti. Ilotulitteet, jarrupalat ja tietyt teollisuuden prosessit tuottavat samanlaisia hiukkasia kuin

ampuma-ase hiukkaset, niin morfologialtaan kuin koostumukseltaankin. Koneoppimistekniikoiden hyödyntäminen hiukkasten automaattisessa luokittelussa vähentää vääriä tuloksia ja parantaa havaitsemistarkkuutta. Rikosteknisten laboratorioden luokittelukäytännöt vaihtelevat, mikä on este standardoitujen protokollien luomiselle. Erityisesti rajatapaukset, joissa hiukkaset sisältävät bariumia, lyijyä ja antimonin yhdistelmiä ovat tuoneet esiin epäjohtonmukaisuuksia. Pienillä analyttisillä eroilla voi olla suuria vaikutuksia oikeusprosessin luotettavuuden takaamisessa. [2]

3.2 Materiaalitodisteiden analyysi

Liikenneonnettomuuksissa ja rikoksissa, kuten murroissa ja pahoinpitelyissä, syntyy mikroskooppisia jälkiä. Näitä ovat esimerkiksi lasi-, maali- ja tekstiilikuitujäämät. Näiden jälkien havaitseminen epäillyn vaatteista tai jalkineista voi osoittaa henkilön läsnäolon rikospaikalla. Oikeustieteellisessä rikostutkimuksessa näiden mikrojätkien tarkastelu perustuu kahteen lähestymistapaan: todisteen alkuperä pyritään joko tunnistamaan suoraan sen materiaalisten ja rakenteellisten ominaisuuksien perusteella, tai sitä verrataan useisiin potentiaalsiin lähteisiin, jotka ovat peräisin rikospaikalta. Näiden menetelmien avulla voidaan muodostaa perusteltuja johtopäätöksiä jäljen alkuperästä ja näin tukea tapahtumien rekonstruointia sekä epäillyn ja rikospaikan mahdollista yhteyttä. [17]

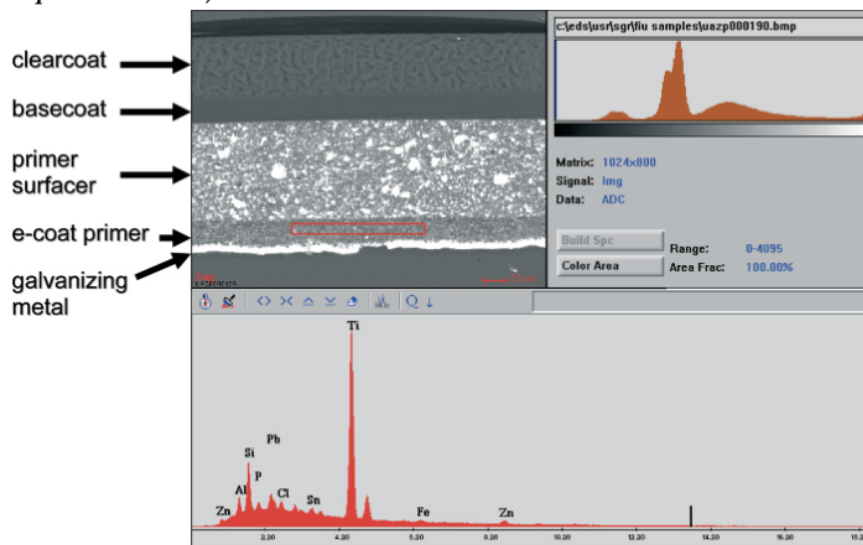
Pelkästään haavarakenteesta ei aina selviä miten vamma on aiheutunut. Esimerkiksi pyöreät haavat, joissa on selkeä sisään- ja ulostuloreitti, eivät aina viittaa ampuma-aseen aiheuttamaan vammaan. Toisaalta suuremmat vammat, jotka ovat aiheutuneet luodin kulkeassa viistosti ihoa hipoen, sekoitetaan usein tylpän aseiden aiheuttamaksi. SEM-EDS -tekniikalla voidaan tutkia luussa ja kudoksissa olevia mikrojätkiä, ja näin saada tietoa käytetystä rikosaseesta. Tämä on tarpeen, kun rikostutkimuksessa on tiedettävä mitä asetta rikoksessa on käytetty. [18]

3.2.1 Auto-onnettomuudet

Auto-onnettomuudet ja niihin liittyvät rikokset ovat yleistyneet, mikä on lisännyt tarvetta tarkemmille analysointimenetelmille. Rikospaikalta löydettyt maalitahrat ja -sirut ovat tärkeitä todistusaineistoja, sillä niiden avulla on mahdollista todistaa rikokseen osallistunut ajoneuvo, ja näin rikokseen osallistunut henkilö.

[19]

Auto-onnettomuuden tapahtuessa auton pintamaalista voi irrota maalisiruja, jotka jäävät onnettomuuspaikalle, vaikka auto ajettaisiin pois paikalta. Tällöin maalisirujen analysointi on tärkeä osa rikostutkimusta. Auton maalausprosessi ja maalit ovat usein ominaisia automalleille, väreille ja pintasuojauksille, ja ne vaihtelevat valmistajan ja valmistusvuoden mukaan. Koska maalit voivat olla valmistajista riippumatta samoja, on tärkeää tehdä yksityiskohtainen koostumusanalyysi, joka ottaa huomioon kaikki pienimmätkin komponentit monikerroksisissa maalisiruissa. SEM-EDS:llä saadaan tärkeää tietoa maalisirunäytteiden rakenteesta ja alkuainekoostumuksesta, mutta se ei anna riittävästi tietoa molekyylilajeista. SEM-EDS:llä saadut alkuainehavainnot ovat kuitenkin tärkeä osa muiden kuvantamismenetelmien kanssa rikoksen ratkaisemisessa. [20] Monikerroksiset maalinäytteet vaativat näytteen käsittelyä, jotta eri kerrokset saadaan esille. Näytteen valmistuksessa ja analyysissä on otettava huomioon kerrosten vaikutus toisiinsa. Kerrokset voidaan erotella toisistaan kokonaan, tai tuoda porrastetusti vaiheittain esille, mikä estää vierekkäisten kerrosten vaikutuksen toisiinsa, mutta on menetelmältään työläs. Poikkileikkausmenetelmässä näytettä voidaan analysoida joko suoraan, tai valettuna ja kiillotettuna. Kuvassa 7 esitetty maalisirun poikkileikkauksen SEM-EDS -analyysi. SEM-EDS -menetelmä on yleisimmin käytetty analyysimenetelmä maalisirujen tutkimisessa yhdysvaltalaisissa rikostutkimuslaboratorioissa. [21]



Kuva 7. SEM-EDS -analyysi auton pohjamaalikerroksen poikkileikkauksesta. [21]

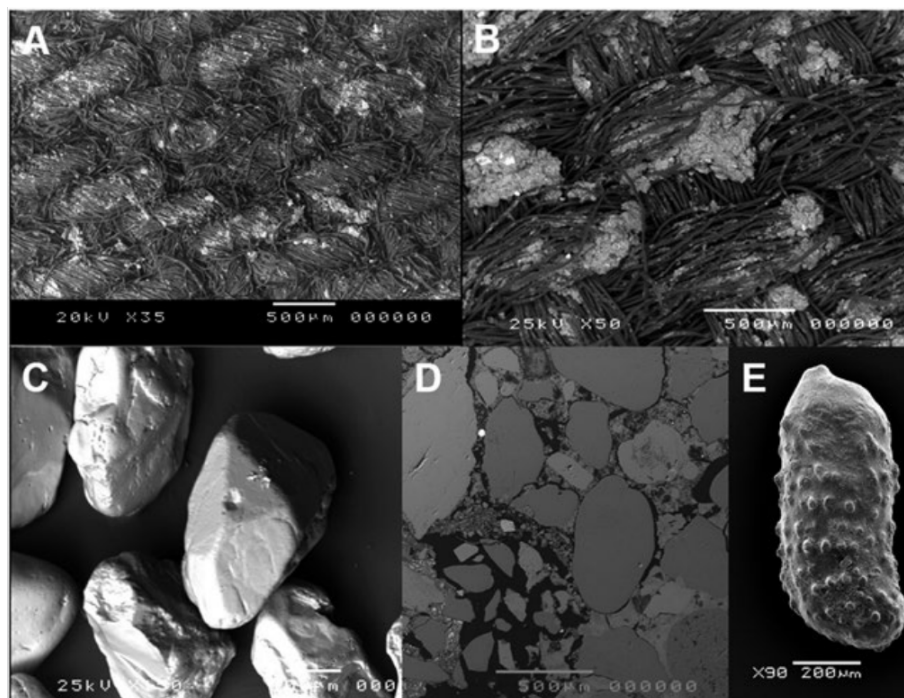
Ajoneuvon tunnistaminen vaatii usein vertailukokoelmaa tai tietokantaa. Kansainvälinen asiantuntijaryhmä SWGMAT (*Scientific Working Group on Materials Analysis*) on kehittänyt kattavan tietokannan ajoneuvoissa käytetyistä maaleista, joka sisältää tietoa sideaineista, pigmenteistä, väreistä ja spektreistä. Näiden tietojen avulla on mahdollista rajata mahdollisten ajoneuvojen joukko. Tietokanta on tärkeä lisä SEM-EDS -analyysin rinnalle. [21]

3.2.2 Maaperäanalyysi

Maaperällä on tietynlaisia ominaisuuksia riippuen sen geologisesta sijainnista. Rikostutkimuksessa maaperän analysointi ei rajoitu vain luonnossa esiintyvien kivien, mineraalien, kasvillisuuden tai eläinperäisten aineiden analysointiin, vaan se kattaa myös ihmisten valmistamien aineiden ja ympäristöperäisten jäämien tunnistamisen. Näitä ovat esimerkiksi ympäristöartifaktit (lasi, lyijy, asfaltti), sekä ympäristöperäiset jäämät, kuten synteettisissä lannoitteissa olevat ionit (nitriitti, sulfitti, fosfaatti). Kuvassa 8 esitellyt esimerkkejä SEM:n käytöstä maaperän analysoimisessa rikostutkimuksessa. [17] Mineraalien erottelun apuna käytetään usein BSE-kuvaa,

jossa kuvan intensiteettitasot auttavat mineraalien tunnistamisista. Tämä erottelutapa vaatii tarkkaa BSE-kuvan kirkkauden ja kontrastin kalibrointia. [4]

Maaperän analyysiä on sovellettu rikostutkimuksessa jo pitkään, ja on paljon tapauksia, joissa maaperä on toiminut fyysisenä todisteena rikostutkimuksessa. Maaperän analyysiä on esimerkiksi sovellettu huumeiden salakuljetusreittien tunnistamiseen. Maaperän analyysi voi tarjota tärkeää tietoa henkilön ja rikospaikan välisestä yhteydestä. Tutkimusten perusteella voidaan todeta SEM-EDS:n olevan hyvä menetelmä maaperän tutkimiseen rikostutkimuksessa, sillä se antaa nopean, luotettavan ja tarkan tuloksen hyvin pienestä näytemäärästä. Kun SEM-EDS:n kanssa sovelletaan esimerkiksi kapillaarielektroforeesia, jolla maaperän kemiallista koostumusta voidaan analysoida määrittämällä anioninen koostumus, on mahdollista saavuttaa erittäin tehokas erotuskyky näytteiden tunnistamisessa ja vertailussa. [17]



Kuva 8. SEM:llä otettuja kuvia maaperänäytteistä. A,B) Maaperän kuvantaminen sen ollessa jonkin muun materiaalin kanssa yhteydessä kertoo esineen ja maaperän välisen kontaktin luonteesta. Kuvassa B maaperän jakautuminen viittaa siihen, että esinettä on raahattu pitkin maaperää. C) kvartsirakenteita on käytetty kuljetushistorian määrittämisessä, mutta myös lähteen luonteen analysoimisessa. D) huonosti tiivistetyn betonin kiillotettu ohut osa. E) Huokoseläin, joka on löydetty maaperän pinnasta ampumarikoksen tapahtumapaikalta. [17]

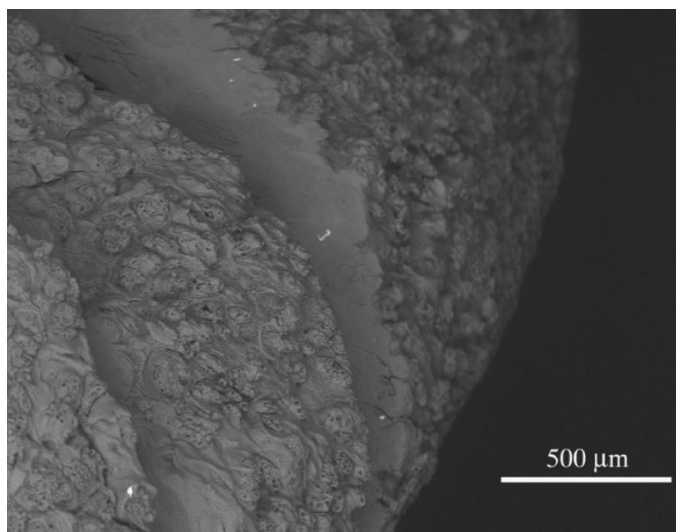
Yksi huomattava SEM-EDS -menetelmän rajoite, kuten useissa elektronisuihkuun perustuvissa tekniikoissa on se, että se ei pysty erottamaan epätasaisista näytteistä polymorfisia muotoja toisistaan (esim. aragoniitti ja kalsiitti) eikä mineraaleja, joilla on samanlainen kemiallinen koostumus (esim. kyaniitti ja topaasi). [22]

3.2.3 Teräase

Pistohaavojen morfologinen analyysi ei ole usein riittävän tarkka rikosaseen tunnistamiseksi, jolloin on tarpeen hyödyntää jotakin tarkempaa analyysimenetelmää. SEM-EDS -menetelmällä voidaan tutkia ja tunnistaa metallijäämiä ihosta ja luusta. Menetelmä toimii tukena pistohaavojen rikosteknisessä arvioinnissa, sillä SEM-EDS:n avulla voidaan havaita mikroskooppisia metallijäämiä, sekä joissain tapauk-

sissa myös orgaanisia jäämiä (kalsium, fosfaatti), jotka viittaavat luuvaurioon. Eri-tyisesti tilanteissa, joissa rikosasetta ei löydy rikospaikalta, on haavan aiheuttanutta rikosasetta vaikea tunnistaa. SEM:n etuna rikosteknisessä analyysissä on sen laaja syväterävyys, jonka ansiosta voidaan tehdä kolmiulotteisia arvioita haavarakenteista ja suorittaa alkuaineanalyysi näytteestä metallijäämien tunnistamiseksi. Useat kokeelliset tutkimukset ovat osoittaneet, että sekä tylpät että terävät metalliesineet voivat jättää metallijäämiä luihin, sillä kovien pintojen osuessa yhteen irtoaa metallipalasia. [23]

SEM-EDS -menetelmää on käytetty rikostutkimuksessa luunäytteiden analysoimisessa, mutta pehmytkudosten tutkiminen rikostutkimuksessa on vielä kehitysvaiheilla. Voidaan kuitenkin todeta, että pelkkä morfologinen analyysi ei tarjoa riittävää tietoa ihon pistohaavan analysoimisessa rikosaseen tunnistamisessa. Jotta näytteitä voidaan analysoida SEM-EDS -menetelmän avulla, tulee näytteet kuivattaa ja päällystää hiilellä. Iholla esiintyvien muiden, mahdollisesti analyysille haitallisten alkuaineiden esiintyminen on myös syytä huomioida. [23] Kuvassa 9 on esitetty SEM:llä kuvattu veitsellä aiheutettu pistohaavan jälki luussa. Luunäyte puhdistetaan ultrapuhtaassa 70 asteisessä vedessä, ja kuivatetaan uunissa. Kuvassa raskaammat alkuaineet, tässä tapauksessa veitsestä irronneet mikrojaljet, esiintyvät kirkkaampana. [18]



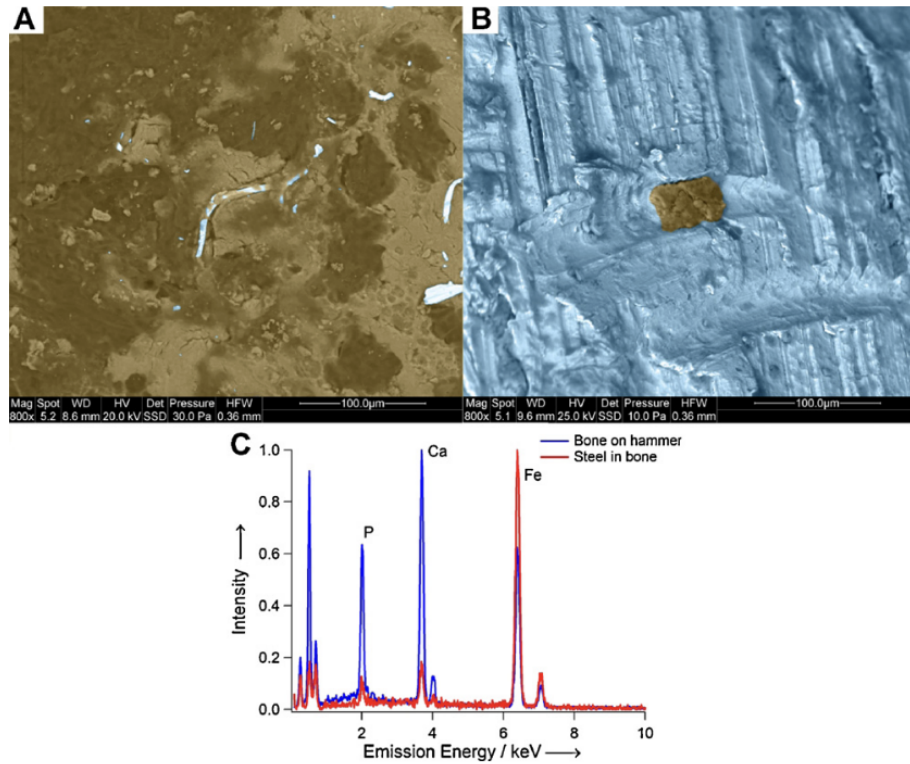
Kuva 9. Mikrojäätteitä (valkoisella) veitsen aiheuttamassa pistohaavassa luussa [18]

3.2.4 Tylppä ase

Tylpän aseiden väkivallan tapauksissa on keskeistä tunnistaa käytetty ase ja varmistaa sen yhteensopivuus uhrista löytyneisiin rikosasejäämiin. SEM-EDS -menetelmällä voidaan tutkia mikrojätkiä iholta, ihonalaiskudoksista ja luukudoksesta. Menetelmällä voidaan tunnistaa rikosaseen materiaali, kuten metalli, puu, lasi, muovi, sekä erilaisia iskupintoja, kuten tiili, laatta, asfaltti, maalipinta. Mikrojätkien laatu riippuu rikosvälineen materiaalikoostumuksesta.

Näytteenotto tehdään yleensä hiiliteipillä, tai ottamalla kudoksenäyte. Molemmissa tapauksissa tarvitaan myös negatiivinen kontrollinäyte. Oikeuslääketieteessä SEM-EDS -menetelmää on käytetty tylpän aseiden aiheuttaman vamman tutkimisessa 1980-luvulta lähtien ja on edesauttanut rikosaseiden tunnistamisessa tai ohjannut jatkotutkimintaa. [14] Kuvassa 10 on esitetty erään rikostapauksen todisteiden SEM-EDS -analyysi. Kallon luusta (A) löytyi useita metallipalasia, jotka koostuivat pääosin raudasta. Luusiruja löytyi vasaran pään urista (B). Kallossa olevien teräspalasten ja vasaran pään alkuainekoostumuksen välisen läheisen samankaltaisuuden löytäminen ei ollut kuitenkaan todistusarvoinen, sillä useat esineet on valmistettu

teräksestä. Tässä tapauksessa tärkein havainto mikä saatiin SEM:llä oli luupalasen löytyminen vasaran päästä, ja DNA-testin avulla voitiin todeta luupalasen olleen peräisin kyseisestä kallosta. [18]



Kuva 10. A) Kallon luusta löydettiin metallipaloja, joilla sama alkuainekoostumus kuin vasaralla. B) Vasaran pinnalta löytyi hiukkanen, jonka alkuainekoostumus vastasi luuta. C) EDS-spektrit sekä luusta löydetyistä metallihiukkasesta, että vasarasta löydetyistä luuhiukkasesta. [18]

4 Yhteenveto

SEM-EDS on tärkeä analyysityökalu erityisesti ampuma-asejäämien todentamisessa rikostutkimuksessa. Erityisesti rikostutkimuksen osa-alueissa, joissa tarve tarkemmille ja luotettavimmille kuvantamismenetelmille oli suuri, on SEM-EDS -menetelmällä ollut merkittävä rooli sen edistämässä. Rajoitteena on kuitenkin itse laitteen omat rajoitteet, mutta myös standardoitujen ohjeistusten puute rikosteknisellä alalla, mikä rajoittaa SEM-EDS -menetelmän hyödyntämistä. Menetelmä tarjoaa keskeistä

tietoa oikeuslääketieteessä rikosten ratkaisemiseksi. Koska rikostutkimuksella voi olla suuria vaikutuksia ihmisten elämään, perusteellinen tutkimus on välttämätöntä.

Viitteet

- [1] G. Zadora ja Z. Brożek-Mucha, *Materials Chemistry and Physics* **81**, 345 (2003).
- [2] M. A. Sacco, S. Gualtieri, A. Santos, B. Mendes, R. Raffaele, A. P. Tarallo, M. C. Verrina, F. Ranno, M. D. Monterossi, P. Ricci ja I. Aquila, *Applied Sciences* **15**, 2634 (2025).
- [3] *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*, SpringerLink Bücher, toimittanut W. Zhou ja Z. L. Wang (Springer New YorkNew York, NY, 2007).
- [4] A. Ali, N. Zhang ja R. M. Santos, *Applied Sciences* **13**, 12600 (2023).
- [5] A. Ul-Hamid, *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy* (Springer International PublishingCham, 2018).
- [6] P. Echlin, *Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (Springer USBoston, MA, 2009).
- [7] N. Ansari, J. Dasgupta, S. Umre ja P. Rajput, kirjassa *Electron Microscopes, Spectroscopy and Their Applications*, toimittanut G. Huerta Cuellar (IntechOpen, 2024).
- [8] V.-D. Hodoroaba, *Characterization of Nanoparticles* (Elsevier, 2020), pp. 397–417.
- [9] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. Ritchie, J. H. J. Scott ja D. C. Joy, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (Springer New YorkNew York, NY, 2018).
- [10] D. Barret, G. Skinner, E. Kendziorra, R. Staubert, L. Stella ja M. V. d. Klis, A fast X-ray timing capability on XEUS, 2002, arXiv:astro-ph/0202451.
- [11] D. E. Newbury* ja N. W. M. Ritchie, *Scanning* **35**, 141 (2013).
- [12] P. Shrivastava, V. K. Jain ja S. Nagpal, *Egyptian Journal of Forensic Sciences* **11**, 11 (2021).
- [13] S. Tambuzzi, G. Gentile, M. Boracchi, S. Andreola ja R. Zoja, *Academic Forensic Pathology* **14**, 62 (2024).
- [14] G. Gentile, S. Andreola, P. Bailo, A. Battistini, M. Boracchi, S. Tambuzzi ja R. Zoja, *American Journal of Forensic Medicine & Pathology* **41**, 280 (2020).
- [15] S. Krishna ja P. Ahuja, *Forensic Science, Medicine and Pathology* **20**, 1371 (2024).
- [16] M. Tahirukaj, A. Surleva, P. Vizureanu, B. Olluri ja A. V. Sandu, *Applied Sciences* **12**, 10477 (2022).

- [17] *Mineralogical Analysis Applied to Forensics: A Guidance on Mineralogical Techniques and Their Application to the Forensic Field, Soil Forensics*, toimittanut M. Mercurio, A. Langella, R. M. Di Maggio ja P. Cappelletti (Springer International PublishingCham, 2023).
- [18] E. Vermeij, P. Zoon, S. Chang, I. Keereweer, R. Pieterman ja R. Gerretsen, *Forensic Science International* **214**, 96 (2012).
- [19] J. S. Pathak ja A. K. Saxena, *Asian Journal of Research and Reviews in Physics* **8**, 1 (2024).
- [20] M. A. Malek, T. Nakazawa, H.-W. Kang, K. Tsuji ja C.-U. Ro, *Molecules* **24**, 1381 (2019).
- [21] L. Kobilinsky, *Forensic Chemistry Handbook* (John Wiley & Sons, IncorporatedNewark, UNITED STATES, 2011).
- [22] H. S. Kikkawa, K. Naganuma, K. Kumisaka ja R. Sugita, *Forensic Science International* **305**, 109947 (2019).
- [23] E. Palazzo, A. Amadasi, M. Boracchi, G. Gentile, F. Maciocco, M. Marchesi ja R. Zoja, *Science & Justice* **58**, 232 (2018).

A Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielmassa osan lähteiden löytämiseen käytettiin keenious tekoälyohjelmaa. käännösapuna käytettiin google kääntäjää ja OpenAi:n GPT-5.3 -kielimallia, jota käytettiin myös tekstin oikoluvussa.