

RE: SOURCE

Slutrapport för projekt

PLASORT-Automatisk sortering av hela plaststycken

Projektperiod: september 2017 till januari 2018
Projektnummer: 44309-1

Med stöd från:



FORMAS



STRATEGISKA
INNOVATIONS-
PROGRAM

PLASORT-Automatisk sortering av hela plaststycken

PLASORT-Automatic sorting of big plastic pieces

| |
|--|
| Titel på projektet – svenska PLASORT-Automatisk sortering av hela plaststycken |
| Titel på projektet – engelska PLASORT-Automatic sorting of big plastic pieces |
| Universitet/högskola/företag Chalmers Industriteknik, MRT System AB, Swerea KIMAB |
| Adress Sven Hultins Gata 9D, 412 58, Göteborg |
| Namn på projektledare Klas Cullbrand |
| Namn på ev övriga projektdeltagare Kristoffer Gramnaes, Göran Lundholm, Jonas Petersson |
| Nyckelord: 5-7 st Svart plast, LIBS, Spektroskopi, WEEE, Sortering |

Med stöd från:



STRATEGISKA
INNOVATIONS-
PROGRAM

Förord

Projektet är finansierat genom forsknings och innovationssatsningen RE:SOURCE som får stöd av Vinnova, Energimyndigheten och FORMAS. Chalmers Industriteknik som har fungerat som samordnare vill tacka de övriga deltagarna MRT System AB och Swerea KIMAB. Ett särskilt tack riktas till GUT Environmental Technologies och Bertin Technologies för att vi har fått besöka dem, prova deras utrustningar och ställa en stor mängd frågor.

Innehållsförteckning

| | |
|--|----|
| Sammanfattning | 3 |
| Summary | 5 |
| Inledning och bakgrund | 7 |
| Utmaning | 7 |
| Skäl till att utveckla teknik för sortering av stora stycken mörk plast..... | 7 |
| Tillgängliga identifieringstekniker | 9 |
| IR | 9 |
| LIBS..... | 10 |
| Gnistspektroskopi | 10 |
| Genomförande | 11 |
| Kravspecifikation och nyckelintressenter | 12 |
| Analys av provbitar..... | 13 |
| Test av LIBS laboratoriemiljö | 13 |
| Litteraturstudie..... | 16 |
| Plasternas blandbarhet | 16 |
| Krävd sorteringsnoggrannhet för plaster med flamskyddsmedel | 16 |
| Studiebesök och test av kommersiella utrustningar..... | 17 |
| Bertin Technologies..... | 17 |
| GUT Environmental Technologies | 18 |
| Logistik | 19 |
| Tänkt hanteringslösning..... | 19 |
| Flödessimuleringar..... | 20 |
| Analys och diskussion | 23 |
| Sensorsystem | 23 |
| Övergripande process | 24 |
| Lönsamhet..... | 25 |
| Miljöeffekter | 25 |
| Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg | 26 |
| Projektkommunikation..... | 26 |
| Referenser | 27 |
| Bilagor | 29 |
| Bilaga 1, analys hos Swerea KIMAB. FTIR & TGA | 29 |
| Bilaga 2, Testresultat vid användning av kommersiella system..... | 35 |
| Bilaga 3, resultat från simuleringsmodell..... | 37 |

Sammanfattning

Syftet med detta projekt var att undersöka förutsättningarna för att utveckla en automatiserad process för identifiering och sortering av hela, mörka plaststycken från WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment).

Uppskattningsvis är nuvarande svenska materialåtervinningsgrader för plast från WEEE endast 25% [4]. Om den resterande mängden materialåtervanns istället för att förbrännas skulle utsläppen av CO₂ekv kunna reduceras med nästan 57 000 ton. Välsorterad och mindre kontaminerad plast ökar kraftigt förutsättningarna att förverkliga den potentialen [5]. En nyckel för att åstadkomma detta är att sorteringen sker automatiskt. Dels för att eliminera mänskliga faktorn och dels för att lönekostnader inte skall göra sorteringen olönsam. Automatisk sortering görs redan idag, men de tillgängliga lösningarna är fokuserade på ljusa och inte mörka eller svarta plaster. Detta gör dem olämpliga för identifiering av plast från WEEE, men också för plast från exempelvis uttjänta fordon som oftast är mörk.

Potential är alltså stor när det gäller att öka återvinningsgraden för WEEE-plast genom bättre sorteringsmetoder. Samtidigt hjälper detta till med att avgifta kretsloppet för plast; och ligger därför helt i linje med Naturvårdsverkets uppdrag "Giftfria och resurseffektiva kretslopp". Plast från elektronik nämns där som en särskilt intressant avfallsström [5].

Det finns lovande tekniker för att identifiera mörk plast och dess tillsatser. De är dock inte tillräckligt snabba för att passa in i nuvarande automatiska processer, där sorteringen av plast görs efter fragmentering. Kan sorteringen däremot göras innan fragmentering medges en längre cykeltid utan att skapa flaskhalsar. Till exempel ger ett bakstycke från en platt-tv upphov till en enda identifieringscykel om det sorteras direkt, jämfört med de hundra- eller tusentals bitar som måste identifieras efter att det har fragmenterats. Hypotesen i detta projekt är därför att nuvarande tekniker för att identifiera mörk plast är tillräckligt bra för att ingå i ett automatiskt sorteringssteg direkt efter demontering.

För att undersöka om hypotesen stämmer har projektet:

- Identifierat vilka nyckelintressenterna för sorteringsprocessen och dess output är.
- Utarbetat en kravspecifikation som processen måste uppfylla för att bli lönsam och möta aktuella regelverk med avseende på giftfria kretslopp.
- Identifierat en teknisk lösning som motsvarar denna kravspecifikation.

Detta har lyckats väl och projektgruppen har nått följande övergripande slutsatser:

- Det finns kommersiellt tillgänglig sensorteknik som kan sortera stora stycken ljus, mörk och transparent WEEE-plast i industriell skala. Tekniken är tillräckligt bra för att garantera återvinningsbara fraktioner enligt de regelverk som gäller inom EU.
- En automatiserad process är nödvändig och möjlig för att på ett lönsamt sätt sortera stora stycken WEEE-plast direkt efter demontering.
- En implementerad sorteringsprocess gör samhällsnytta genom att bidra till giftfria kretslopp och ökade återvinningsgrader av WEEE-plast.

För att nyttiggöra projektets resultat kommer finansiering till ett fortsättningsprojekt att sökas. Syftet är då att ta den föreslagna processen närmare kommersialisering genom att:

- Verifiera att ett sensorsystem som har monterats på en robot ger korrekta resultat.
- Ta fram en hanteringslösningsprototyp där cykeltider och industriell lämplighet bekräftas.
- Validera att sorteringen i volymproduktion genererar återvinningsbara fraktioner med avseende på materialsammansättning och frånvaro av förbjudna tillsatser.

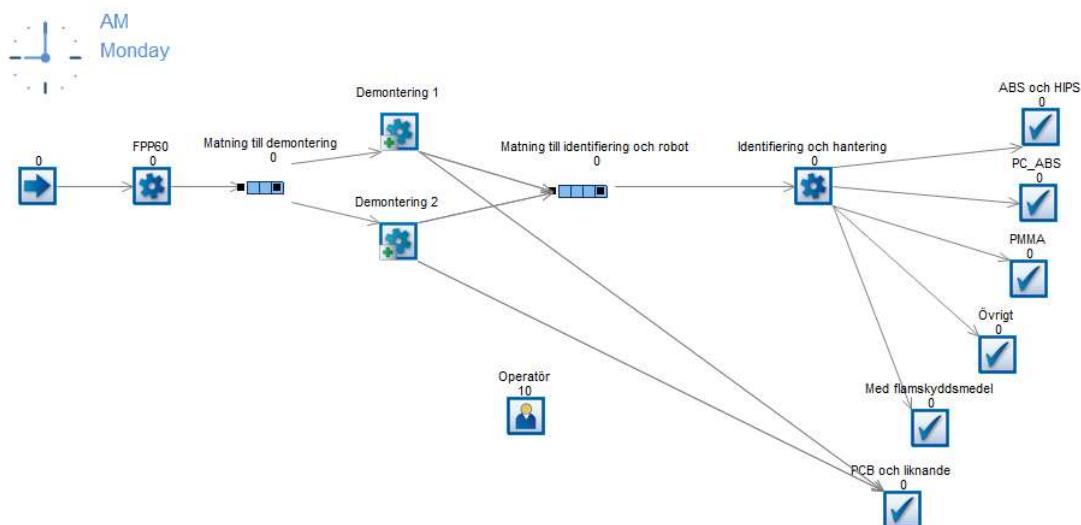


Bild 1. Simuleringsmodell som har använts för att utvärdera lönsamhet och processparametrar vid sortering av plaststycken direkt efter demontering.

Summary

The purpose of this project was to explore the conditions for developing an automated process for the identification and sorting of whole, dark plastic pieces from WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment).

Estimatedly, current Swedish material recycling rates for plastic from WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) is only 25% [4]. If the remaining amount would be recycled instead of incinerated, CO₂ emissions could potentially be reduced by almost 57,000 tonnes. Well-sorted and less contaminated plastics greatly increases the conditions for this [5]. There is thus potential to contribute to greatly increased recycling rates by sorting plastic from WEEE. At the same time, this helps to detoxify the plastic recycling flows; and is therefore entirely in line with the Swedish Environmental Protection Agency's mission "Non-toxic and resource-efficient recycling flows". Plastics from electronics are mentioned as a particularly interesting waste stream [5].

Automatically identifying and sorting plastics is nothing new in itself. On the other hand, the existing automated solutions are focused on light and not dark or black plastic pieces. It makes these solutions unsuitable for the identification of plastic from WEEE, but also for plastics from, for example, end of life vehicles, which often also consist of a large proportion of dark plastics.

There are promising techniques to identify dark plastics and its additives. However, they are not fast enough to fit into current automatic sorting processes, where the sorting of plastics is made after fragmentation. However, if the sorting can be done before fragmentation a longer cycle time is possible without creating bottlenecks. For example, a plastic panel from a flat screen needs one identification cycle if it is sorted directly, compared to the hundreds or thousands of pieces that must be identified after it has been fragmented. The hypothesis in this project is therefore that current technologies for identifying dark plastic may be good enough to be part of an automatic sorting step immediately after disassembly.

To investigate if the hypothesis is correct, the project has:

- Identified which are the key stakeholders of the sorting process and its output.
- Developed a requirement specification that the process must fulfil in order to be profitable and meet current regulations regarding non-toxic cycles.
- Identified a technical solution that meets this requirement specification.

This has been successful and the project team has reached the following overall conclusions:

- There is commercially available sensor technology that can sort large, light-coloured, dark and transparent WEEE plastic on an industrial scale. The technology is good enough to ensure recyclable fractions in accordance with the regulations in force in the EU.
- An automated process can efficiently sort large pieces of WEEE plastic immediately after disassembly.
- An implemented sorting process makes public benefit by contributing to non-toxic recycling flows and greatly increased recycling rates of WEEE plastics.

In order to utilize the project's results, funding for a continuation project will be sought. The aim is then to take the proposed process closer to commercialization by:

- Verifying that a sensor system mounted on a robot provides accurate results.
- Creating a prototype handling system to confirm cycle times and industrial suitability.
- Validate that the sorting in volume production generates recyclable fractions in regards to material composition and the absence of prohibited additives.

Inledning och bakgrund

Här beskrivs bakgrund och skäl till att projektet har genomförts samt vilka utmaningar och problem det avser möta. Vidare ges en orientering inom området, inklusive aktuellt kunskapsläge.

Avslutningsvis motiveras projektets hypotes och det ges en fördjupad inblick i tillgängliga identifieringstekniker för mörk plast.

Utmaning

Syftet med detta projekt har varit att bidra till ökad återvinningsgrad av plast från WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment). Detta har gjorts genom att undersöka förutsättningarna för att utveckla en automatiserad process som automatiskt identifierar och sorterar hela, mörka plaststycken från WEEE. För att uppnå detta har projektet avsett besvara följande frågeställningar:

- Vilka är nyckelintressenterna för processen och dess output?
- Vilka kriterier ska processen och det fortsatta arbetet baseras på och förhålla sig till?
- Vilket identifieringssystem kan bäst uppfylla processens definierade kriterier?
- Vilka matning- och sorteringslösningar kan bäst uppfylla processens definierade kriterier?
- Hur ska processen som helhet vara konstruerad?
- Vilka nyckelintressenter bör involveras i ett efterföljande innovationsprojektet?

Skäl till att utveckla teknik för sortering av stora stycken mörk plast

I jämförelse med andra länder samlar vi i Sverige in en relativt stor mängd el- och elektronikavfall [1], så kallat WEEE. Insamlingsmålet i EU-direktivet om producentansvar för el-avfall är 4 kg per invånare, vilket Sverige uppfyller med råge. 2015 samlades det i snitt in 14 kg per invånare [2]. Även gällande återvinningsgrad ligger Sverige långt framme. I takt med att allt mer intäktsdrivandemetall ersätts med plast ser dock elektronikåtervinningsbranschen stora utmaningar framför sig, dels genom minskade intäkter och dels genom att det blir svårare att nå återvinningsmålen för WEEE [3].

Uppskattningar på nuvarande materialåtervinningsgrader för plast från WEEE varierar men även i de mer positiva uppskattningarna uppskattas materialåtervinningsgraden till endast 25%, motsvarande 7 000 ton [4]. Om den resterande mängden plast från WEEE skulle materialåtervinnas istället för förbrännas skulle utsläppen av CO₂ekv potentiellt kunna reduceras med nästan 57 000 ton [5].

Välsorterad och mindre kontaminerad plast ökar starkt förutsättningarna för materialåtervinning. Genom att identifiera oönskade tillsatser kan plast som inte bör återcirkuleras sorteras ut för separat hantering. Det finns med andra ord en stor potential att öka materialåtervinningen genom att kunna sortera plast från WEEE.

Samtidigt hjälper detta till med att avgifta kretsloppet för plast och ligger därför helt i linje med Naturvårdsverkets uppdrag ”Giftfria och resurseffektiva kretslopp” där plast från elektronik nämns som en särskilt intressant avfallsström [5].

Baserat på projektgruppens sammantagna erfarenhet inom elektronikåtervinningsbranschen kan en förbehandling för WEEE beskrivas i tre övergripande steg:

- 1 Manuell demontering.
- 2 Fragmentering.
- 3 Sortering av material.

Under demonteringssteget plockas produkter isär och miljö- och hälsofarliga komponenter samt särskilt värdefulla komponenter och material sorteras ut. Vid vissa förbehandlingar för WEEE förekommer en begränsad utsortering av större plaststycken i samband med demonteringen. Dock sorteras dessa sällan efter plasttyp utan som plast generellt och om sortering per plasttyp sker i efterföljande steg så är det ofta efter att materialet trots allt malts. Projektgruppen har inte kunnat identifiera några initiativ med fokus på att automatiskt sortera större plaststycken tidigt i förbehandlingsprocessen.

Att automatiskt identifiera och sortera plast är inget nytt i sig. Däremot är de existerande automatiserade lösningarna fokuserade på ljusa och inte mörka eller svarta plaster. Därmed är dessa lösningar olämpliga för identifiering av plast från WEEE. För att sortera mörk plast används oftast densitetsbaserade sorteringstekniker så som ”sink and float”. En sådan process ger vissa fördelar, bl.a. att materialet rengörs och att pappersetiketter kan avlägsnas men också nackdelar relaterade till låg kvalitet på utgående materialfraktioner, låg genomloppshastighet och svårigheter relaterade till styrning av processparametrar [6].

Nedan beskrivs tillgängliga identifieringstekniker samt deras styrkor och svagheter. I huvudsak kan sägas att det finns lovande tekniker för att identifiera mörk plast och dess tillsatser, men att de inte är tillräckligt snabba för att sköta sorteringen efter fragmentering. Kan sorteringen däremot göras innan fragmentering medges en längre cykeltid utan att skapa flaskhalsar.

Hypotesen är att det helt enkelt blir lättare att sortera t.ex. ett helt bakstycke från en platt-tv än att gå igenom de hundra- eller tusentals bitar det har blivit till efter fragmentering var för sig.

På denna övergripande nivå kan processens grundupplägg även anses vara generell för sammansatta produkter så som exempelvis uttjänta fordon. Processen bygger på att merparten av utsorteringen för materialåtervinning sker efter det att komponenter och material malts till mindre bitar. Alltså är projektets hypotes tillämplig på ett flertal produkter som innehåller mörk plast.

Tillgängliga identifieringstekniker

Spektroskopiska tekniker är lovande för on-line analys då de kan ske kontaktlöst, ofta relativt fort (under sekunder), och är i praktiken oförstörande. Av den anledningen är det de som är i fokus för detta projekt, men även andra metoder har tagits i beaktande. Spektroskopiska tekniker innebär att elektromagnetisk strålning (ljus) interagerar med materia. De delas vanligen upp beroende på hur interaktionen sker och vilken våglängd som interagerar och detekteras. Spektroskopiska tekniker som används för att analysera plast är infraröd (IR) reflektion, Raman-spridning, röntgen fluorescens (XRF), laserinducerad breakdown spektroskopi (LIBS) samt terahertz (THz) spektroskopi och gnistspektroskopi (spark OES) [7] [8] [9] [10] [11].

XRF kan inte identifiera själva plasttypen, endast eventuella tillsatser av halogener. Raman kan identifiera plasttyp, men är för långsam (upp till flera minuter per analys) [Utifrån de handhållna instrument som har testats. Kommersiella instrument inriktade på snabb analys on-line har inte identifierats]. Terahertz spektroskopi har rapporterats kunna identifiera plasttyper [12] men finns inte kommersiellt tillgänglig och har inte varit möjligt att utvärdera.

IR, LIBS och gnistspektroskopi är de tekniker som bäst uppfyller industriella krav på analyskapacitet och snabbhet. Därför har dessa valts ut för vidare utvärdering i projektet. Nedan beskrivs teknikerna mer ingående.

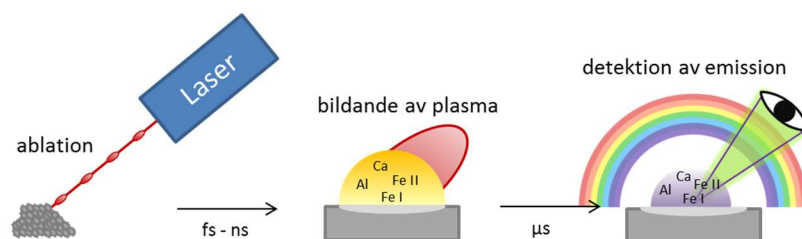
IR

Vid IR sker ljus-materia-interaktionen med molekylära vibrationer vilket medför att de flesta polymerer har en distinkt respons. Däremot ger inte alla vibrationer upphov till detekterbara signaler och många flamskydd och fyllmedel är svåra eller omöjliga att upptäcka. Raman är även det en vibrations-spektroskopi som dessutom ofta är känslig för andra vibrationer och kan komplettera IR. Däremot är Ramansignalerna svaga och kräver lång analysid (flera minuter) vid färgade plaster och är därför opraktisk i on-line tillämpningar [8] [9] [11].

IR spektroskopi för plaster är utformat så att materialet belyses med bredbandigt IR-ljus och det reflekterade ljuset detekteras. Varje plasttyp absorberar specifika våglängder av IR-ljuset vilket får effekten att det reflekterade ljuset har lägre intensitet vid de våglängderna. Nackdelen är att svarta material absorberar mycket stor del av ljuset och den reflekterade signalen blir då väldigt svag. Analysinstrument som använder IR reflektion finns både som handhållna instrument och som sensorer som kan placeras på avstånd ovanför t.ex. ett transportband. Ofta används långvågigt IR ljus (NIR) eftersom det är lättare att generera och inte absorberas av vattenånga i luft [8].

LIBS

Laser inducerad breakdownspektroskopi (LIBS) är en laserbaserad teknik som ger i huvudsak elementarinformation och även viss molekylär information. LIBS processen är schematiskt beskriven i **Fel! Hittar inte referenskälla..** Tekniken går ut på att ljuspulser från en laser fokuseras på ett material. När ljuset interagerar med materialet bildas ett plasma som i sin tur skickar ut ljus vilket innehåller information om sammansättningen i materialet. Det emitterade ljuset samlas in med optik och leds till en spektrometer. Ett typiskt spektrum för plast syns i Figur 6. Informationen om materialet representeras av toppar vid specifika våglängder och intensiteten på topparna avgörs av både laserintensiteten och materialets sammansättning.



Figur 1. Schematisk bild av LIBS-processen. En laserpulser avverkar en del av materialet och inom laserpulserns längd (ca 5 ns i dessa experiment) bildas ett plasma bestående av atomer, joner, elektroner och mindre molekyler vilka ytterligare exciteras. När plasmat svalnar (atomerna/jonerna relaxerar) sänds ljus ut vid våglängder som är specifika för varje atom/ion. Ljuset detekteras med en spektrometer och intensiteten på ljuset kan härledas till materialets sammansättning

Eftersom LIBS-signalerna beror på materialets elementar-sammansättning (vilka atomer det är uppbyggt av) så ger olika plaster upphov till olika intensitetsförhållande på topparna i LIBS-spektrumet. Då det till skillnad från IR-spektra inte är fråga om unika spektral-toppas så är identifieringen av plast inte lika rättfram med LIBS men med maskinlärande processer som t.ex. neurala nätverk kan LIBS-spektrerna för olika plasttyper särskiljas. Det kräver dock att spektra kan jämföras med ett tidigare uppmät referensspektrum från samma material. Liknande metoder är vanliga även för de andra spektroskopiska teknikerna såsom NIR då de ger en bra möjlighet till snabb automatiserad analys av spektrerna [10] [11].

Gnistspektroskopi

Gnistspektroskopi är mycket likt LIBS men med skillnaden att plasmat skapas genom en gnist-urladdning mellan två elektroder istället för genom en laser-ablation [13].

Genomförande

Detta avsnitt redogör för projektets utförande och erhållna resultat. En av de första aktiviteterna, som sedan vägledde resten av arbetet var att ta fram en kravspecifikation, som inledningsvis baserades på MRT:s erfarenheter från återvinning av platta bildskärmar. Som nästa steg tog MRT fram ett antal provbitar av olika sorters plast, vilkas materialinnehåll analyserades med tidskrävande laboriemetoder av Swerea KIMAB. Detta för att vi skulle ha ett facit att jämföra med, dels i testerna med Swerea KIMAB:s LIBS uppsättning och dels när kommersiella system utvärderades.

Efter informationssökningar på internet och samtal med kollegor hittades två leverantörer av identifieringsutrustning som kunde passade för att identifiera stora bitar mörk plast i industriell skala. Bägge leverantörer besöktes i syfte att se hur korrekta resultat dessa utrustningar kan leverera och bedöma hur lämpliga de är för industriell användning.

Parallellt med detta arbete gjordes en litteraturstudie och intervjuer med plaståtervinnare av CIT i syfte att förstå vilka krav som gäller för sorteringsnoggrannhet, dels med avseende på vilka plaster som måste separeras från varandra och vilka halter av förbjudna tillsatser som måste kunna upptäckas.

Med dessa parametrar på plats utarbetade projektgruppen ett förslag på hur en sorteringsprocess skulle kunna se ut i sin helhet och som ett sista steg gjordes en serie flödessimuleringar för att förfina kravspecifikationen och bedöma den föreslagna processens potentiella lönsamhet.

Kravspecifikation och nyckelintressenter

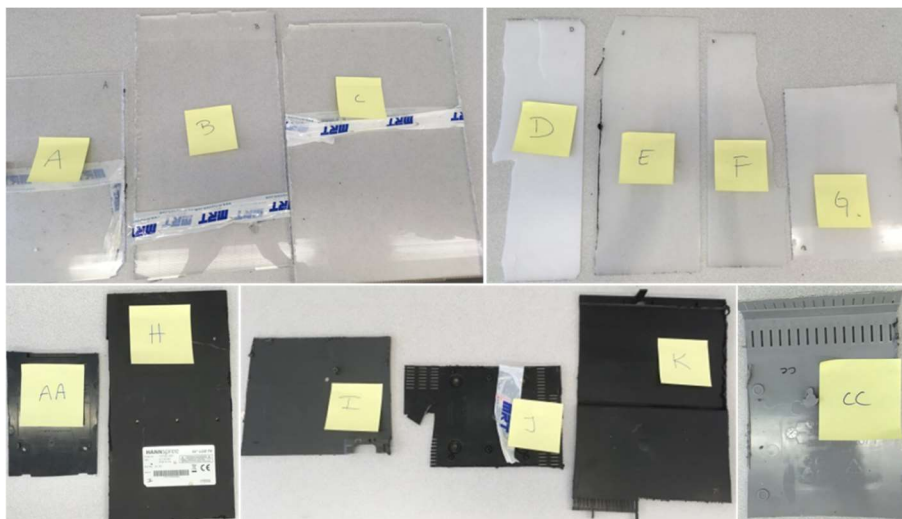
Projektet började med att ta fram en kravspecifikation för identifieringssystemet. MRT som har levererat många systemlösningar till återvinningsindustrin gjorde en första bedömning av vilka krav som gäller. Under projektets gång har dessa löpande justerats i takt med att vi har lärt oss mer och att MRT har kontaktat fler potentiella kunder. Den kravspecifikation som projektet till sist kom fram till följer nedan:

- Identifieringssystemet skall kunna kommunicera med annan utrustning för att möjliggöra automatiserad hantering
- Systemet skall klara av att stå efter arbetsstation med två operatörer utan att upplevas som en flaskhals. Detta innebär en cykeltid på 15 sekunder för identifiering och sortering. Denna layout är typisk för flera elektronikförbehandlare och har därför valts som utgångspunkt [14].
- Systemet skall kunna sorteras i fraktioner som innehåller en plasttyp var och om detta inte är möjligt skall de resulterande fraktionerna innehålla plaster som går att blanda vid compounding
- Systemet skall ha återbetalat sig på tre års sikt
- Systemet skall klara en mycket dammig inomhusmiljö med stora temperaturskillnader
- Resultatet från typbestämning av plast skall inte lämna något utrymme för tolkning. Vid osäkra fall skall plasten sorteras till en "vet ej" -fraktion
- MRT skall ej behöva serva systemet mer än en gång per år
- Dagligt underhåll skall kunna skötas av den personal som redan arbetar på återvinningsanläggningen där systemet tas i drift

De nyckelintressenter som har kunnat identifieras under projektet är leverantörer av hanteringssystem, leverantörer av sensorsystem, ansvariga myndigheter, uppköpare av återvunnen plast och framför allt de aktörer som förbehandlar WEEE.

Analys av provbitar

Det insamlade testmaterialet som kommer från platta skärmar hade färgerna svart, vitt, transparent, och grått, se Figur 2. Sammansättningen har analyserats av Swerea KIMAB med labb-analysmetoder såsom FTIR-ATR, TGA, och SEM-EDS. Dessa lämpar sig dock inte som on line -instrument då analysen tar minst en minut eller mer.



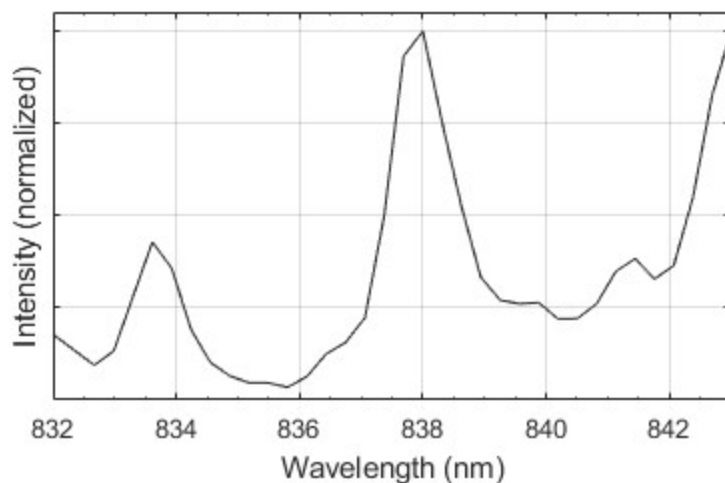
Figur 2. Testmaterial från platta skärmar.

De svarta plasterna bestod av PS eller en blandning av PS och ABS. Den grå bestod av PC + ABS. De transparenta bestod av PMMA. De vita (semi-transparenta) var mer blandade: en PC, en PMMA+PS, samt två obestämbara. Det skulle alltså vara möjligt att sortera ut svarta och transparenta plaster direkt, men metoden skulle då bli mycket känslig för oväntade variationer i materialsammansättning vilket inte är önskvärt.

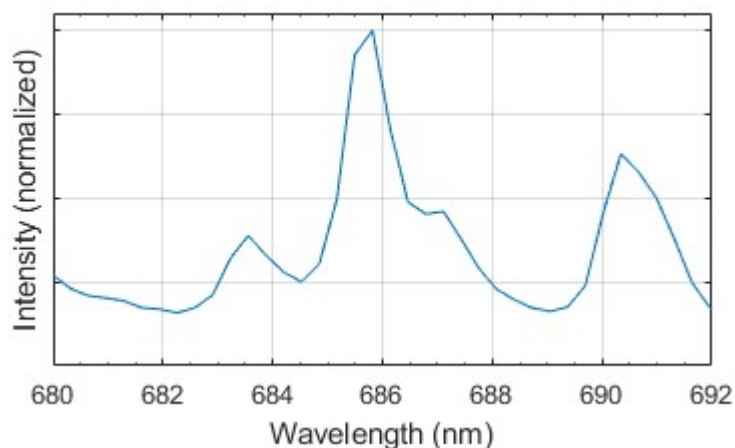
Enligt [15] är dessa provbitar ett representativt urval av de plasttyper som förekommer i platta bildskärmar.

Test av LIBS laboratoriemiljö

LIBS-tester har utförts i labb av SWEREA KIMAB för att komplettera de tester som utfördes med kommersiellt instrument. Det visade sig att ett kort fokallavstånd (100 mm) krävdes för att detektera halogener (klor, fluor, brom), men ingen tydlig effekt av att använda Ar-atmosfär eller kortare laservåglängd (532 nm istället för 1064 nm) märktes. Cl kunde detekteras i PVC-plast och F kunde detekteras i ECTFE-plast, se Figur 3 och Figur 4. Däremot fanns ingen tydlig signal av Br i det material som var tillgängligt (HIPS med 8% Br).

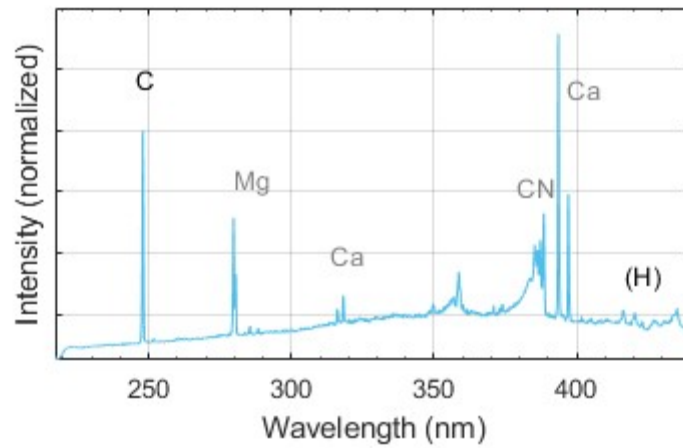


Figur 3. LIBS spektrum på PVC, klor-toppen som indikerar PVC syns vid 838 nm.

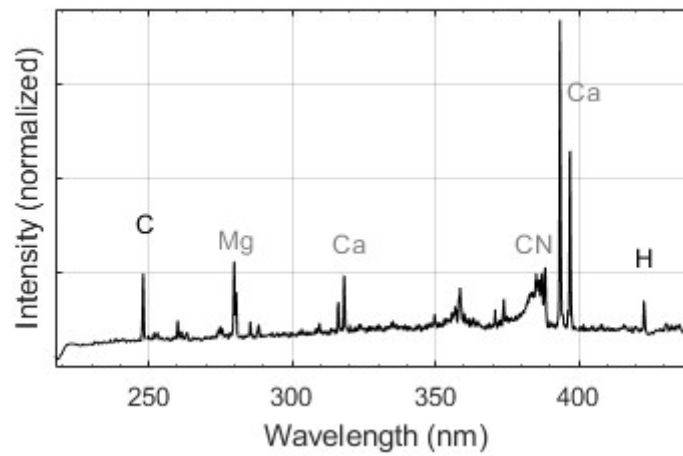


Figur 4. LIBS spektrum på ECTFE plast. Fluor-toppen syns vid 685.8 nm

För att få tydlig signal från transparenta plaster krävdes även där ett relativt kort fokallavstånd (100 mm). Förutom specifika tillsatser såsom halogener är LIBS spektra för olika polymerer mycket lika, se PMMA i Figur 5 och PS/ABS Figur 6. Det som skiljer är främst den relativa intensiteten för de olika topparna. Att direkt ge en analys utifrån endast ett LIBS spektrum är därför mycket svårt, men att skilja dem åt är enklare. T.ex. är C-toppen mycket mer dominerande för den transparenta PMMA plasten (Figur 5) jämfört med den svarta PS/ABS-plasten (Figur 6).



Figur 5. LIBS spektrum av transparent PMMA



Figur 6. LIBS spektrum av svart PS/ABS

Litteraturstudie

CIT genomförde en litteraturstudie för att förstå vilka plaster som kunde blandas och vilka gränsvärden som gäller för flamskyddsmedel. Syftet med detta är att förstå vilka krav som gäller för sorteringsnoggrannheten. Av särskilt intresse är blandbarheten för de plaster, ABS och PS/HIPS som de utvärderade utrustningarna misslyckades med att särskilja. För att förtydliga kunde PS/HIPS bli klassade som ABS medan ABS alltid blev korrekt klassad.

Plasternas blandbarhet

Som synes Figur 7. Procentuell viktfordelning mellan olika plaster i en platt bildskärm. är fördelningen mellan PS: 0,6% och ABS: 12% [15]. Enligt [16] och [17] finns det inga negativa effekter för ABS-fraktionen om PS/HIPS står för upp till fem procent av vikten, vilket innebär att samtlig PS/HIPS kan sorteras som ABS. Därför antas i alla beräkningar och simuleringar att ABS och PS hamnar i samma fraktion.

| Materialtyp | Viktprocent |
|---------------------|-------------|
| ABS | 12,0% |
| PC-ABS | 4,3% |
| PMMA | 12,4% |
| PS | 0,6% |
| Övrigt | 2,0% |
| Med flamskyddsmedel | 5,0% |

Figur 7. Procentuell viktfordelning mellan olika plaster i en platt bildskärm.

Krävd sorteringsnoggrannhet för plaster med flamskyddsmedel

Inom EU gäller WEEE direktivet, som anger att all plast innehållande bromerade flamskyddsmedel skall sorteras bort. Samtidigt anges att all nyproducerad plast måste innehålla mindre än 0,1 procent, vilket antyder att det finns en medvetenhet om att ingen sorteringsprocess är fullständig [18].

Det finns forskningsresultat [19] visar på att plastbitar från WEEE som innehåller mindre än fem procent Br kan sorteras till den återvinningsbara fraktionen, då denna som helhet kommer att klara sig under gränsvärdena för bromerade flamskyddsmedel. Detta skulle i så fall antyda att ett instrument som är kapabelt att identifiera alla plastbitar med mer än eller lika med fem procent Br är bra nog.

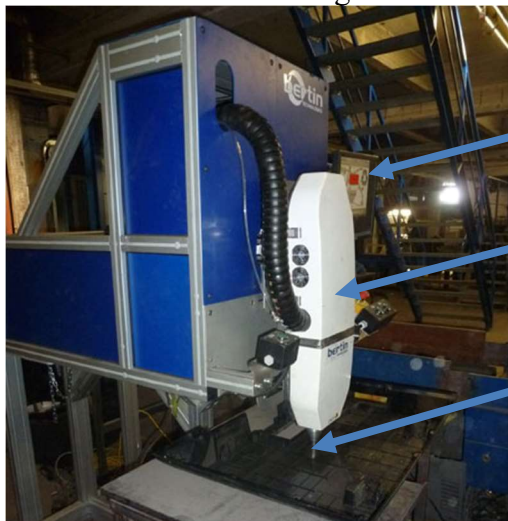
Studiebesök och test av kommersiella utrustningar

För att se hur korrekta resultat dessa utrustningar levererade togs de i förväg analyserade plastbitarna med till leverantörerna, där vi fick använda deras utrustningar till att identifiera deras materialsammansättning. På så sätt kunde vi få en indikation om hur korrekt identifiering varje utrustning var kapabel till.

Bertin Technologies

Bertin Technologies utrustning Quantom bygger på den tidigare beskrivna LIBS-tekniken och är avsedd för sortering av mörk plast inom återvinningsindustrin. Precis som testen i laboriemiljö indikerade så används maskininlärning för att använda skillnader i uppmätt spektra till att bestämma materialinnehållet i plast.

Handhavandet går till så att en operatör tar det plaststycke som skall identifieras, placerar det under den del som kommer i kontakt med plastbiten (se Figur 8), aktiverar identifieringen med ett tvåhandsgrepp - varvid lasermunstycket rör sig ned mot plaststycket genererar ett antal pulser, analyserar resultatet och presenterar detta på bildskärmen. Själva analysen tar ca. 3 sekunder och hela cykeltiden inklusive handhavande och sortering blir ca. 15 sekunder per plastbit.



Bildskärm

Laser och spektrometer

Den del som kommer i kontakt med plastbiten

Figur 8. Bertin Quantom - LIBS-utrustning för identifiering av plast.

Svarta plaster

LIBS-instrumentet identifierade svarta plaster korrekt, med undantag för en PS som identifierades som ABS (vilket ju är PS med akrylnitril och butadien).

Vita och transparenta plaster

Vita och transparenta plaster gick inte att identifiera då produkten inte var tränad på dessa. Det skall tilläggas att ljusa plaster är svårare att få LIBS signal från, men har i separata labbtester visats vara möjligt.

Flamskyddsmedel och tillsatser

Instrumentet kunde med viss osäkerhet identifiera Br med en halt på ca 7%, men missade biten med 2% Br. Dessutom missades Cl och Sn vilka i testbiten uppgick till 2% och 2.4 %. Däremot identifierades fosfor vilket i testbiten var 1%.

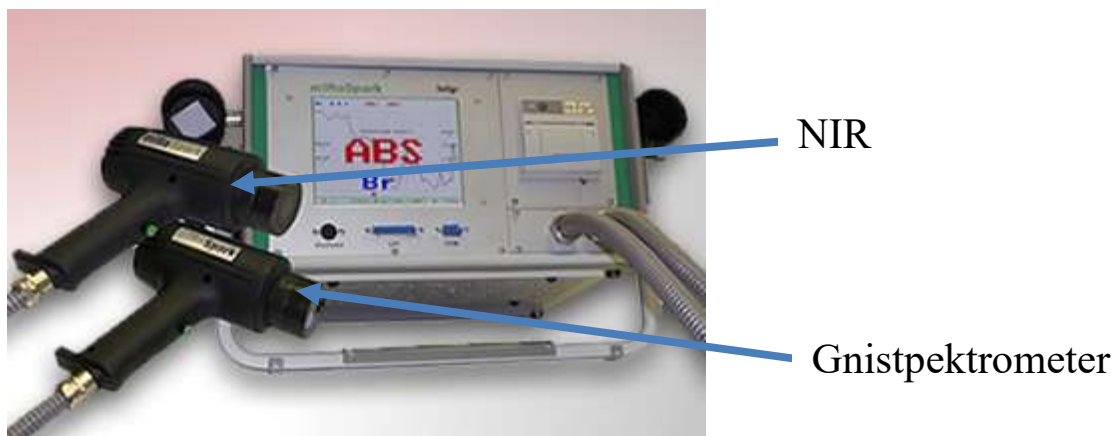
Känslighet för föroreningar

Då utrustningen skickar ett flertal laserpulser så bränner den igenom de material (smuts, ytbehandling eller lack) som är på plastbitens yta och kan analysera dess huvudsakliga materiellinnehåll. Därmed ges förutsättningar till korrekt identifiering av plastbitar i de flesta skick.

GUT Environmental Technologies

GUT:s utrustning mIRoSpark är en kombinerad NIR- och gnistspektrometer, som består av två pistoler kopplade till en analysenhet med bildskärm. Transparenta och ljusa plaster kan analyseras med NIR-pistolen vilken inte kräver kontakt med plastbiten, ger svar inom en sekund och identifierar PVC.

Gnistspektrometern används för att identifiera de plaster som NIR delen inte klarar och fungerar på ett liknande sätt som LIBS (0 Gnistspektroskopi). Den tar även med det uppmätta spänningsfallet mellan polerna som en parameter i den mönsterigenkänning som används för att identifiera plasttyp och tillsatser.



Figur 9. GUT mIRoSpark - kombinerad NIR och gnistspektrometer

Svarta plaster

Gnist-instrumentet identifierade svarta plaster korrekt, med undantag för några PS som identifierades som ABS (vilket ju är PS med akrylnitril och butadien).

Vita och transparenta plaster

Vita och transparenta plaster gick att identifiera. I ett fall där provbiten var en blandning av PMMA och PS gav gnistspektrometern svaret PMMA och NIR-instrumentet gav svaret PS.

Flamskyddsmedel och tillsatser

Instrumentet kunde identifiera Br i bitarna med halter på ca 7% respektive 8%, men missade biten med 2%. Klor, fluor och fosfor hittades i de bitar som innehöll detta.

Känslighet för föroreningar

Måste komma i kontakt med plasten för att kunna skicka en ström igenom. Är plasten ytbehandlad eller smutsig får man veta vad det är för material i ytbehandlingen och smutsen.

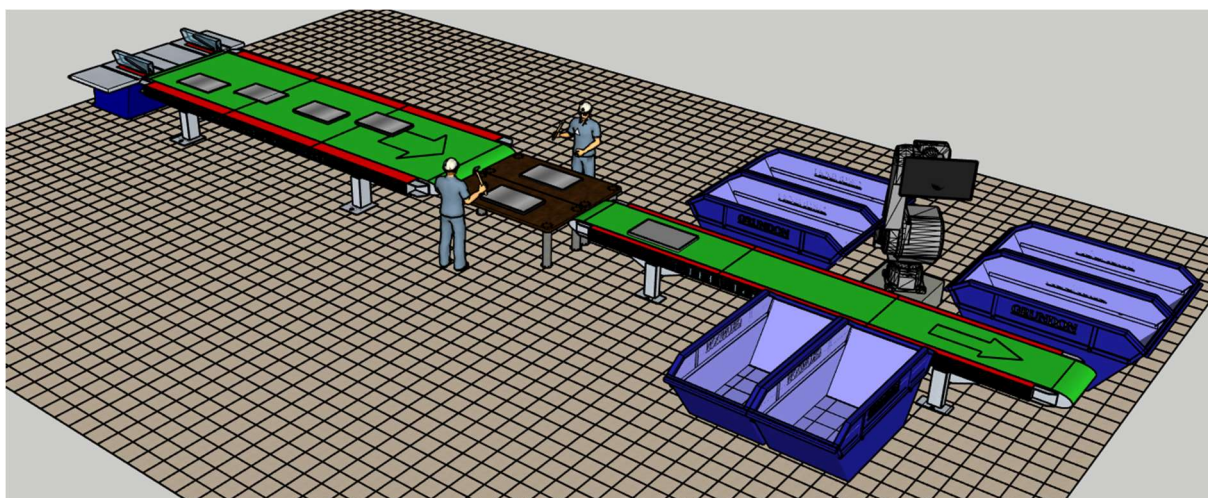
Logistik

Då elektronikförbehandlare redan idag har ett stort antal materialfraktioner som skall transporteras från anläggningar ansåg de som intervjuades att det inte skulle bli några väsentliga problem med att hantera några till, vilket sorteringen av plast innebär. Det som dock var en stor källa till tvivel var huruvida en investering i sorteringsutrustning kan löna sig. Därför har fokus flyttats till att analysera kostnaden för en sorteringsutrustning och ifall denna kan motiveras med att förbehandlingsanläggningen kan sälja plasten till ett högre pris [14].

Tänkt hanteringslösning

Enligt de flödessimuleringar som beskrivs nedan finns stora vinster med att automatisera den hantering som görs i identifierings- och sorteringssteget. Då både LIBS och gnistspektrometri behöver komma mycket nära plaststycket som skall identifieras är en lämplig lösning att sätta sensorerna på en robotarm som även används för att sortera plaststyckena – både LIBS-utrustningen och gnistspektrometern lämpar sig enligt leverantörerna för montering på robotarm. I kostnadsfördelningen nedan antas att en utrustning från GUT används då den i dagsläget bäst klarar av att identifiera de plaster som är aktuella.

En tänkbar sekvens är att roboten med hjälp av visionsystem lokaliserar ett plaststycke, går fram till det och greppar det med en vacuumplatta. När plaststycket är greppat börjar roboten förflytta detta och analyserar materialet under tiden den rör sig. När platsorten är bestämd väljer roboten korrekt bana och släpper ned plastbiten i rätt kärl. Se Figur 10. Konzeptbild för sorteringsprocessför principlayout.



Figur 10. Konceptbild för sorteringsprocess

Konstruktörer hos MRT har bedömt att denna lösning är genomförbar och att investeringskostnaderna bör fördela sig enligt nedan:

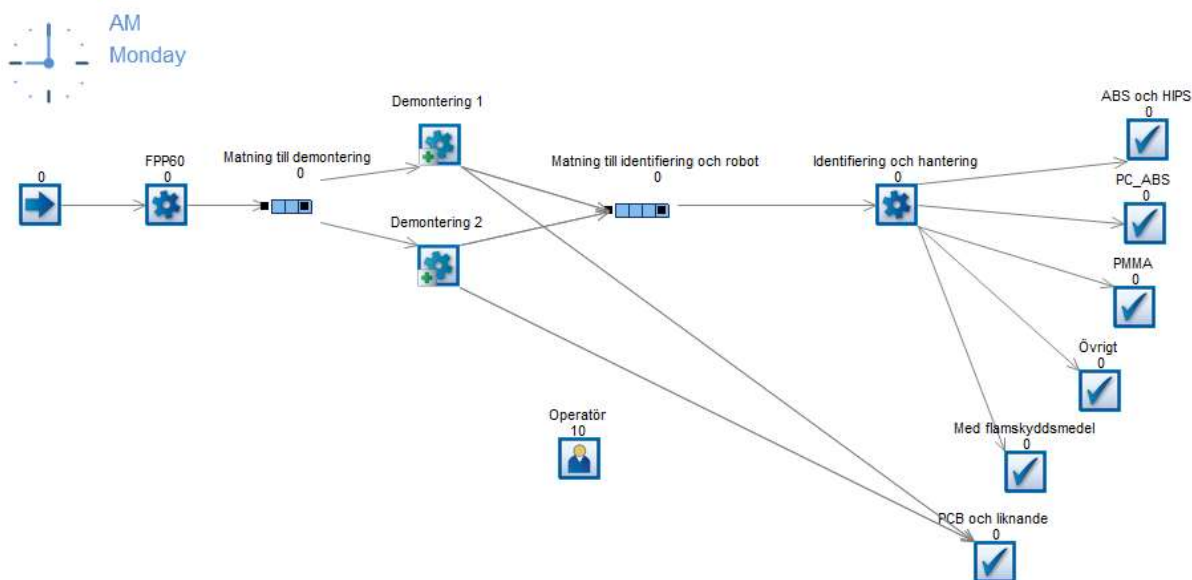
- Robotarm inklusive controller: 300 000
- Visionsystem: 50 000
- Vacuumgripdon: 50 000
- Sensorsystem, inklusive plastidentifiering: 500 000, varav mIRoSpark 300 000
- Bandtransportör till robot: 100 000
- Installation och programmering: 100 000
- **Totalt: 1 100 000 SEK**

Flödessimuleringar

CIT har med hjälp av information om WEEE-återvinning som samlats in av MRT, litteraturstudier och tidmätningar vid studiebesök kunnat bygga en simuleringsmodell som representerar det tänkta flödet. På så sätt kunde olika automatiseringsgrad och identifieringshastigheter utvärderas med avseende på huruvida sorteringsystemet blir en flaskhals i systemet. Enligt information insamlad av MRT ligger intäkterna för en elektronikförbehandlare främst i att ta tillvara kretskort, metaller och PMMA-plast. Övrig plast inbringar idag inga intäkter. Med en tillförlitlig identifieringsteknik finns istället möjlighet att få betalt för plasten. Det är här det huvudsakliga ekonomiska incitamentet finns för att investera i en sorteringsprocess. Då plastpriserna fluktuerar kraftigt antas i simuleringsmodellen att sorterad plast är värd 2 SEK mer per kilo än osorterad plast [20] [21]. På så sätt kan vinsterna med att investera i sorteringsteknik uppskattas.

Simuleringsmodellen efterliknar en typisk förbehandlingsprocess för platta bildskärmar. Två operatörer demonterar skärmar som matas fram på en bandtransportör efter att de har fått sina kanter och ljuskällor avsågade i en automatisk process. En bildskärm kommer från denna process med ett intervall som varierar runt ett medelvärde på en minut. De två operatörerna demonterar hela bildskärmar i varsitt parallellt flöde. Varje bildskärmsdemontering har en cykeltid som varierar runt ett medelvärde på 1,75 minuter och genererar mellan tre och fyra

plastbitar samt kretskort och metaller. Plastbitarna går vidare på en bandtransportör till ett sorteringssteg och övriga fraktioner hamnar för enkelhets skull i en gemensam slutpunkt.



Figur 11. Simuleringsmodell.

Simuleringsmjukvarans inbyggda optimeringsfunktion användes till att bestämma längd och hastighet för bandtransportörerna. Dessa parametrar är av vikt då de fungerar som buffertar vilka utjämnar variationer i cykeltid mellan de olika processtegen. Optimeringsfunktionen användes även till att bestämma optimal identifierings- och sorteringstid i det automatiserade scenariot. Med optimal tid menas här den längsta tid som systemet kan tolerera utan att tappa output. Anledningen till att vi ville hitta den maximala tiden är att längre sorteringstid antas ge ett mer korrekt resultat och möjliggöra billigare teknik.

| | Bandtransportör till demontering | Bandtransportör till identifiering och sortering |
|-----------|------------------------------------|--|
| Längd | 3m | 4m |
| Hastighet | 1 m/s | 1 m/s |
| | Identifiering och sortering | |
| Cykeltid | 15 s | |

Figur 12. Optimala processparametrar enligt flödessimulering

För lönsamhetskalkyler för de olika scenarierna användes simuleringsmjukvarans inbyggda ekonomiberäkningsfunktion där den analyserade processens kostnader och intäkter kan anges. Som indata till intäktssidan användes volymsviktade data som MRT tagit fram genom intervjuer med plastuppköpare och statistik över materialinnehåll i platta bildskärmar.

| Värde per plastbit | kr |
|---------------------|-------|
| ABS och PS | 2,78 |
| PC-ABS | 0,96 |
| PMMA | 7,612 |
| Övrigt | 0 |
| Med flamskyddsmedel | -0,56 |

Figur 13. Värde per demonterad plastbit

För att bedöma lämplig automationsgrad jämfördes situationen där en människa krävdes för att handha identifieringsutrustningen och sorteringen mot att detta sköts automatiskt. I det automatiska fallet användes en investeringskostnad på 1 100 000 SEK enligt ovan.

I det manuella fallet användes en investeringskostnad på 400 000 SEK, vilket antas inrymma en mIRoSpark, en arbetsbänk och utbildning av personal.

Dessutom jämfördes dessa två fall mot att inte sortera plasten och då inte heller investera något. Slutligen kördes dessa tre fall med två olika personalkostnadslägen för att ta reda på om lönsamheten med olika automatiserings- och sorteringsgrad skulle skilja sig åt mellan exempelvis Nord- och Sydeuropa. Personalkostnaderna på 800 respektive 400 kr per timme är uppskattade efter intervjuer som MRT gjort med Nord- och Sydeuropeiska elektronikförbehandlare.

Lönsamhet

Resultaten från körningarna visar att utökad sortering av plast ger ett mervärde på ca. 1 150 000 SEK under en period på 3 år. Vidare går det att se att en automatisering av identifiering och sortering är nödvändig för att ökade lönekostnader inte skall omintetgöra detta mervärde. Enligt vår kravspecifikation skall en investering i sorteringsutrustning vara återbetald på tre år, vilket klaras precis givet en uppskattad investeringskostnad om 1 100 000 SEK. Värt att nämna är att denna återbetalningstid baserar sig på att anläggningen körs under dagtid på vardagar. Skulle fler av dygnets timmar och årets dagar nyttjas kan återbetalningstiden kortas väsentligt.

Analys och diskussion

I detta avsnitt kommer resultaten från projektets delmoment att sättas i samband med varandra för att besvara frågorna om vilken typ av sensorsystem som fungerar bra vid sortering av stora plaststycken från WEEE, hur en övergripande process kan se ut och under vilka förutsättningar den är lönsam.

Sensorsystem

Under projektets gång identifierades gnistspektroskopi och LIBS som de lämpligaste sensorteknologierna. Detta eftersom att de är de enda systemen som med tillräcklig hastighet för industriell användning har förutsättningar att identifiera mörk plast och dess tillsatser.

Efter de tester som gjorts av kommersiella system och i labb hos Swerea KIMAB har vi dragit slutsatsen att den kombinerade gnistspektroskopi- och NIR-utrustningen mIRoSpark från GUT Environmental Technologies är mest redo för industriell användning. Enligt leverantören är den redan i drift hos ett hundratal kunder [22] och som visas i **Fel! Hittar inte referenskölla.** identifierades våra provbitars materialinnehåll bra nog för att skapa återvinningsbara fraktioner.

De frågetecken som finns rör förmågan att hitta förbjudna flamskyddsmedel. I stycke 0 resoneras det kring att en utrustning som identifierar plastbitar med mer än 5% Br är bra nog för att skapa en återvinningsbar fraktion WEEE-plast. Enligt leverantören [22] skall mIRoSpark klara att detektera Br halter på ned till 0,1% vilket definitivt är bra nog, men vid våra tester missades en plastbit som innehöll 2% Br. Vid kontakt med leverantören fick vi två möjliga skäl till detta. Dels var demonstrationssystemet som testades inte kalibrerat på länge och dels hävdades att materialinnehållet i plast sällan är homogent – mIRoSpark-mätningen och labbtesterna hos Swerea kan helt enkelt ha gjorts på delar av plastbiten med olika materialinnehåll [22]. Dessa skäl framstår som trovärdiga då vi dels ser i 0 att det är små skillnader i spektra som hjälper en spektroskopibaserad utrustning bestämma materialtyp och dels visar bland annat [23] att en stor utmaning inom plasttillverkning är att få en homogen materialsammansättning vid compounding. Sammantaget är slutsatsen att mIRoSpark är bra nog för att sortera plast från WEEE i återvinningsbara fraktioner då:

- den fångade de plastbitar med mer än 5% Br som testades
- den med stor sannolikhet klarar lägre koncentrationer vid korrekt kalibrering
- plastbiten som analyserades kan ha innehållit en mycket låg koncentration Br vid mätpunkten

Skulle mIRoSpark i ett fortsättningsprojekt inte visa sig vara bra nog kan den kompletteras med en XRF. Enligt [24] finns det kommersiellt tillgängliga handhållna XRF-instrument som inom loppet av några sekunder och med stor precision kan avgöra om en plastbit innehåller förbjudna flamskyddsmedel. Dessa finns att köpa för cirka 300 000 kr [25].

LIBS-utrustningen från Bertin Technologies klarade någorlunda väl av att identifiera de plastbitar den var kalibrerad/upplärd för, medan de övriga bitarna inte gav något resultat alls. Vidare var förmågan att hitta förbjudna tillsatser begränsad. Vid labbtesterna av LIBS hos Swerea KIMAB (0) bekräftades att tillsatserna ger mycket svaga signaler och är svåra att detektera. Detta i kombination med att utrustningen innebär en mer än dubbels så stor investeringskostnad jämfört med mIRoSpark gör att systemet i dagsläget inte anses lämpligt för den användning som är tänkt i detta projekt. Trots detta är LIBS en teknik som kan bli mycket intressant i framtiden om den vidareutvecklas och kan detektera plaster och tillsatser på ett mer tillfredsställande sätt. Det som gör den intressant är framförallt att laserstrålen kan användas till att bränna bort föroreningar såsom lack och smuts, samt att den inte behöver träffa en plan yta.

Övergripande process

Det fall som har detaljstuderats är ett typiskt flöde för sanering och demontering av platta bildskärmar. Här arbetar oftast två operatörer med att demontera bildskärmar som har fått sina potentiellt kvicksilverinnehållande ljuskällor borttagna i en automatisk process. Förslaget från detta projekt är att utöka sorteringen av plastfraktionerna i skärmarna från PMMAA och övrigt till att omfatta PMMA, ABS, PC-ABS, plast med förbjudna tillsatser och övrigt. Vi lägger alltså till tre plastfraktioner.

En bildskärm sorteras i dag i totalt åtta fraktioner [20] och med de förändringar som föreslås blir det elva stycken, vilket enligt de återvinnare som kontaktats under projektet inte innebär några större logistikproblem. Utmaningen är istället att få lönsamhet i den extra hantering det innebär att sortera plasten i fler fraktioner [26] [27].

Lönsamhet

intäkterna för en elektronikförbehandlare främst i att ta tillvara kretskort, metaller och PMMA-plast. Övrig plast inbringar idag ringa intäkter. Med en tillförlitlig identifieringsteknik finns istället möjlighet att få betalt för plasten. Det är häri det huvudsakliga ekonomiska incitamentet finns för att investera i en sorteringsprocess. Enligt [26] ställer exempelvis de Katalanska myndigheterna allt strängare krav på plaståtervinnare och dessa väntar sig att snart behöva sortera plast för att få fortsätta sin verksamhet. Om denna typ av krav slår igenom på bred front blir incitamenten för att investera i sorteringsprocesser än starkare.

En förutsättning för att nå lönsamhet i sortering av stora plaststycken har i våra simuleringar visat sig vara att ha ett helt automatiskt identifierings- och sorteringssteg med en cykeltid som inte överstiger 16 sekunder. Denna automatisering kan ske på ett flertal sätt förutom det som illustreras i 0. Där visas en 6-axlig industrirobot som matas av en bandtransportör, vilket tillsammans med en mIRoSpark säkerligen löser uppgiften.

I ett fortsättningsprojekt vore det dock intressant att noggrannare undersöka hur billigare lösningar skulle fungera, särskilt som en form av säkerhetsmarginal ifall sensorsystemet behöver kompletteras med en XRF. Detta kan vara att använda en portal- istället för industrirobot och att stapla plaststycken på höjden istället för att använda en bandtransportör som buffert. I vilket fall som helst kan även en relativt dyr lösning som den vi har räknat med i kalkylen återbetala sig inom tre år vid drift åtta timmar per dygn, 260 dagar per år. Vid två- och treskift blir återbetalningstiden ännu snabbare.

Miljöeffekter

Avsnittet ”Skäl till att utveckla teknik för sortering av stora stycken mörk plast” visar att det finns stora miljövinster genom att förbättra sorteringen av WEEE-plast. Resultaten från projektet pekar på att den teknik som föreslås kan göra just detta.

Utrustningen som behöver köpas in är billig nog för att en normal elektronikförbehandlare skall kunna göra investeringen. Dessutom kan lösningen göras så robust och enkel att en elektronikförbehandlare kan använda den utan större processförändringar eller kompetenshöjande åtgärder.

En färdigutvecklad utrustning har därmed goda förutsättningar att komma till användning i återvinningsindustrin. På så sätt kan den realisera de gynnsamma miljöeffekter som blir resultatet av bättre sortering av mörk plast.

Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

I detta avsnitt beskrivs projektets slutsatser, hur resultaten kommer att användas och hur de väntade effekterna kan bidra till kommersiell och samhällelig nytta.

Avslutningsvis redogörs för vad som behöver göras härnäst för att nyttiggöra resultaten.

De slutsatser projektet har kunnat göra är att:

- Det finns kommersiellt tillgänglig sensorteknik som kan sortera stora stycken ljus, mörk och transparent WEEE-plast i industriell skala. Tekniken är tillräckligt bra för att garantera återvinningsbara fraktioner enligt de regelverk som gäller inom EU.
- En automatiserad process kan sortera stora stycken WEEE-plast direkt hos förbehandlingsaktören på ett lönsamt sätt.
- En implementerad sorteringsprocess gör samhällsnytta genom att bidra till giftfria kretslopp och kraftigt ökade återvinningsgrader av WEEE-plast.

De här resultaten kommer användas till att sprida kunskap till återvinnare, institut och utrustningsleverantörer. Syftet med detta är att generera ett intresse för att vidareutveckla tekniken i ett fortsättningsprojekt som nyttiggör resultaten.

Det som behöver göras för att nyttiggöra resultaten är att:

- Verifiera att ett sensorsystem som har monterats på en robot ger korrekta resultat
- Ta fram en hanteringslösningssprototyp där cykeltider och industriell lämplighet bekräftas
- Validera att sorteringen i volymproduktion genererar återvinningsbara fraktioner med avseende på materialsammansättning och frånvaro av förbjudna tillsatser

De sensorsystem som är redo för industriell användning är främst anpassade till manuella processer. Viss vidareutveckling krävs för att kunna använda dem i ett automatiserat flöde. Därför är det av vikt att leverantörer av sensorsystem är med i nyttiggörandeprocessen. Leverantörerna befinner sig i Tyskland och Frankrike varför ett fortsättningsprojekt bör genomföras i en EU-finansierad konstellation. Inledande samtal om att gå in med en ansökan om EU-finansiering av ett fortsättningsprojekt har hållits med MRT, Fraunhofer, GUT Environmental Technologies och Electrorecycling SA.

Projektkommunikation

En dialog har förts med det tyska forskningsinstitutet Fraunhofer i syfte att sätta samman en konstellation som kan söka EU-finansiering till ett fortsättningsprojekt.

För att sprida projektresultaten kommer dessa att presenteras på avfallsrådet den sjunde februari 2018 och på Circular Materials Conference den åttonde mars 2018. På detta sätt kommer flera viktiga aktörer inom svensk återvinningsindustri nås.

Referenser

- [1] M. W. M. Z. C.-R. A. F. M. S. S. L. a. M. P. John Baxter, "Plastic value chains. Case: WEEE (Waste Electric and electronic equipment) in the Nordic region," Nordic Council of Ministers , Köpenhamn, 2014.
- [2] Naturvårdsverket, "Uppdrag om giftfria och resurseffektiva kretslopp," Naturvårdsverket, 01 12 2016. [Online]. Available: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Regeringsuppdrag/Redovisade-2016/giftfria-och-resurseffektiva-kretslopp/>. [Använd 30 01 2018].
- [3] Naturvårdsverket, "naturvardsverket.se," 13 12 2017. [Online]. Available: <http://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Uppdelat-efter-omrade/Avfall/Avfallsforebyggande-program/Elektronik/>. [Använd 30 01 2018].
- [4] El-kretsen, "Fler men lättare elprodukter samlas in för återvinnin," El-kretsen, http://www.el-kretsen.se/sites/el-kretsen_se/files/media/Dokument/Statistik_2015.pdf?324, 2016.
- [5] El-Kretsen, "el-kretsen.se," [Online]. Available: <http://www.el-kretsen.se/fakta>. [Använd 30 01 2018].
- [6] V. P. P. J. V. Biswajit Ruj, "Sorting of plastic waste for effective recycling," *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, New Delhi, 2015.
- [7] K. Freegard, G. Tan och S. Frisch, "WEEE Plastics Separation Technologies," DEFRA – Waste and Resources, project code WRO 202 (WRT 095), randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=WR0202_6320_FRP.pdf, 2007.
- [8] S. M. S. Z. K. H. Masoumi, "Identification and Classification of Plastic Resins using Near Infrared Reflectance Spectroscopy," *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 6, pp. 877-884, 2012.
- [9] J. H. K. a. R. G. R. Valerie Allen, "Post-Consumer Plastic Identification Using Raman Spectroscopy," *Applied Spectroscopy* 53, pp. 672-681, 1999.
- [10] L. B. G. Z. Q. H. X. Y. L. M. S. Q. D. Z. K. H. L. X. Y. Z. Y. F. L. Z. R. Y. Yu, "Accuracy improvement on polymer identification using laser-induced breakdown spectroscopy with adjusting spectral weightings," *Optics Express*, 22, pp. 3895-3901, 2014.
- [11] K. S. C. A. B. S. D. K. V. K. U. S. D. G. V. B. K. C. S. K. M. M. Shameem, "A hybrid LIBS–Raman system combined with chemometrics: an efficient tool for plastic identification and sorting," *Anal Bioanal Chem*, 409, p. 3299–3308, 2017.
- [12] C. Brandt, M. Kieninger, C. Negara, R. Gruna, T. Längle, A. Küter och D. Nüßler, "Sorting of black plastics using statistical pattern recognition on terahertz frequency domain data," i *7th Sensor-Based Sorting & Control ISBN: 978-3-8440-4323-5*, 2016.

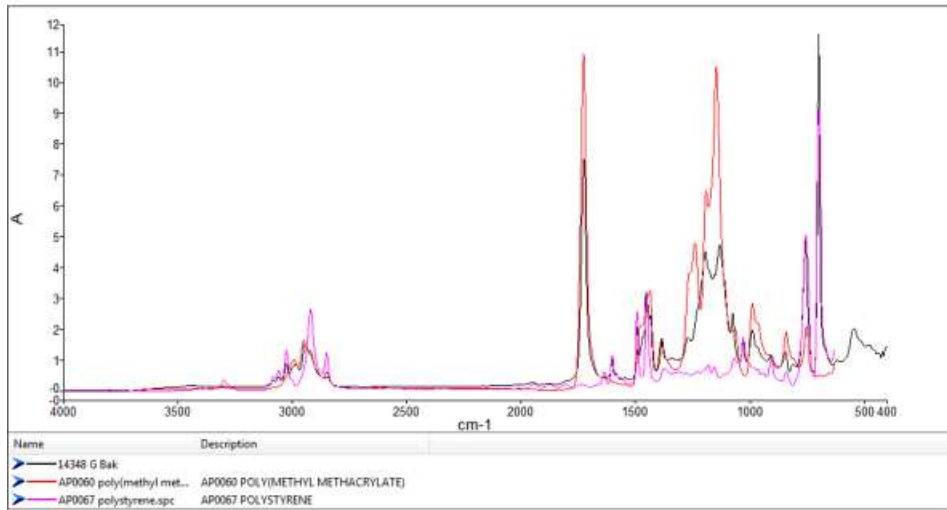
- [13] A. Bengtson, "Laser Induced Breakdown Spectroscopy compared with conventional plasma optical emission techniques for the analysis of metals – A review of applications and analytical performance," *Spectrochimica Acta Part B* 134, p. 123–132, 2017.
- [14] G. Lundholm, Interviewee, *VD MRT*. [Intervju]. 21 10 2017.
- [15] S. M. M. K. Salhofer S, "Recycling of LCD Screens in Europe - State of the Art and Challenges," i *Springer- Verlag Berlin Heidelberg*. p 454-458, Braunschweig, Germany, 2011.
- [16] D. I. J. L.B. Brennan, "Recycling of Acrylonitrile–Butadiene–Styrene and High Impact Polystyrene from Waste Computer Equipment," Department of Materials Engineering, University of Wales Swansea, Singleton Park, Swansea, SA28PP, United Kingdom, Swansea, 2001.
- [17] L. Tange, Interviewee, *Product Stewardship manager, ICL*. [Intervju]. Januari 2018.
- [18] E. L. B. A. F. N. B. Å. L. M. W. Åsa Stenmarck, "Hazardous substances in plastics—ways to increase recycling," IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Stockholm, 2017.
- [19] A. L. R. P. Alexia Aldrian, "Monitoring of WEEE plastics in regards to brominated flame retardants," Elsevier Ltd., 2014.
- [20] P. Grimshorn, Interviewee, *Managing Director Hans Andersson Plastic*. [Intervju]. 30 11 2017.
- [21] A. Krantz, Interviewee, *Key Account Manager Sverige/Baltikum at Swerec*. [Intervju]. 30 11 2017.
- [22] G. Goetzelmann, Interviewee, *Co founder GUT GmbH*. [Intervju]. 10 11 2017.
- [23] S. V. G. U. E K SILVIYA, "Compounding and mixing of polymers," National Institute of Technology Calicut, India and S THOMAS, Mahatma Gandhi University, India, 2009.
- [24] S. G. J. v. H. N. Menad a, "New characterisation method of electrical and electronic equipment wastes (WEEE)," Elsevier Ltd, 2012.
- [25] "911 Metallurgist," [Online]. Available: <https://www.911metallurgist.com/blog/portable-xrf-analyzer-price>.
- [26] O. Roca, Interviewee, *Director de Planta, Electro recycling SA*. [Intervju]. 22 11 2017.
- [27] G. Georget, Interviewee, *Responsable administratif et financier La boîte à Papiers*. [Intervju]. 26 01 2018.

Bilagor

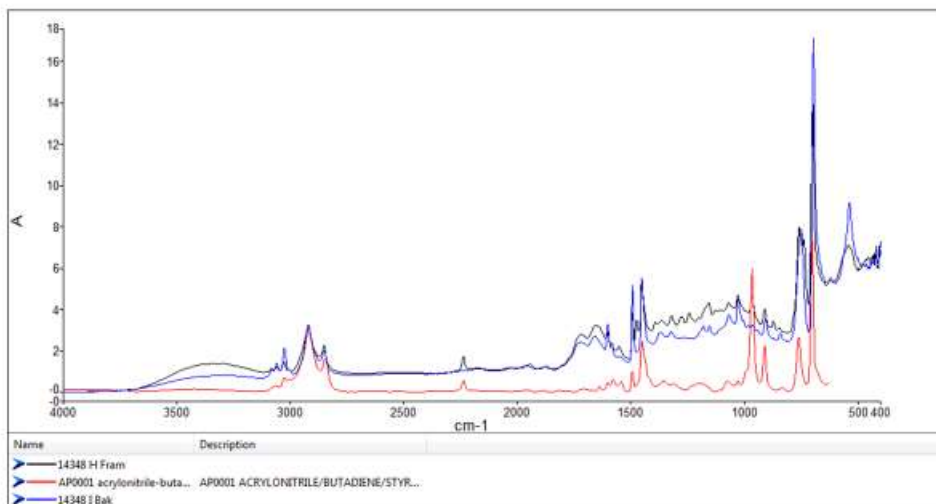
Bilaga 1, analys hos Swerea KIMAB. FTIR & TGA



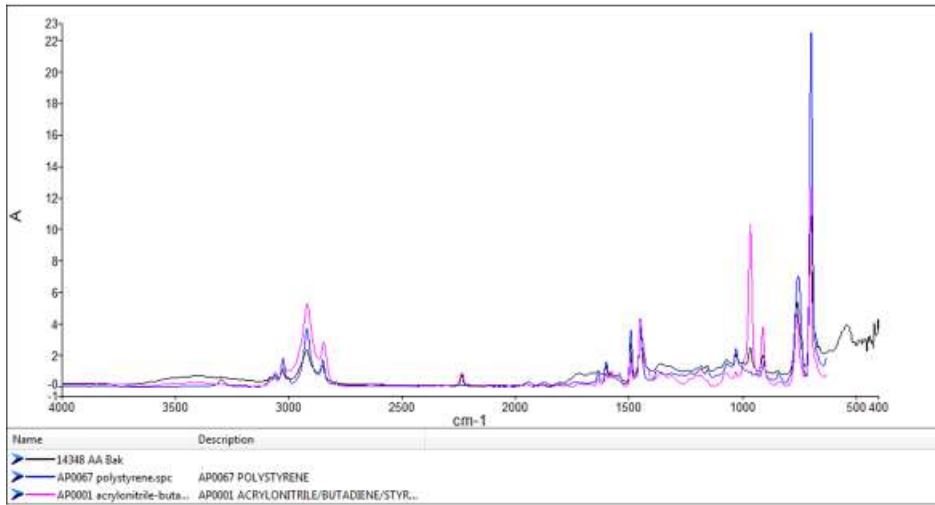
G bak



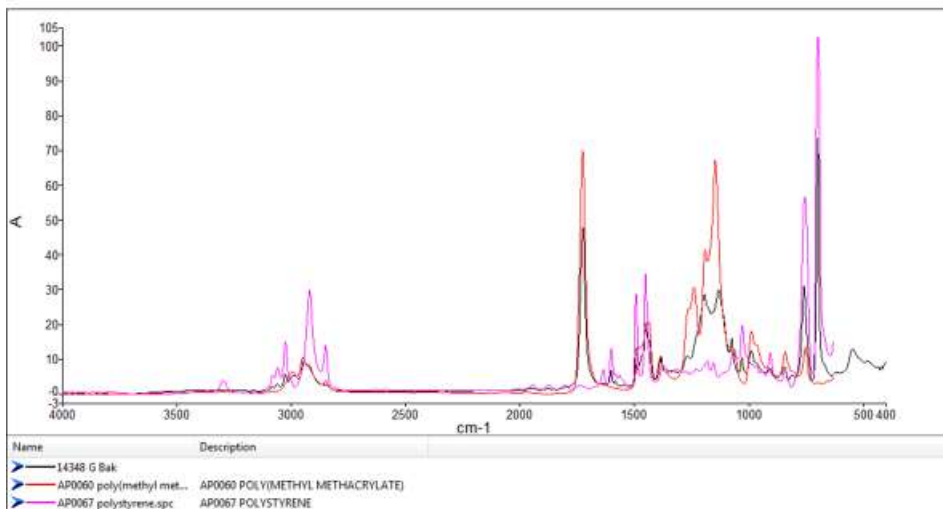
H fram



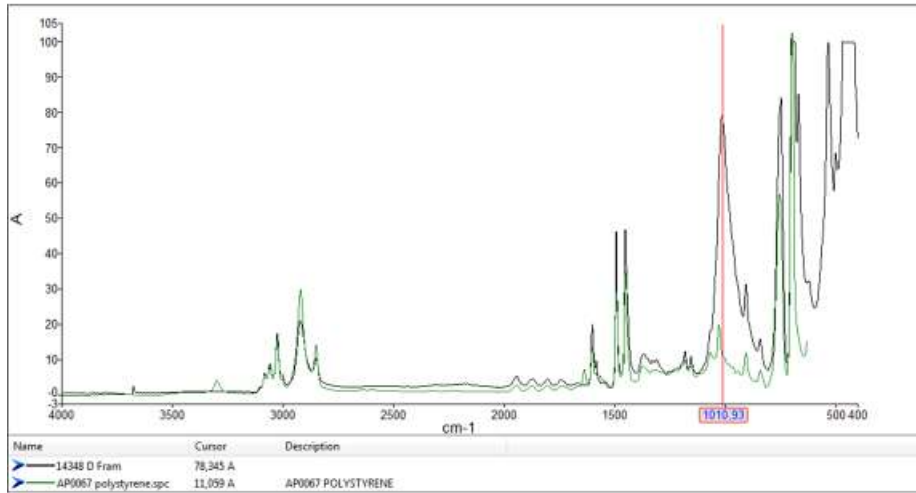
AA bak



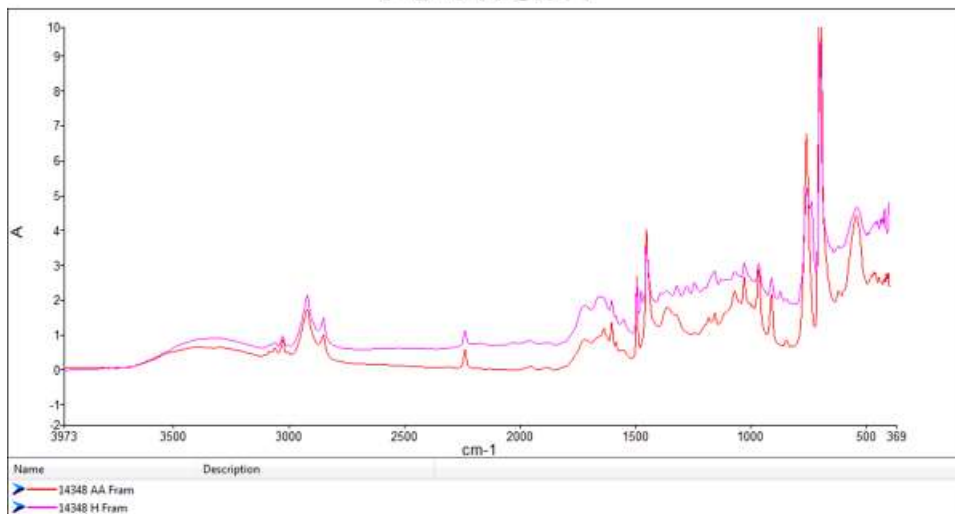
G bak



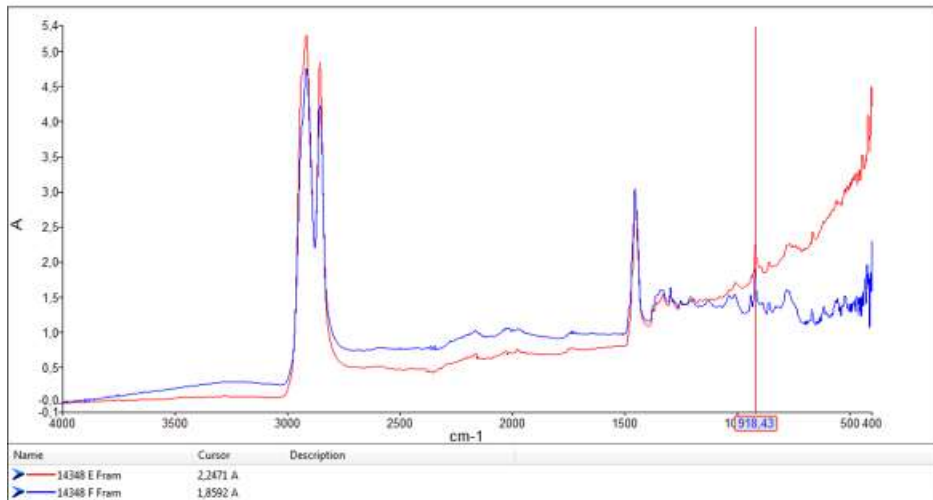
D fram



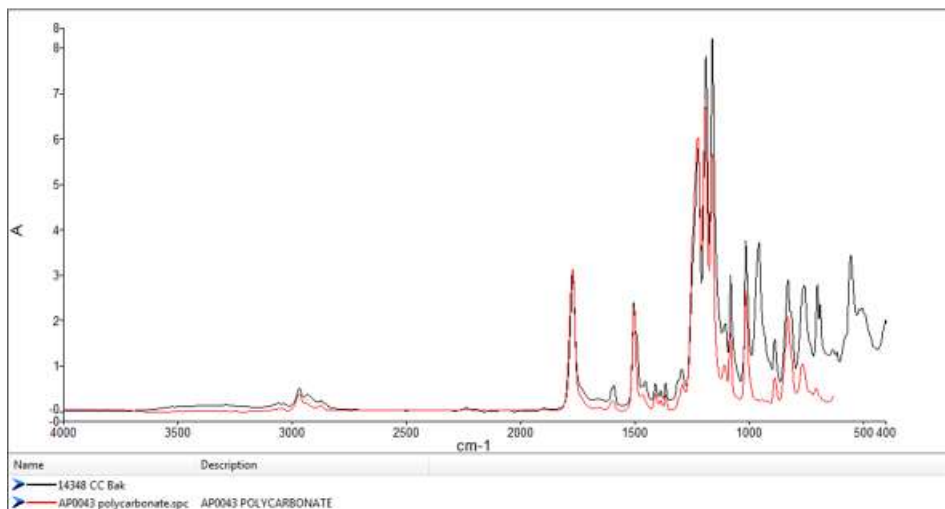
AA fram



E fram



CC bak



Bilaga 2, Testresultat vid användning av kommersiella system

| Label | # | polymer | Additive | Test result MiroSpark | testresult LIBS | comment |
|-----------|----|---|---|-------------------------------------|-----------------|--|
| A | 18 | PMMA | | PMMA | - | |
| AA | 14 | ABS+PS | unidentified FR (6% O) | ABS | ABS | ok, but no PS or FR |
| ABS | 5 | ABS | | ABS | - | |
| B | 19 | PMMA | | PMMA, found CL on the rugged edge | - | |
| C | 12 | PMMA | | PMMA, found CL on the rugged edge | PA | Wrong (but not calibrated for white/transparent) |
| CC | 11 | PC+ABS | | PCA/ABS, 1,1% fosfor | ABS PC, P 2-3% | OK |
| D | 20 | PC+talk | | PC + talk | HIPS | Wrong (but not calibrated for white/transparent) |
| E | 21 | ? | | PE/PP mix, mostly PP | - | |
| F | 17 | ? | | PE/PP mix, mostly PP | - | |
| G | 22 | PMMA+PS | | Spark: PMMA, NIR: PS, found some CA | - | |
| H | 16 | PS+ABS | IR peaks @ 1476 cm ⁻¹ and 738 cm ⁻¹ , FR or IM? | ABS, 3,8%BR 1,5% CL | ABS, Br 1-2% | ok (though lower PS content, lower Br and no Cl 1.5%)) |
| Halar 901 | 7 | ECTFE (C ₄ H ₄ F ₃ Cl) | | Found FL and protested | - | |
| HIPS/ABS | 3 | HIPS/ABS | 2%Br | ABS | ABS PC | |
| HIPS/ABS | 4 | HIPS/ABS | 8%Br | ABS, found BR & 1,5% CL | | (tested without argon, ABS PC but no Br) |
| I | 10 | PS | IM | ABS | HIPS | OK |
| J | 15 | PS | IM | PS/ABS + phosphor | HIPS | OK |
| K | 13 | PS | IM | ABS, could also be PS | ABS PC | Wrong |
| PE | 2 | PE | | PE | PP | |
| PP | 1 | PP | | PE | PA | does not distinguish PP and PE |
| PS | 9 | PS | | PS | - | |

| | | | | | | |
|--------|---|--|------------------------------|-----------|---|-----------------|
| PVC-MZ | 6 | PVC | pvc+impact modifier (pvc-mz) | PVC 6% CL | - | forgot to test? |
| PVDF | 8 | PVDF (C ₂ H ₂ F ₂) | | PVDF | - | |

FR = flame retardant
IM = Impact modifier

Bilaga 3, resultat från simuleringsmodell

| Med robot och 400 SEK per timme lön | |
|--|-------------------|
| Category | Value |
| Costs | |
| FPP60 Total Cost | 2 000 000 |
| Identifiering och hantering Total Cost | 1 100 000 |
| Operatör Total Cost | 4 366 576 |
| Demontering 1a Total Cost | 100 000 |
| Demontering 2a Total Cost | 100 000 |
| Simulation Total Costs | 7 666 576 |
| Revenue | |
| PC_ABS Total Revenue | 121 051 |
| ABS och HIPS Total Revenue | 1 027 005 |
| PMMA Total Revenue | 2 768 273 |
| Med flamskyddsmedel Total Revenue | -81 835 |
| PCB och liknande Total Revenue | 9 697 348 |
| Simulation Total Revenue | 13 531 842 |
| Profit | 5 865 266 |

| Med robot och 800 SEK per timme lön | |
|--|-------------------|
| Category | Value |
| Costs | |
| FPP60 Total Cost | 2 000 000 |
| Identifiering och hantering Total Cost | 1 100 000 |
| Operatör Total Cost | 8 733 153 |
| Demontering 1a Total Cost | 100 000 |
| Demontering 2a Total Cost | 100 000 |
| Simulation Total Costs | 12 033 153 |
| Revenue | |
| PC_ABS Total Revenue | 121 051 |
| ABS och HIPS Total Revenue | 1 027 005 |
| PMMA Total Revenue | 2 768 273 |
| Med flamskyddsmedel Total Revenue | -81 835 |
| PCB och liknande Total Revenue | 9 697 348 |
| Simulation Total Revenue | 13 531 842 |
| Profit | 1 498 689 |

| Manuell hantering och 400 SEK per timme lön | |
|--|-------------------|
| Category | Value |
| Costs | |
| FPP60 Total Cost | 2 000 000 |
| Identifiering och hantering Total Cost | 400 000 |
| Operatör Total Cost | 6 405 132 |
| Demontering 1a Total Cost | 100 000 |
| Demontering 2a Total Cost | 100 000 |
| Simulation Total Costs | 9 005 132 |
| Revenue | |
| PC_ABS Total Revenue | 121 051 |
| ABS och HIPS Total Revenue | 1 027 005 |
| PMMA Total Revenue | 2 768 273 |
| Med flamskyddsmedel Total Revenue | -81 835 |
| PCB och liknande Total Revenue | 9 697 348 |
| Simulation Total Revenue | 13 531 842 |
| Profit | 4 526 710 |

| Manuell hantering och 800 SEK per timme lön | |
|--|-------------------|
| Category | Value |
| Costs | |
| FPP60 Total Cost | 2 000 000 |
| Identifiering och hantering Total Cost | 400 000 |
| Operatör Total Cost | 12 810 256 |
| Demontering 1a Total Cost | 100 000 |
| Demontering 2a Total Cost | 100 000 |
| Simulation Total Costs | 15 410 256 |
| Revenue | |
| PC_ABS Total Revenue | 121 051 |
| ABS och HIPS Total Revenue | 1 027 005 |
| PMMA Total Revenue | 2 768 273 |
| Med flamskyddsmedel Total Revenue | -81 835 |
| PCB och liknande Total Revenue | 969 697 |
| Simulation Total Revenue | 13 531 324 |
| Profit | -1 878 932 |

| Utan sortering och 400 SEK per timme lön | |
|---|-------------------|
| Category | Value |
| Costs | |
| FPP60 Total Cost | 2 000 000 |
| Identifiering och hantering Total Cost | 0 |
| Operatör Total Cost | 4 366 576 |
| Demontering 1a Total Cost | 100 000 |
| Demontering 2a Total Cost | 100 000 |
| Simulation Total Costs | 6 566 576 |
| Revenue | |
| PC_ABS Total Revenue | 0 |
| ABS och HIPS Total Revenue | 0 |
| PMMA Total Revenue | 2 768 273 |
| Med flamskyddsmedel Total Revenue | 0 |
| PCB och liknande Total Revenue | 9 697 348 |
| Simulation Total Revenue | 12 465 621 |
| Profit | 5 899 045 |

| Utan sortering och 800 SEK per timme lön | |
|---|-------------------|
| Category | Value |
| Costs | |
| FPP60 Total Cost | 2 000 000 |
| Identifiering och hantering Total Cost | 0 |
| Operatör Total Cost | 8 733 153 |
| Demontering 1a Total Cost | 100 000 |
| Demontering 2a Total Cost | 100 000 |
| Simulation Total Costs | 10 933 153 |
| Revenue | |
| PC_ABS Total Revenue | 0 |
| ABS och HIPS Total Revenue | 0 |
| PMMA Total Revenue | 2 768 273 |
| Med flamskyddsmedel Total Revenue | 0 |
| PCB och liknande Total Revenue | 9 697 348 |
| Simulation Total Revenue | 12 465 621 |
| Profit | 1 532 468 |