Porovnanie systémov optického a robotického triedenia odpadu s použitím AI

Ing. Robert PROCHÁZKA , PhD., MBA
Konateľ, majiteľ a výkonný riaditeľ, VÚMZ SK, s.r.o., Nitra, Slovensko

Anotácia:

Optické a robotické triedenie odpadu patrí v súčasnosti k najvyspelejším stupňom triedenia odpadu, aké súčasný trh pozná a používa. Každá technológia však má okrem predností aj svoje obmedzenia a technologicko - procesné limity, ktoré vzišli z ich testovania v priamej prevádzke. To však neznamená, že obmedzenia sú trvalého charakteru vzhľadom k ich povahe, ale skôr z nedotiahnutých možností ich aplikácie, druhu použitia resp. technologického vylepšenia ich aplikačných možnosti. Získané procesné dáta umožňujú pracovať na ich zdokonalení, čomu napomáha aj stupeň umelej inteligencie, ktorá hlavne pri robotických systémoch pomáha odlaďovať chyby detekcie alebo objektového uchopovania v prúde odpadu, čo má za následok zlepšenie parametrov. Porovnanie výhod optického a robotického triedenia odpadu závisí od viacerých faktorov, ako sú typ odpadu, požiadavky na presnosť triedenia, náklady a efektivita. Práca pojednáva o technických možnostiach oboch vyspelých technológií detekcie a systému objektového triedenia a zároveň reálnych porovnaní prevádzkou získaných údajov s cieľom posúdiť súčasný a budúci trend aplikácie tej ktorej technológie v praxi, možnosti technických úprav s reálnym modelom aplikácie v prevádzke z ekonomického a procesného pohľadu.

Annotation :

Optical and robotic waste sorting is currently one of the most advanced stages of waste sorting known and used by the current market. However, each technology, in addition to its advantages, also has its limitations and technological and process limits that have emerged from their testing in direct operation. However, this does not mean that the limitations are permanent due to their nature, but rather from the incomplete possibilities of their application, type of use or technological improvement of their application possibilities. The obtained process data allows us to work on their improvement, which is also assisted by the level of artificial intelligence, which, especially in robotic systems, helps to debug errors in detection or object gripping in the waste stream, which results in improved parameters. Comparing the advantages of optical and robotic waste sorting depends on several factors, such as the type of waste, requirements for sorting accuracy, costs and efficiency. The work discusses the technical capabilities of both advanced detection technologies and object classification systems, as well as real comparisons of data obtained during operation, with the aim of assessing the current and future trend of application of each technology in practice, and the possibilities of technical adjustments with a real application model in operation from an economic and process perspective.

Kľúčové slová

Zhodnotenie odpadu, technologické spracovanie, komunálny odpad, triedenie, optické a robotické systémy triedenia, AI, recyklácia, ochrana prírody.

Key Words

Waste recovery, technological processing, municipal waste, sorting, optical and robotic sorting systems, AI, recycling, nature protection.

1. Úvod

Cieľom každej krajiny je zníženie produkcie komunálneho odpadu a jeho maximálne využitie v iných formách tak, aby recyklačný proces vyústil do minimalizácie jeho uloženia na skládku. Legislatíva EÚ a s ňou prepojené legislatívy v rámci jednotlivých členských štátov jasne deklarujú potrebu zníženia množstva skládkovania odpadu a zvýšenia jeho recyklácie s opätovným využitím, či už ako vo forme druhotnej suroviny alebo výhrevného paliva (TAP, TDP) s jasne deklarovanými parametrami a minimálnym vplyvom na životné prostredie. Jeho vrátenie do obehu v akejkoľvek forme znížením alebo úplnou eliminációu neobnoviteľných vstupných surovín je úlohou cirkulárnej ekonomiky, ktorého základom je jeho zhodnotenie a spracovanie – strojnými, na trhu dostupnými a najmodernejšími technológiami (BAT). A tými sú v súčasnosti optická a robotická detekcia s následnou mechanickou separáciou odpadu.

2. Formy komunálneho odpadu a jeho technologické spracovanie

Komunálny odpad (KO) predstavuje veľmi rozmanitú zmes rôznych materiálov a líši sa svojim zložením v závislosti na druhu sídla a zástavbe (obec – rodinné domy, mesto – bytové domy). V súčasnosti sú známe a využívané formy jeho spracovania v nasledovnom rozdelení:

1) **Plastový odpad** (PKO) (zastúpenie 5% v KO).
   Pre spracovanie PKO sa používajú mechanické (ručné), flotačné (merná hmotnosť) a automatické systémy triedenia (Optické / rontgenové / laserové). Cieľom separácie je opätovné využitie v procese (R-recyklát / Regranulát) alebo pre prípravu paliva (TAP).
2) **Elektro a kovový / nekovový odpad** (zastúpenie 1% v KO).
   Pre spracovanie elektro odpadu alebo štandardného kovového/nekovového odpadu sa používajú magnetické (trvalé alebo elektromagnetické), nemagnetické spôsoby vytriedenia, po jeho predošlom rozdrvení Využitie výstupov po zhodnotení ako druhotná surovina pre zlievarenský priemysel.
3) **Papierový odpad** (zastúpenie 3% v KO).
   Papierový odpad sa spracúva predovšetkým ručným alebo optickým pretriedením a následným zlisovaním. V takejto forme sa posúva priamo ako druhotná surovina pre opätovné spracovanie v papierenských podnikoch (celulóza).
4) **Sklo** (zastúpenie 2% v KO).
   Spracúva sa prostredníctvom optických triediacich systémov na farebné a druhové triedenie. Využitie výstupov ako recyklát pre opätovné spracovanie bez R-degradácie výsledného produktu.
5) **Textil** (zastúpenie 1% v KO).
   Pre textilné odpady sa využíva mechanické predtriedenie, prečistenie a v technologicky čistých formách aj možného rozvláknenia, pokiaľ obsahuje minerálne vlákna, s prísadami a lisovaním napr. na výrobu zhodnotiteľného produktu (zlisované dosky pre zelené strechy, izolácia, atď.).
6) **Organický odpad** (zastúpenie 18% v KO).
   Množstvo organického odpadu je na Slovensku od 1.7.2021 povinné pre kuchynský odpad oddeľovať od zmesového KO. Biologický rozložiteľný komunálny odpad (BRKO) je separovaný samostatne pri zdroji. Oba druhy odpadov sa spracovávajú drvením a buď kompostovaním v aeróbnom fermentore alebo v bioplynovej stanici. Pri kuchynskom odpade je v zmysle legislatívy dôležitá biologická stabilizácia pre dosiahnutie AT4 a GS21.
7) **Zmesový a veľkorozmerový komunálny odpad** (70% z KO).
   Zmesový KO je najpočetnejšou časťou KO a jeho podiel je dominantný a najmenej spracovávaný, keďže končí prevažne na skládkach. To sa v súčasnosti legislatívne mení v časovom nastavení pre míľniky r.2023 / 2027 a r.2035, kedy má klesnúť podiel skládkovania na 10% a podiel jeho recyklovania až na 65%. Zvyšok bude využiteľný ako inak využiteľná forma napr. pre stavebný priemysel. Viac o formách spracovania ZKO v ďalšej časti.
8) **Ostatné časti KO a NO** (ca 1-2% z KO).
   Zvyšné formy odpadu (dnes zatiaľ nezhodnotiteľné) a nebezpečný odpad sú spracovávané v autoklávoch) a následne sa umiestňujú na skládky odpadu.

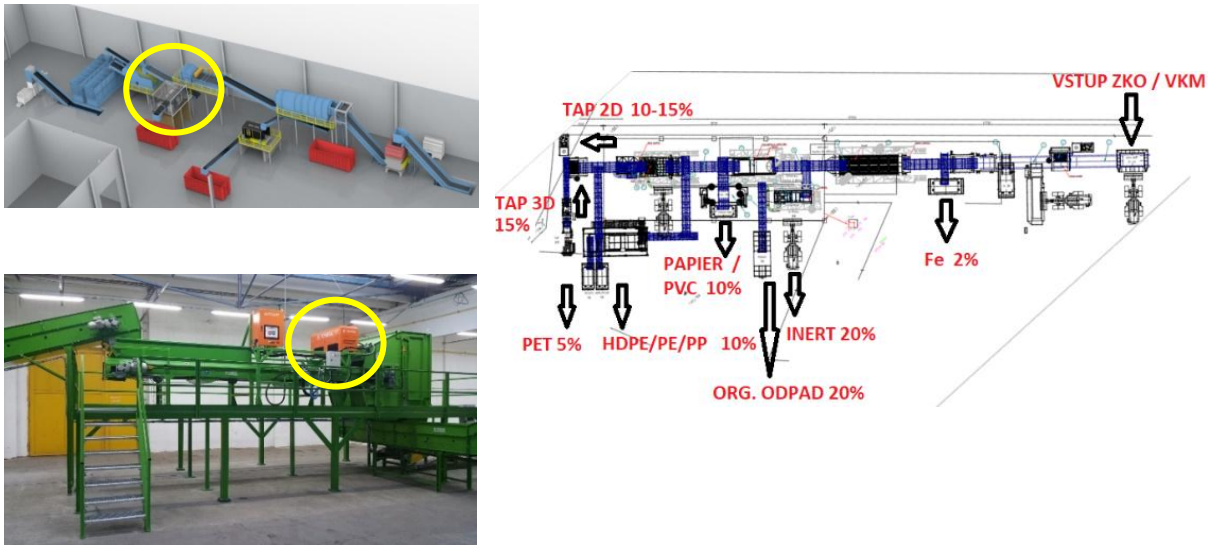
Celkové možné využitie odpadu z hľadiska cirkulárnej ekonomiky resp. energetiky je možné až do výšky 95% z celkového produkovaného KO. Dnes sa pohybuje len v úrovni 40-50%.

3. Hlavné systémy separácie polymérov z komunálneho odpadu v súčasnosti

V ďalšom sa zameriame na technologické spracovanie plastového odpadu (PKO), ktorý je okrem priemyselných foriem zastúpený pre obyvateľstvo v žltých nádobách početne aj v zmesovom komunálnom odpade (ZKO - čierne nádoby). Jednotlivé formy komunálneho odpadu je možné zhodnocovať a to od najjednoduchších foriem až po vyspelé procesno technologické, investične náročnejšie, no pre väčšie množstvá spracovania a náročné kvalitatívne požiadavky prevádzkovo plne zodpovedajúce a ekonomicky návratné.

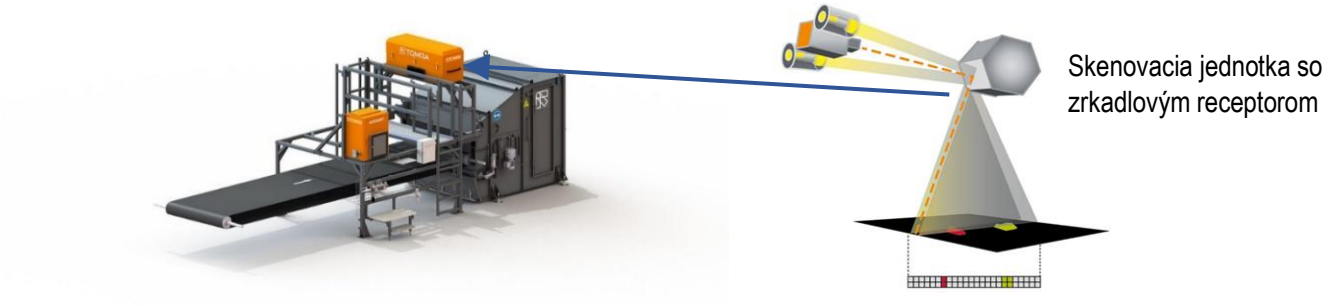
3.1 Optická forma triedenia

Medzi najrozšírenejšie systémy separácie PKO patria optické triediace systémy.
Triediace zariadenia pracuje na báze spektrálnej analýzy viditeľných alebo videniu blízkych vlnových dĺžok pre roztriedenie zložiek plastového a skleného odpadu. Následne sú vytriedené plasty podrvené, oprané a zgranulované ako druhotná surovina, zvyšok ako palivo (TAP).
Hlavné parametre triedenia: Čistota triedenia >95%, tok spracovania >500kg, veľkosť frakcie 10-350mm

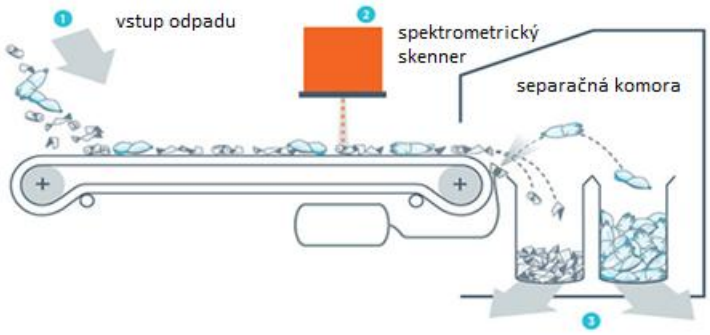


Obr.1 : Triediaca linka na ZKO / PKO a výstupy z jej spracovania (vybrané polyméry a Fe/NoFe)

Optické triediace systémy pracujú na báze umelého nasvecovania komodít v odpadovom prúde, a ich následnej detekcie citlivými receptormi a systémom pneumatického vystrelenia skenovaných materiálov do určenej pozície (zbernej komory s podsadeným dopravníkom). Názov takéhoto technologického spôsobu triedenia odpadu sa označuje buď ako NIR (near infrared reflection), kde sa detekuje materiál podľa jeho chemických vlastností resp.jeho farebného a viditeľného spektra alebo ako VIS (visual infrared system reflection). Znázornenie optického triediaceho systému je nižšie.

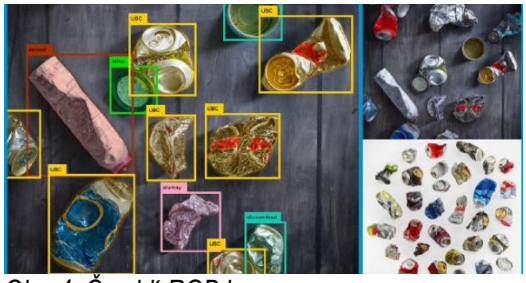


Obr.2 : Znázornenie optického triediaceho zariadenia so skenovacou jednotkou vybavenou nasvecovacím modulom, optickým zrkadlovým zriadením a RGB kamerami pre snímanie objektov..



Obr.3 : Hlavné komponenty optického zariadenia so systémom nastavenia vyberaných komodít z prúdu odpadu.

Triediace skenery obsahujú skenovacie kamery zložené z RGB detekčných modulov schopných rozoznávať štandardné farebné rozlíšenia komodít s problémom detekcie čiernych alebo zašpinených príp. prekrývajúcich sa predmetov.



Obr. 4: Čo vidí RGB kamera

Pre elimináciu hlbšej analýzy skenovania typu polymérov (napr. určené pre potravinový priemysel iným molekulárnym zložením alebo problémov s vizuálnym rozpoznaním (špinavé alebo príliš lesklé predmety) resp. prelepené viac ako 2/3 obsahu povrchu predmety etiketou z iného polyméru), je v najnovších aplikáciách optických systémov postupne testovaný modul využívajúci hyperspektrálny systém snímania predmetov od spoločnosti Tomra pod názvom Gain Next, ktorý je schopný rozoznávať tvarové rozlíšenie predmetov, a tak eliminovať problémy RGB. Viac o systéme v časti Robotické systémy triedenia.

Obr.5: Systém videnia predmetov systémom GainNext od spoločnosti Tomra.

3.1.1 Posúdenie štandardného optického triedenia v praxi

Medzi výhody štandardného optického triedenia patrí predovšetkým :

- Kapacita triedenia (detekcia až do 6t/h)
- Detekovanie pomerne širokého spektra el.mag žiarenia
- Hĺbková detekcia materiálu
- Čistota triedenia v rozsahu 85-95%
- Množstvo strateného materiálu (hit rate) 3-5%
- Heavy duty prevedenie
- Množstvo overených aplikácií po svete – výsledky verifikované v praxi

Procesné nevýhody štandardného optického triedenia :

- Tmavé materiály systém „nevidí“
- Rotujúce predmety nevytriedi presne
- Citlivosť na svetelné odlesky
- Potrebný väčší priestor na triedenie viacerých komodít

3.2. Robotické systémy triedenia

Robotické triedenie znamená proces, pri ktorom robotické zariadenia – najčastejšie robotické ramená alebo manipulačné systémy – identifikujú, uchopia a presunú vybrané objekty do nastavených kójí.

Na rozdiel od štandardného optického triedenia (ktoré iba rozpozná a vytriedi objekty pomocou RGB kamier a vzduchových trysiek), robotické triedenie dokáže s objektami reálne manipulovať.

3.2.1 Typy robotov

- Karteziánske (pravouhlé) roboty – presnosť a opakovateľnosť (použitie obrábacie centrá

- Scara roboty - rýchly, presný a kompaktný (VR montáž a balenie)

- Delta (pavúčie) roboty – 3,4-6 osé roboty s ramenami ovládanými presnými motormi. Sú rýchle a presné. (použitie : manipulácia, selektovanie a vyberanie vybraných komodít z toku).

- 6-osé roboty - rotácia v kĺboch, 6 osí voľnosti. Osadenie na pevnej alebo pohyblivej osi. Sú schopné simulovať prácu ľudskej ruky. (použitie : nitovanie, zváranie, paletizovanie, atď.)

V odpadovom hospodárstve sa používajú Delta roboty, pripomínajúce prácu manuálnych (ľudských) triediacich pracovníkov na pohyblivom páse, ktoré majú na konci ramien ovládaných pneumatickými prvkami uchopovacie vákuové prísavky pre čo najlepšie uchytenie vybranej komodity z prúdu odpadu na páse.

3.2.2 Systémy snímania predmetov

a) Hyperspektrálna detekcia snímania

Robotické systémy detekcie sa používa hyperspektrálny systém (HS) rozpoznávania polymérov cez ich rozdielne chemické zloženie, avšak viac do hĺbky ako používajú skenery pracujúce v rozsahu NIR-VIS (viditeľné spektrum a blízko viditeľného spektra el.mag žiarenia). Hyperspektrálny systém snímania pracuje tak, že zaznamenáva elektromagnetické žiarenie v mnohých veľmi úzkych spektrálnych pásmach (stovky až tisíce), čím poskytuje podrobnejšie spektrálne informácie o snímanom objekte než klasické RGB kamery používaných na optických systémoch.

b) Neurónové systémy rozpoznávania

Neurónové skenery sú technológie, ktoré využívajú umelé neurónové siete (ANN – Artificial Neural Networks) na to, aby vedeli identifikovať, klasifikovať alebo rozpoznávať objekty alebo vzory. Ako vstupné dáta – do siete - sa podávajú spektrálne údaje (napr. z hyperspektrálnej kamery). Spracovanie v neurónovej sieti pozostáva z vrstiev umelých neurónov. Každý neurón váži a kombinuje vstupy, aplikuje nelineárnu funkciu a posúva výsledok ďalej. Takto sa dá detekovať tvarovo rozpoznateľný objekt nezávisle od jeho chemického zloženia.

Rovnako ako HS, tak aj neurónový systém detekcie je možné podporiť strojovým učením založeným na báze umelej inteligencie (AI) s cieľom zvýšenia účinnosti triediaceho procesu.

3.2.3. Systémy a algoritmy strojového učenia

Odbor umelej inteligencie pozostávajúci zo súboru techník založených na štatistickej analýze dát.
Zahŕňa naprogramovanie počítača tak, aby sa mohol „učiť" z dát a rozhodovať sa na základe poskytnutých príkladov. Namiesto toho, aby sa algoritmy strojového učenia riadili preddefinovanými pravidlami, analyzujú vzory, vytvárajú modely a zlepšujú svoje predpovede alebo akcie pomocou počtu tréningových bodov.

Gradient Boosting Machines (GBM)
Algoritmy sú silné pre prácu so štruktúrovanými dátami a často sa používajú na klasifikáciu i regresiu. Sú známe svojou vysokou presnosťou a schopnosťou spracovávať veľké dátové sady.

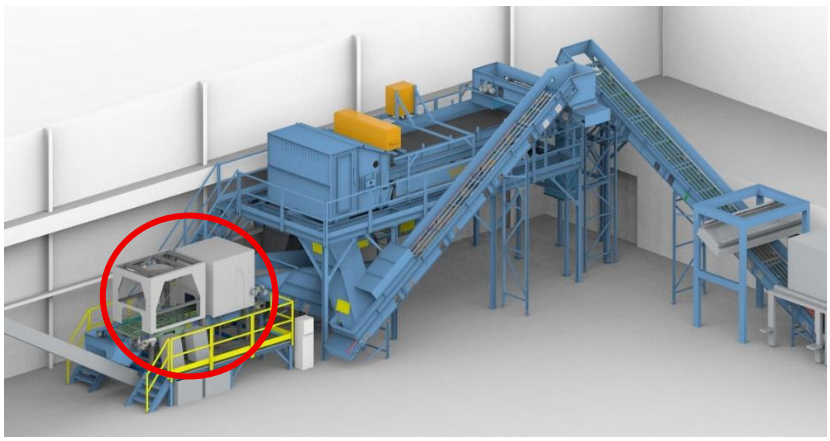
K-Means Clustering
Algoritmus sa používa na neriadené učenie, napríklad na zoskupenie podobných dátových bodov, čo môže pomôcť identifikovať vzorce alebo anomálie. Je vhodný na analýzu dát bez vopred daných štítkov.

Random Forest
Algoritmus obľúbený pre svoju schopnosť spracovávať komplexné dáta a poskytovať dôležitosť premenných. Používa sa ako pre klasifikáciu (napr. či dôjde k poruche do určitého časového rámca), tak pre regresiu (napr. predpovedanie zostávajúcej životnosti). Random Forest vhodný na riešenie zložitých dátových sád

Support Vector Machines (SVM)
Efektívne pre klasifikáciu a regresiu, najmä pri práci s vysokorozmernými dátami. V prediktívnej údržbe sa často používajú na detekciu anomálií

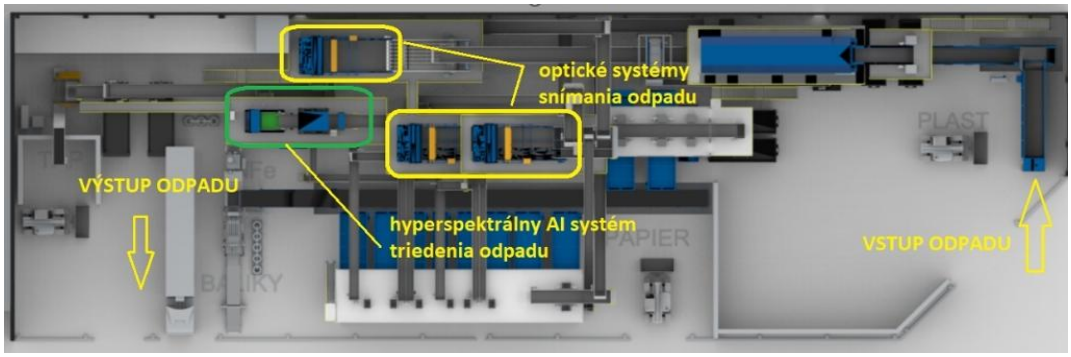
Obr. 5: Systém snímania a triedenia komunálneho odpadu Delta robotom

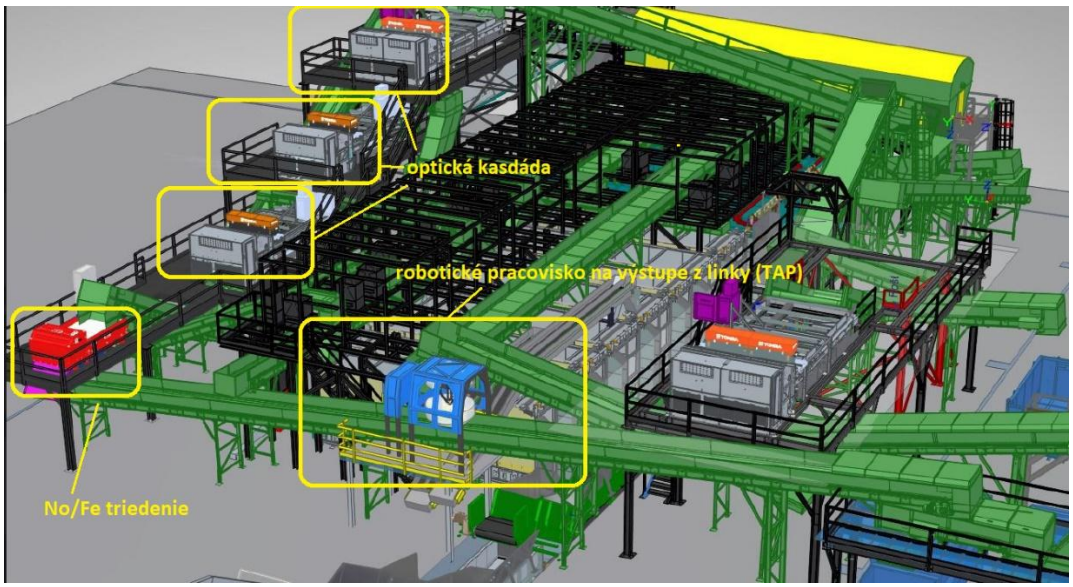
Roboty pracujú pri kapacite do ca 60-70 úchopov (zodpovedá ca 180kg vytriedenia 3D komodity (napr. HDPE, PP alebo PET / hodinu , pri toku do ca 0,5t/h- max. detekovateľný tok pre **Single robota**.
Twin roboty pracujú s dvojitým výkonom, to znamená vykonajú do ca 120-130 úchopov (vytriedenie ca 400kg 3D plastov za hod pri toku ca 1t/h- max. detekovateľný tok). V 1 pracovnej zmene (8hod.) vykonajú až do 60.000 úchopov a vytriedia v rozsahu 7-8 komodít, až do 3.200kg komodít počas procesu triedenia PKO.



Obr.7 : Znázornenie použitia robotického pracoviska v štandardnej triediacej linke na PKO.

V triediacich linkách je bežné používanie oboch systémov triedenie odpadu, pričom sa využíva ich individuálnych predností. Nižšie je znázornenie triediacej linky na PKO s optickými a robotickými systémami triedenia vybraných odpadových komodít.





Obr.8 a 9 : Znázornenie použitia optických a robotických systémov triedenia komodít v linke na PKO

3.2.4 Posúdenie robotického triedenia v praxi

Medzi výhody robotického triedenia vybaveného HS a neurónovým sledovaním patrí predovšetkým :

- Detekovanie veľmi širokého spektra el.mag žiarenia
- Hĺbková detekcia materiálu
- Rozpoznanie všetkých druhov materiálov (aj tmavých)
- Postačuje menší triediaci priestor
- Detekcia 98-99%, zachytenie : 93%
- Kapacita

Procesné nevýhody robotického triedenia :

- Malá kapacita (do ca 1.0t/h) / twin robot , inak vys. CAPEX
- Vyššie obstarávacie náklady (v súč. ca o 20-25% vyššie ako u optických zariadení)

4. Záver

Príspevok poskytuje komplexné informácie o súčasných najmodernejších technologických systémoch spracovania plastového odpadu – optické jednotky, využívajúce vlastnosti RGB kamerového snímania komodít v odpade a robotické delta systémy využívajúcich hyperspektrálne kamery s doplneným neurónovým systémom detekcie spolu s mechanickým pneumatickým zachytením vybraného druhu odpadu v triedenom prúde. Obe formy sú v príspevku doplnené v reálnych aplikáciach z praxe pre lepšie pochopenie ich použitia. Cieľom príspevku bolo poukázať na ich možnosti a vzájomne ich procesne porovnať. Ideálna sa javí kombinácia oboch systémov, pokiaľ to rozpočet na investíciu dovoľuje. Vtedy je možné očakávať výsledky účinnosti triedenia pri vysokej kapacite spracovania odpadu na vysokej úrovni.

Problematika možností zhodnotenia KO je široká a stále otvorená na rozvoj a aplikáciu riešení. Veľká miera rozšírenia technologických aplikácií a využitia spracovaných foriem odpadu závisí predovšetkým na nastavení legislatívy jednotlivých krajín EÚ s možnosťami využitia aj napr. systémom dotačných mechanizmov pre spracovateľov odpadu, aby sa vysokoúčinné spracovávanie odpadu vyplatilo aj z ekonomického hľadiska a tak sa dosiahol spoločenský cieľ cirkulárnej ekonomiky. Vtedy bude mať vývoj technológií súvisiacich s aplikáciami liniek, a s tým súvisiace aj samotné spracovávanie odpadu v akejkoľvek jeho forme šancu na zastavenie rastu odpadu na skládkach spolu s postupným nahradením dočerpávaných energetických neobnoviteľných surovín.

5. Poďakovanie

Ďakujem technologickým partnerom Tomra Sorting Solutions, s.r.o., Edico a.s. Bratislava a VÚMZ SK, s.r.o., za poskytnutie technických, odborných a obrazových materiálov pre spracovanie príspevku.

6. Použitá literatúra

1. BÁREKOVÁ, A. – SKLENÁR, Š. 2008. Moderné trendy v množstvovom zbere komunálneho odpadu. In: Odpady, roč. 8, 2008, č. 5, s.11-14.
2. SOLDÁN, M. - SOLDÁNOVÁ, Z. - MICHALÍKOVÁ, A. 2005. Ekologické nakladanie s materiálmi a odpadmi. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2005. ISBN 80-227-22235.
3. AUTOSORT – TOMRA SORTING SOLUTIONS RECYCLING. Technické manuály pre optické systémy triedenia spoločnosti Tomra Sorting Recycling . 2022. [cit. 06. 11. 2022].
4. AUTOSORT – TOMRA SORTING SOLUTIONS RECYCLING. PRE-INSTALLATION REQUIREMENTS. 2012. [cit. 06. 01. 2019].
5. SOLDÁN, M. - SOLDÁNOVÁ, Z. - MICHALÍKOVÁ, A. 2005. Ekologické nakladanie s materiálmi a odpadmi. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2005. ISBN 80-227-22235.
6. Druhy odpadov [online] .2010 [cit. 2010-02-11]. Dostupné na internete: http://www.separujodpad.sk/index.php/obcan/druhy-odpadov.html?tmpl=component&…
7. Legislatíva pre oblasť nakladania s komunálnym odpadom [online] 2010. [cit. 2010-02-11]. Dostupné na internete: www.separujodpad.sk/index.php/samosprava/legislativa-preobce.html?tmpl=co…