

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju

Recikliranje i zbrinjavanje otpada

Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Katančić

Oporaba/recikliranje materijala

- **Oporaba otpada** - svaki postupak čiji je glavni rezultat uporaba otpada u korisne svrhe kada otpad zamjenjuje druge materijale koje bi inače trebalo uporabiti za tu svrhu
- Rezultat oporabe otpada je oporabljeni (recovered) materijal ili energija
- **Za uspješnu oporabu** materijala iz krutog otpada nužno je:
 - izdvajanje materijala iz ukupnog otpada ili odvojeno prikupljanje
 - usitnjavanje, pranje, zbijanje otpadnih materijala
 - dodatno razdvajanje po vrstama materijala (npr. PET iz plastike, Al iz metala)
- **Recikliranje** - svaki postupak oporabe kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu svrhu **osim uporabe otpada u energetske svrhe**, odnosno prerade u materijal koji se koristi kao gorivo ili materijal za zatrpavanje
- Oporaba je širi pojam od recikliranja
- **Zbrinjavanje otpada** je svaki postupak koji nije oporaba otpada, uključujući slučaj kad postupak kao sekundarnu posljedicu ima obnovu tvari ili energije

Postupci zbrinjavanja otpada (definirano Pravilnikom o gospodarenju otpadom)

- Odlaganje otpada u ili na tlo (npr. odlagalište)
- Duboko utiskivanje otpada (npr. utiskivanje otpada crpkama u bušotine, iscrpljena ležišta, prirodne šupljine)
- Odlaganje otpada u površinske bazene (npr. odlaganje tekućeg ili muljevitog otpada u jame, bazene, lagune)
- Odlaganje otpada na posebno pripremljeno odlagalište (odlaganje u povezane komore koje su zatvorene i izolirane jedna od druge i od okoliša)
- Spaljivanje otpada na kopnu
- Spaljivanje otpada na moru (Ovaj je postupak zabranjen zakonodavstvom EU-a i međunarodnim konvencijama)
- Trajno skladištenje otpada (na primjer smještaj spremnika u rudnike)
- Skladištenje otpada prije primjene bilo kojeg od postupaka zbrinjavanja (osim privremenog skladištenja otpada na mjestu nastanka, prije skupljanja)

Oporaba/recikliranje materijala

- Neophodno je razviti tržište-burzu oporabljenog materijala
- U sustavu oporabe **kontrola čistoće/kvalitete** ima presudnu važnost
- Npr. mali udio keramike u staklu može učiniti staklo u potpunosti neprihvatljivo za recikliranje, ili npr. kvaliteta papira odrađuje njegovu cijenu (npr. karton i bijeli papir različite su kvalitete)
- **Hrvatska gospodarska komora** 1995. godine odredbama Zakona o otpadu dobila **ovlasti kreiranja Burze otpada**
- Na temelju tog zakona, svaki je proizvođač otpada bio dužan onaj otpad koji je moguće na bilo koji način upotrijebiti u proizvodnom procesu prijaviti na Burzu otpada
- Burza otpada središte je ponuda i potražnji svih vrsta otpada nastalih tijekom proizvodnje koje se međusobno povezuje ovisno o predmetu prijave
- Organizirana je radi povezivanje ponuditelja sekundarne sirovine i potencijalnih kupaca takvih materijala
- Kvaliteta tržišta sekundarnih sirovina uvelike ovisi o definiranim tehnološkim kriterijima i njihovoj primjeni
- Minimalne tehnološke zahtjeve pripremile su tvrtke koje u svojim proizvodnim procesima koriste sekundarne sirovine

Oporaba/recikliranje materijala

Primjer: Minimalni tehnološki zahtjev za stakleni krš nastao u postupku otpadnog stakla

Osnovni opis otpada:

- MTZ se odnose na stakleni krš namijenjen proizvodnji staklenih tvari i predmeta u proizvodnom procesu ponovnog taljenja za potrebe staklene ambalaže
- MTZ odnosi se samo na otpad iz sakupljanja oporabljene ambalažnog stakla, ravnog stakla i stolnog stakla bez olova
- U staklenom kršu koji se koristi u proizvodnji ambalažnog stakla ne smije se koristiti miješano kruto staklo iz komunalnog otpada i bolničkog otpadnog stakla
- Stakleni krš ne smije sadržavati opasni otpad

Tehnološki zahtjevi za reciklažu:

Za ocjenu kvalitete staklenog krša, proizvođač trenutno koristi tri kategorije:

- (1) Krš od nečistoća sadrži samo čepove i etikete. Krš je odvojen po bojama – **najbolja ocjena**
- (2) Krš u manjim količinama sadrži nečistoće poput drva, plastike, papira, pluto, pvc-folija. Krš je u većoj mjeri odvojen po bojama – **cijena reciklaže ovog krša viša je, a ocjena niža**
- (3) Krš u manjim količinama (tragovima) sadrži nečistoće poput keramike, porculana, kamenja, armiranog stakla te organske nečistoće. Krš nije odvojen po bojama – **najlošija ocjena**

Uz navedeno koristi se i analiza vlastitog laboratorija.

STAKLENI KRŠ		
Maksimalno dopuštena onečišćenja	%	gram/toni
Keramika, kamenje, porculan	max. 0.002	20
Magnetični metali	max. 0.001	10
Nemagnetični metali	max. 0.001	10
Organske tvari	max. 0.050	500
Vlaga	max. 2	20 kg
Stakla drugih boja	%	kg/t
U bijelom staklenom kršu: ■ polubijelo ■ zeleno ■ smeđe	max. 8 max. 0.005 max. 0.01	80.00 0.05 0.10
U zelenom staklenom kršu: ■ bijelo/polubijelo ■ smeđe	max. 10 max. 5	100 50
U smeđem staklenom kršu: ■ bijelo/polubijelo ■ zeleno	max. 8 max. 10	80 100
Granulometrijski sastav	%	kg/t
> 50 mm	0	0
41 – 50 mm	max. 3.5	35
< 5 mm	max. 5	50

ako je staklo sortirano po bojama – bijelo, zeleno, smeđe – vrednuje se više. Vetropack ima specifikaciju za maksimalno dozvoljene primjese drugih boja, a da bi se krš još uvijek mogao smatrati sortiranim po boji. U protivnom se krš smatra kao miješana boja i potrebni su još dodatni troškovi u naknadnom razdvajanju po bojama.

Oporaba/recikliranje materijala

- Oporaba materijala zahtjeva
 - razdvajanje po vrstama materijala
 - uklanjanje otpada niske kvalitete
- Uspješan sustav oporabe otpada koristi kombinaciju više različitih postupaka razdvajanja;
 - razdvajanje na mjestu nastanka otpada
 - strojno razdvajanje u centru za zbrinjavanje
 - ručno razdvajanje u centru za zbrinjavanje (poskupljuje zbrinjavanje)
- Uspješni sustav oporabe materijala zahtjeva pažljivo razmatranje njegovih **troškova** u pojedinim fazama kao i analizu **tržišta oporabljenih materijala** (sekundarne sirovine)
- Postrojenja za uporabu materijala su specijalizirana za razdvajanje i preradu otpada

RAZDVAJANJE MATERIJALA IZ KOMUNALNOG OTPADA

- Razdvajanje se može provoditi ručno ili automatizirano vođenjem pomoću računala
- Automatizirano razdvajanje se bazira na jednoj od **metoda identifikacije** otpadnih materijala
- Metode mogu biti od razdvajana flotacijskim taloženjem do naprednih automatiziranih „osjeti/odvoji” tehnologija
- Baziraju se na razlikama u
 - **kemijskim**
 - **optičkim**
 - **električnim**
 - **fizikalnim svojstvima**
- Komercijalna metoda razdvajanja mora biti:
 - brza, pouzdana, ekonomična i fleksibilna kako bi se izbjegla kontaminacija izdvojenog materijala kao npr. različite boje stakla

Razdvajanje materijala iz komunalnog otpada

- Različita oprema i napredni tehnološki postupci koriste se za razdvajanje otpadnih materijala
- **Magnetski** se razdvajaju **metali**, a **papir i plastika** se razdvajaju na principu različite **gustoće**, zatim razdvajanje na pomičnim trakama propuhivanjem **zraka, trešnjom**
- U mnogim slučajevima uz strojeve za razdvajanje potreban je dodatni ljudski rad što znatno **unapređuje postupak razdvajanja**
- Npr. iz transportnih traka za razdvajanje uklanjaju eventualno prisutna onečišćenja čime se dobiva visoko kvalitetan proizvod
- Razdvojeni materijali se komprimiraju, zbijaju, baliraju ili se usitnjavaju i peru. Tako se materijali - sirovina pripremaju za postupak recikliranja ili siguran transport i skladištenje
- Plastika i papir mogu se izdvajati iz nisko energetske vrijednog otpada za dobivanje goriva. Takva mješavina papir/plastika se naziva **gorivo iz otpada** (refuse-derived fuel, **RDF**). RDF se sastoji od papira, kartona, drva, tekstila i sitne plastike, suho je i stabilno te bez neugodnih mirisa. Zbog visoke ogrjevne vrijednosti koristi se kao gorivo širom EU u različitim postrojenjima, od cementnih peći do toplana i termoelektrana

Razdvajanje materijala iz komunalnog otpada

Ručno razdvajanje

- **Vizualno** odvajanje prema **boji, prozirnosti, obliku, teksturi** proizvoda
- **Niska čistoća** odvojenog otpada
- **Mali kapacitet** (60-80 kg/h)
- Skupo razdvajanje zbog **visoke cijene ljudskog rada**, značajno diže cijenu recikliranja
- Uobičajeno se koristi nakon barem u nekoj mjeri automatskog razdvajanja ili u slučaju relativno homogenog otpada

Automatsko razdvajanje

- U modernim postrojenjima za obradu otpada
- Temelji se na **fizikalnim i kemijskim svojstvima** otpadnog materijala
- **Skupa početna investicija**
- **Velika čistoća** razdvojenog otpada
- **Veliki kapacitet** (više tona/h)
- Značajno **niži troškovi recikliranja** zbog potrebe za manjim brojem ljudi

Automatizirano razdvajanje

- **Fizikalna svojstva - gustoća**

- suhi postupak propuhivanjem zraka - centrifugalno odvajanje
- mokri postupak, flotacijsko razdvajanje - prema gustoći čestica

- **Optička svojstva**

- odvajanje prema boji ili prozirnosti

- **Električna - elektrostatičnost**

- triboelektrična olovka
- elektrifikacija trenjem: triboelekt. bubanj, električki nabijena traka
- odvajanje metalnih nečistoća s vrtložnom strujom

- **Spektroskopske metode - apsorpcija svjetla**

- IR spektroskopija
- Raman spektroskopija
- Laserski
- Plazma emisijska spektroskopija
- Polarizirano svjetlo, UV iluminacija, fluorescentna apsorpcija
- X-zračna fluorescencija

Automatizirano razdvajanje

Suho (zračno) razdvajanje

- Razdvajanje zrakom zajedno sa oscilirajućom transportnom trakom može ukloniti grubi materijal kao što su metalni fragmenti, staklo, zemlja/kamenčići
- Uobičajeno se koristi **višestupanjsko** zračno razdvajanje s kojim se može dobiti do **4 struje materijala**
- Nedostatak suhog postupka, na recikliranom materijalu zaostaju **nečistoće** zbog prisutnosti raspadnute hrane i masnoća za razliku od mokrog postupka gdje se odvaja zaostala hrana - neugodan miris



Automatizirano razdvajanje

Suho (zračno) razdvajanje



<https://www.youtube.com/watch?v=tWcR6iqS38M>

Automatizirano razdvajanje

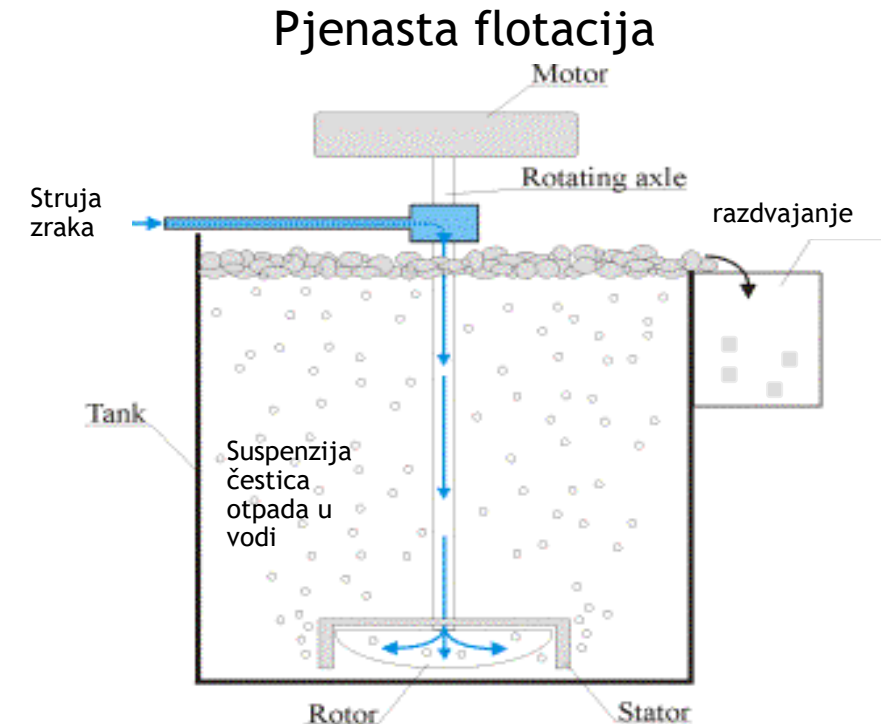
Razdvajanje bazirano na gustoći

- **Flotacijsko razdvajanje**

- Jedna od najstarijih automatskih metoda - tekućina, mokri postupak
- medij je uobičajeno voda
- nedostatak je loše razdvajanje ukoliko materijali imaju približno istu ili sličnu gustoću, kao što je to slučaj kod nekih vrsta plastike

- **Pjenasta flotacija**

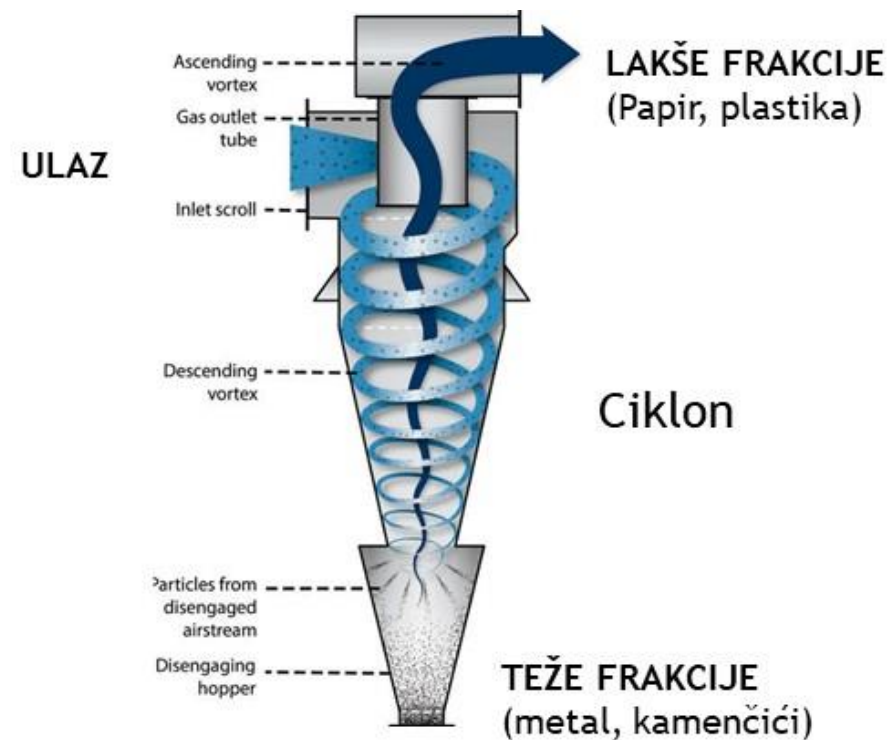
- metoda prikladna za razdvajanje materijala slične gustoće
- dodaju se sredstva za vlaženje (surfaktanti) poput **sulfonske kiseline** koji mijenjaju hidrofbnost/hidrofilnost medija
- **najefikasnija za razdvajanje plastike slične gustoće**, određene vrste postaju hidrofbne, a određene hidrofilne
- u tank se uvodi zrak te se na **mjehuriće hvataju hidrofbne čestice**, koje se nakupljaju na **površini u obliku pjene**
- hidrofilne čestice tonu na dno, mehaničko miješanje pospješuje proces



Automatizirano razdvajanje

Razdvajanje bazirano na gustoći

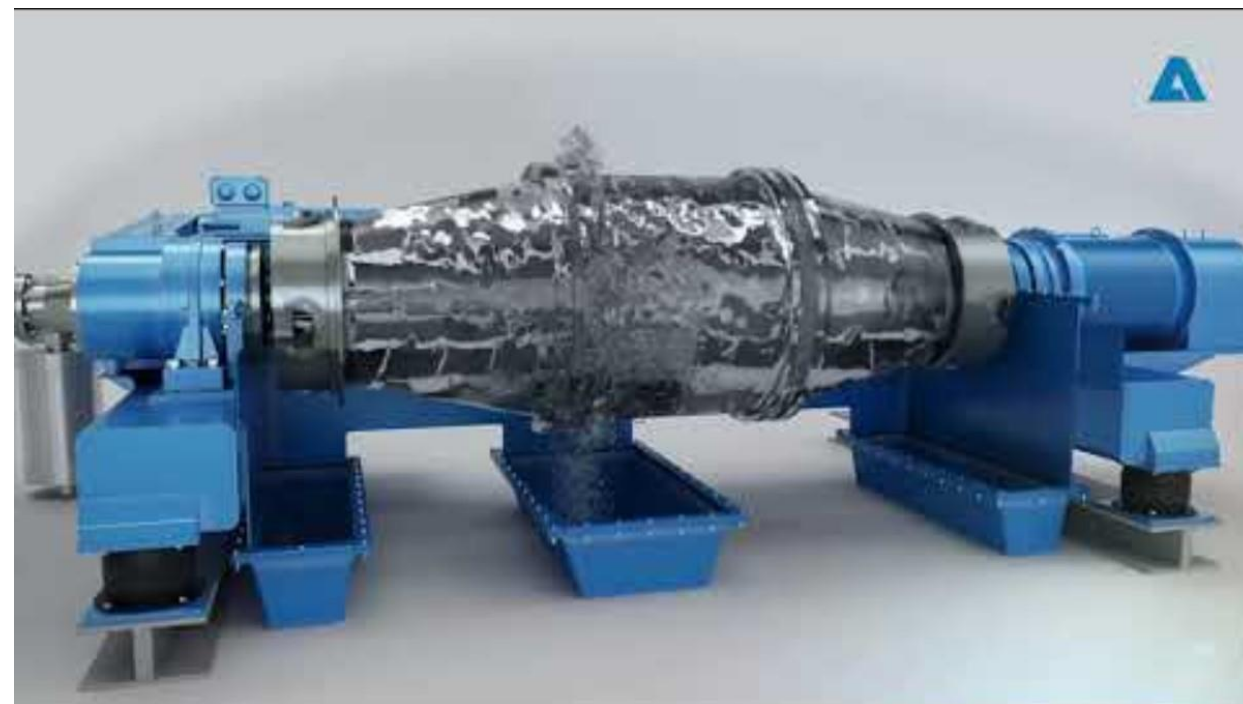
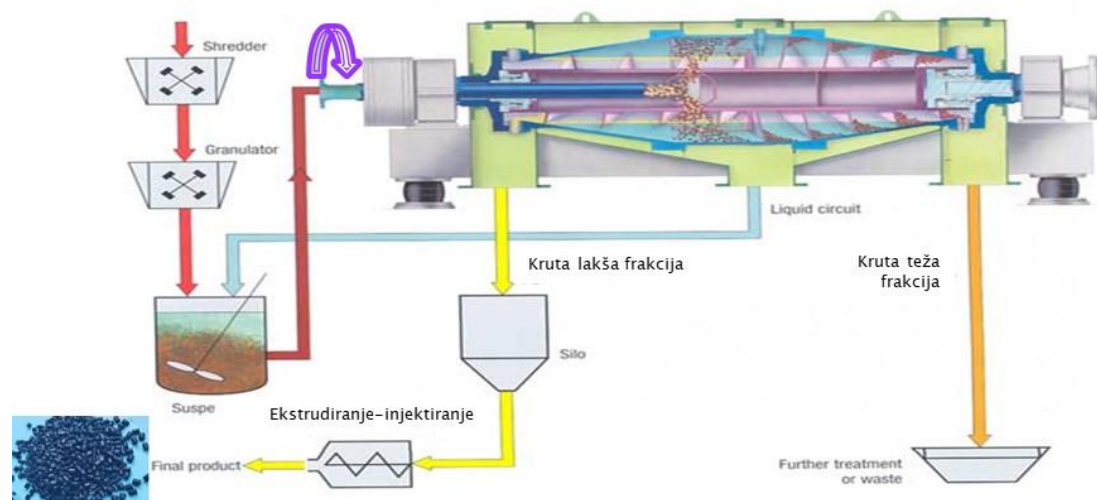
- **Ciklonsko - centrifugalno razdvajanje**
 - medij zrak - suhi postupak
 - radi na principu centrifugalnog ubrzanja i razdvajanja smjese čestica različite gustoće u struji zraka
 - mogu se dobiti **tokovi otpada visoke** čistoće korištenjem kaskadno povezanih više ciklona
 - prednost se daje ciklonskom razdvajanju zbog veće učinkovitosti nego kod drugih suhih postupaka (vibracijska traka)
- **Hidrociklonsko - centrifugalno razdvajanje**
 - medij tekućina - mokri postupak
 - pod utjecajem centrifugalne sile dolazi do razdvajanja i taloženja teže frakcije na plaštu centrifuge



Automatizirano razdvajanje

Razdvajanje bazirano na gustoći

Hidrociklonsko razdvajanje



Andritz Group Censor®

Censor sustav - napredni oblik hidrociklona i može razlikovati materijal po gustoći do $0,05 \text{ g/cm}^3$

<https://www.youtube.com/watch?v=O9674iuiYh8>

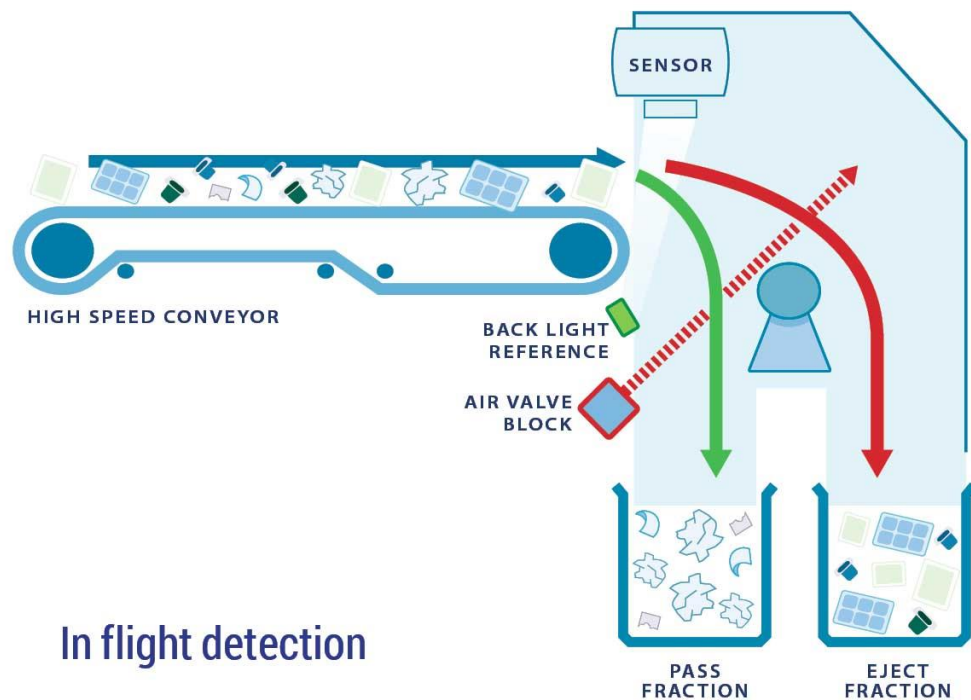
Automatizirano razdvajanje

Optičko sortiranje i razdvajanje

- **Bazirano na spektroskopskim metodama**
 - Infracrvena spektroskopija srednjeg područja (MIR), zračenje u rasponu $4.000-700\text{ cm}^{-1}$
 - Infracrvena spektroskopija bliskog područja (NIR), zračenje u rasponu $14.300-4.000\text{ cm}^{-1}$
 - Polarizirano svjetlo, UV iluminacija, fluorescentno zračenje, x-zračenje
- **Automatsko sortiranje plastike** - kada je izložena izvoru zračenja (na oscilirajućoj traci ili u slobodnom padu) **detektor identificira tip plastike** (na temelju kemijskog sastava) prema **zadanom kriteriju**
- **Ciljana plastika se odvaja** izbacivanjem koristeći usmjereni zrak dok ostali tipovi nastavljaju kao dio ostatka toka
- Kada se plastika prepozna, šalje se **signal elektromagnetskom ventilu** te mlaz komprimiranog zraka mijenja putanju komada plastike

Automatizirano razdvajanje

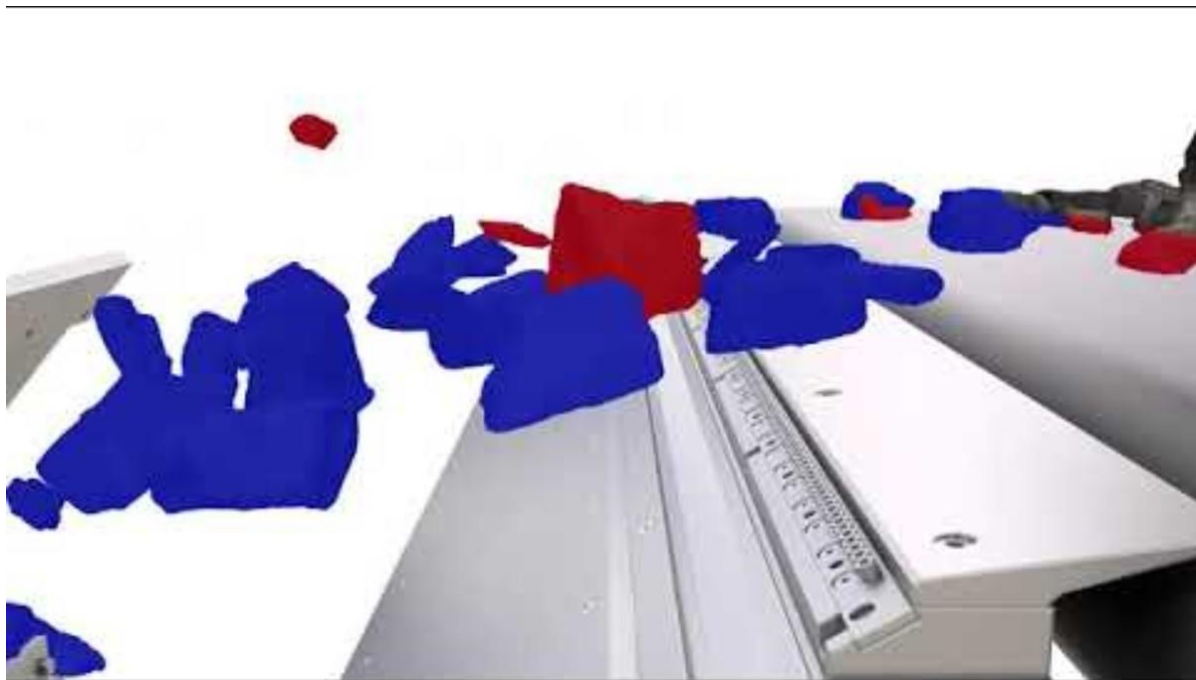
Optičko sortiranje i razdvajanje



- Senzor podešen računalom prepoznaje vrstu materijala
- Identifikacija kemijskog sastava

Automatizirano razdvajanje

Optičko sortiranje i razdvajanje



<https://www.youtube.com/watch?v=YkqDgJfhyLk>

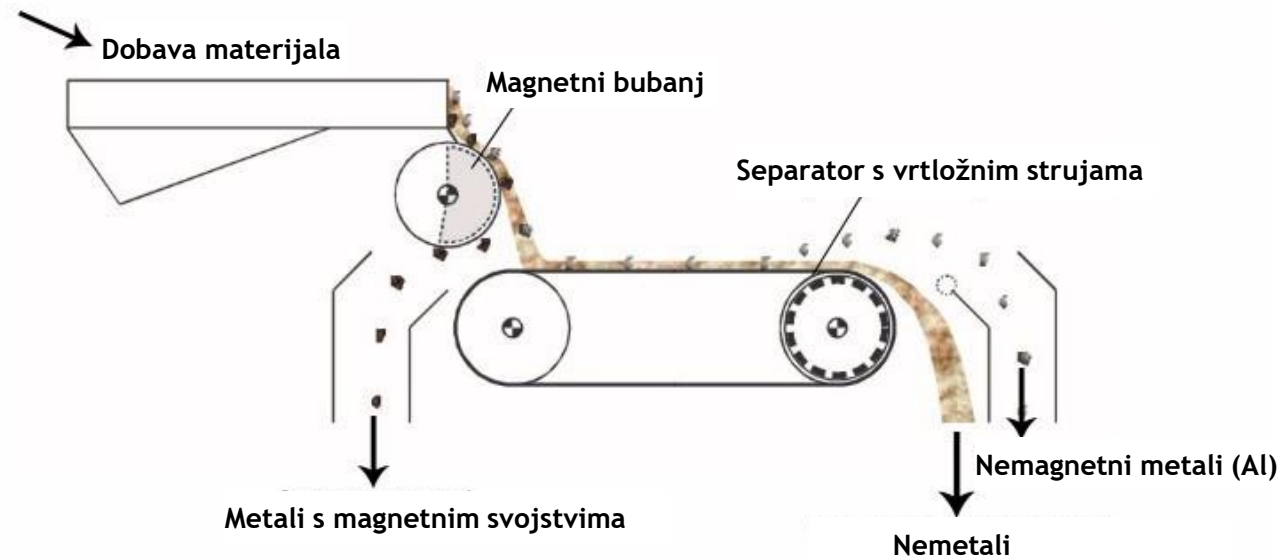


<https://www.youtube.com/watch?v=bH28yuwMl58>

Automatizirano razdvajanje

Razdvajanje metala

- Odvajanje **feromagnetnih metala** upotrebom **magneta**
- Razdvajanje aluminija od ostalih metala?
- Na principu **virtložnih struja** - dolazi prilikom gibanja vodiča kroz magnetsko polje. Spomenuta relativna gibanja uzrokuju razdvajanje naboja (razliku potencijala) u vodičima, pri čemu dolazi do kružnog toka struje unutar vodiča
- Putanja čestica po napuštanju bubnja određena je kombinacijom sila gravitacije, sile trenja između čestica i trake, sile otpora kretanju zrakom, te elektrodinamičke sile



Razdvajanje aluminija od ostalih metala



<https://www.youtube.com/watch?v=Hmj-NLJyZs0>



<https://www.youtube.com/watch?v=Usk-bzzC3Do>

Postrojenja za oporabu materijala (material recovery facilities, MRFs)

1) „Čisti” MRF

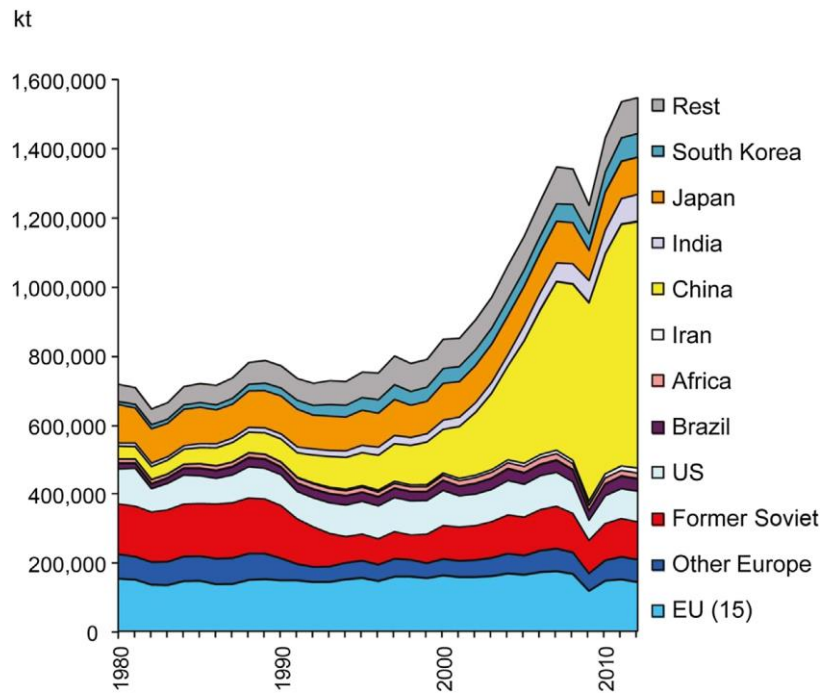
- Obraduje reciklabilne materijale koji su dijelom već odvojeni od miješanog MSW
- Jedna struja - miješano papir, plastika, metal
 - Smanjuje potrebu sortiranja od strane stanovništva
 - Time potiče sudjelovanje većeg broja ljudi
 - Smanjeni troškovi odvoza (kamioni s jednim odjeljkom), smanjeno vrijeme potrebno za odvoz
 - Viši troškovi obrade
 - Mogućnost kontaminacije materijala
- Dvije i više struja - odvojena obrada papira, plastike i metala

2) „Prljavi” MRF

- Obraduje miješani komunalni otpad te ga razdvaja automatiziranim i ručnim metodama
 - najniži troškovi odvoza (jedna vrsta kamiona za sve materijale)
 - najveća kontaminacija oporabljenog materijala
 - troškovi pogona su značajno veći u odnosu na čisti MRF (znatno zahtjevnije razdvajanje)
 - ne zahtjeva sortiranje od strane stanovništva

RECIKLIRANJE METALNOG OTPADA

- Metalni otpad iznimno je vrijedna sekundarna sirovina
- Čelični otpad - materijal koji se najduže i u najvećoj mjeri uspješno reciklira
- Metalni otpad je moguće više puta reciklirati bez posljedice za kvalitetu proizvoda
- Više od 40 % globalne proizvodnje čelika potječe od otpadnog materijala
- Najveći **izvoznici** otpadnog čelika su SAD, Rusija i UK



zemlje najveći proizvođači čelika

Metalni otpad može se podijeliti u dvije glavne kategorije:

- **Željezni metali** (legure čelika, ugljični čelik, lijevano i kovano željezo) (eng. *ferrous metals*)
- **Obojeni metali** (Al, Cu, Zn, Ti, Pb, Cr, mjed, i plemeniti metali - Au, Ag, Pt, Pd) (eng. *nonferrous metals*)

Recikliranje metalnog otpada

Željezni metali

- **Željezni metali su glavna frakcija metalnog otpada**
- Koriste se u cestovnim konstrukcijama, željeznicama, mostovima, tunelima i drugoj infrastrukturi
- Većina modernih građevina (neboderi, mostovi, stadioni) koristi čelik za armaturu, u građevinskim materijalima poput mreža, vijaka, čavla, žica
- Teške oprema, poput transportnih brodova, vlakova i željezničkih sustava, buldožera, vojnih i oklopnih vozila ili dizalica također su napravljeni od čelika
- Čelik se intenzivno koristi za karoserije automobila
- Kućanski alati, limenke hrane, namještaj, posuđe, ručni satovi
- Zbog otpornost na hrđu i visoku učinkovitost u ekstremnim temperaturnim uvjetima, čelik se koristi za uporabu u kirurškim alatima (nehrđajući čelik) i zrakoplovima

Recikliranje metalnog otpada

- Prikupljeni metalni otpad zatim se pretvara u nove materijale jednake ili slične kakvoćom kao izvorni materijal kroz metalurške postupke
- Ovisno o razredima čistoće materijali zahtijevaju minimalne ili dodatne korake metalurških i kontroliranih procesa u skladu sa specifikacijama
- Iz tog razloga, sortirani i čisti otpad ima višu cijenu na tržištu otpada zbog veće čistoće i jednostavnost naknadnih procesa tijekom recikliranja
- **Potrošački metalni otpad** - limenke za piće i hranu, rabljeni uređaji, alati, stari automobili itd.
- **Industrijski metalni otpad** - raznolikiji i sastoji se od starih vlakova i tračnica, čelika oporabljene iz komercijalnih zgrada i konstrukcija ili industrijskih postrojenja, brodova, vojne građevinske opreme
- Kako se potreba za željeznim metalima povećava, a većina čeličnih proizvoda ostaje u upotrebi dulje vrijeme prije nego što se mogu reciklirati, **nema dovoljno recikliranog čelika** da zadovolji rastuću potražnju tržišta recikliranih materijala

Recikliranje metalnog otpada

- Recikliranje otpadnog željeznog materijala važan je čimbenik za čeličnu industriju
- **Unutarnji reciklirani otpad** - ekonomičan i koristan čelični otpad koji se skuplja izravno u čeličanama, u obliku krajnjih proizvoda s greškom, obrescima, strugotinama od piljenja ili u sličnim ostacima iz proizvodnja proizvoda od sirovih materijala
- Ova vrsta otpada se ne tretira kao otpad, tako da je njegova **cijena obično viša od ostalih otpadaka zbog visoke čistoće**, može biti izravno dodan u visoku peć i spreman je za ponovno taljenje za proizvodnju novog čelika i proizvoda
- Većina **metalnog otpada iz komunalnog otpada** je u obliku **ambalažnog otpada** (kontejneri, limenke ili krupni otpad poput stolica, stolova, kreveta i kućanskih aparata)
- Suvremeni život nametnuo je korištenje metalne ambalaže koja je nepovratna i odmah nakon uporabe postaje otpad
- Recikliranje **metalne ambalaže** u praksi uzrokuje veće probleme nego recikliranje ostalog metalnog otpada, jer je često **opterećena plastikom, papirom, ljepljivom, gumom ili bojama**
- Veliki udio tržišta čeličnog otpada čine blokovi motora, željezničke ili tramvajske tračnice, komponente u vjetroturbinama, buldožeri, vlakovi i brodovi

Recikliranje metalnog otpada

- Otpadni čelik dobiven rezanjem starih brodova ima najveći doprinos tržištu čeličnog otpada (npr. samo 2018. su 744 broda izrezana)
- Oko 95 % mase broda može se oporabiti na kraju njegovog vijeka plovidbe
- **Rastavljanje brodova je najopasniji posao recikliranja čeličnog otpada**
- Cijeli proces uključuje niz rizičnih zadataka, ljudi koji su uključeni rukuju opasnim tvarima, česte su nesreće, izloženi su kasnijim bolestima
- Većina dijelova svakog broda obložena je slojevima za zaštitu od korozije koji sadrže olovo, kadmij, arsen, cink i krom
- Osim toga, sadrže i druge opasne tvari poput azbesta, PCB-a (poliklorirani bifenil), različitih vrsta starog ulja i masti, otrovnih plinova, emisija i para od zavarivanja

Recikliranje metalnog otpada

- Otpadni materijal iz komunalnog otpada ili veliki komercijalni ili industrijski otpad se sortiraju u mehaničko-biološkim postrojenjima (MBO) ili postrojenjima za oporabu materijala (MRF)
- Drobilica (šreder) se koristi za rezanje krupnog otpada u manje dijelove koji se dalje mehanički sortiraju kako bi se dobio čisti metalni otpad i razdvojio nemagnetski otpad (metali - Cu, Zn, Pb, Mg, mjed; staklo i plastika)
- Čisti čelični metalni otpad se sortira i šalje na recikliranje



Recikliranje metalnog otpada

