

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE

Zavod za polimerno inženjerstvo i organsku kemijsku tehnologiju

Recikliranje i zbrinjavanje otpada

Izv. prof. dr. sc. Zvonimir Katančić

ENERGETSKA OPORABA (SPALJIVANJE)

- Spaljivanje je termička obrada organskog otpada, proces izgaranja tvari u prisustvu O_2 kod visokih temp. pri čemu dolazi do oslobađanja topline, koja se pretvara u energiju
- Na ovaj način zbrinjava se energetske visoko vrijedan otpad - to je otpad koji tijekom svoje razgradnje/degradacije pri visokim temperaturama oslobađa puno topline
- Ekonomski nije opravdano na ovaj način zbrinjavati energetske nisko vrijedan otpad, osim u slučaju, ako je riječ o toksičnom otpadu
- Ocjena o energetske vrijedan otpada moguća je prema kemijskom sastavu, otpadni materijali koji su čisti ugljikovodici imaju visoku energetske vrijednost
- Sustavi za spaljivanje (spalionice) sastoje se od više zasebnih sustava za spaljivanje, a razlikuju se ovisno o vrsti otpada koji se spaljuje
- Moraju sadržavati sustave za odvodnju/izdvajanje toksičnih plinova, prašine, lebdećeg pepela, a oni se dalje pročišćavaju i zbrinjavaju na odgovarajući način
- Prednosti spaljivanja su:
 - Smanjenje** otpada koji se odlaže
 - Dobivanje **energije**
 - Smanjenje troškova** razdvajanja MSW-a (kod spaljivanja miješanog otpada)

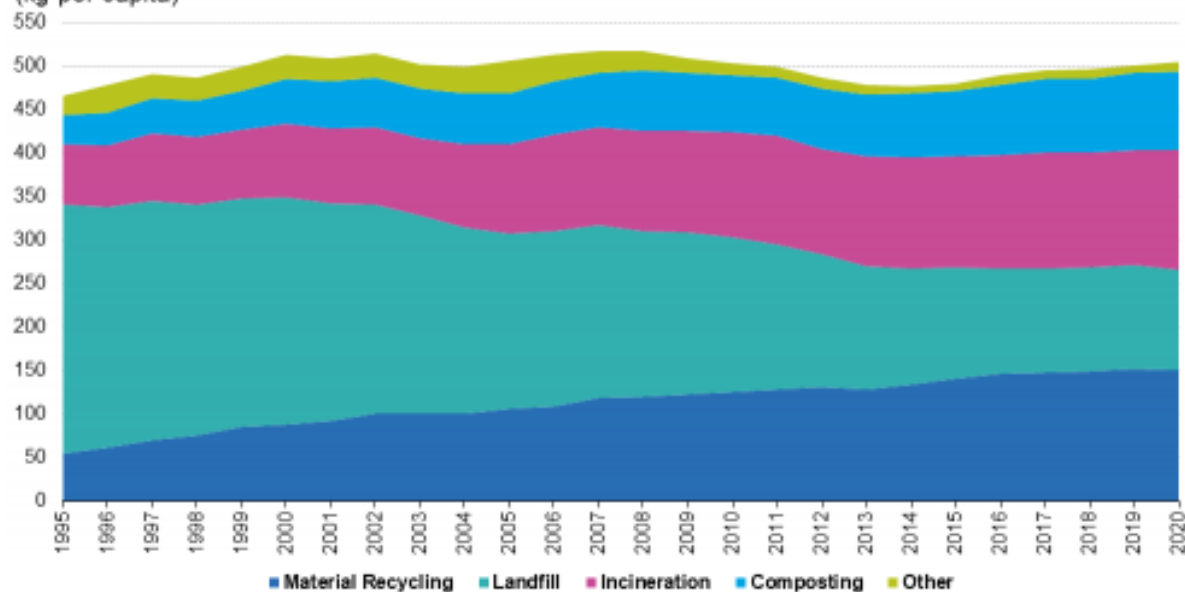
Energetska uporaba

- Spaljivanje komunalnog i industrijskog otpada daje **30-50 % pepela** koji se dalje reciklira (ugradnja u opeku ili cement)
- **Količina kisika** tijekom spaljivanja
 - neophodno je regulirati tijekom procesa
 - provesti stehiometrijsku procjenu potrebnog O_2 za izgaranje prema sastavu otpada
 - time se značajno smanjuje nastajanje štetnih nusprodukata
- **Temperature** spaljivanja se kreću od **850 do 1300 °C**, važno je da izgaranje bude na visokim temp. i što brže pri čemu nastaju minimalne količine dima i nusprodukata
- Materijali koji su pogodni za energetska uporabu: papir, guma, plastika, tekstil, drvo, koža
- Poželjne **svojstva otpada** koji se spaljuje su:
 - visoka energetska vrijednost - oslobađa se velika količina topline
 - niski sadržaj vlage
 - niski sadržaj zaostalog pepela

Energetska uporaba

Municipal waste treatment, EU, 1995-2020

(kg per capita)

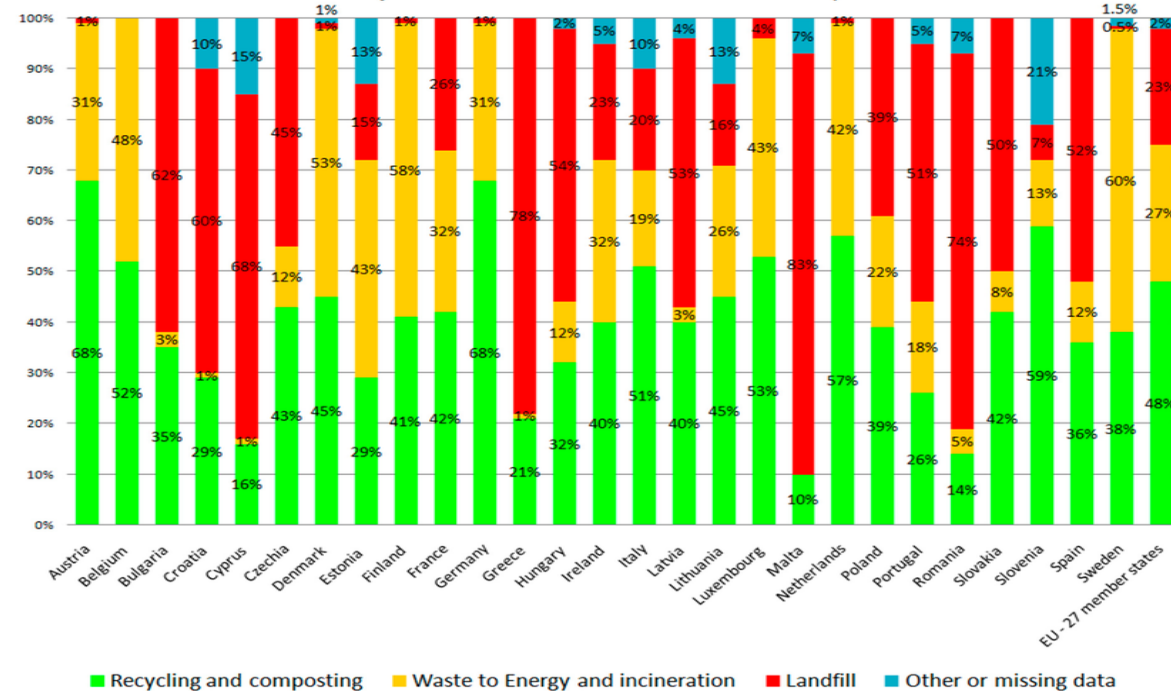


Note: estimated by Eurostat.

Source: Eurostat (online data code: env_wasmun)

eurostat

Municipal waste treatment in each EU member, 2020



Energetska uporaba

- Spalionice po kapacitetu se dijele na **velike za komunalne sustave** (veliki kapacitet - gradske, regionalne) te **manje, “šaržne” spalionice specijalnog otpada**
- Primjeri manjih spalionica su: spalionice medicinskog otpada (infektivnog i općenito medicinskog), spalionice industrijskog otpada, te spalionice animalnog otpada (otpad životinjskog podrijetla sa farmi) i sl.
- Mogu biti **mobilne** (sa opremom za neovisan rad na terenu) i **stacionarne**



Energetska uporaba

- Primjeri modernih spalionica



Beč (1971), 250.000 t/god,
120.000 MWh el.energ.,
500.000 MWh topline



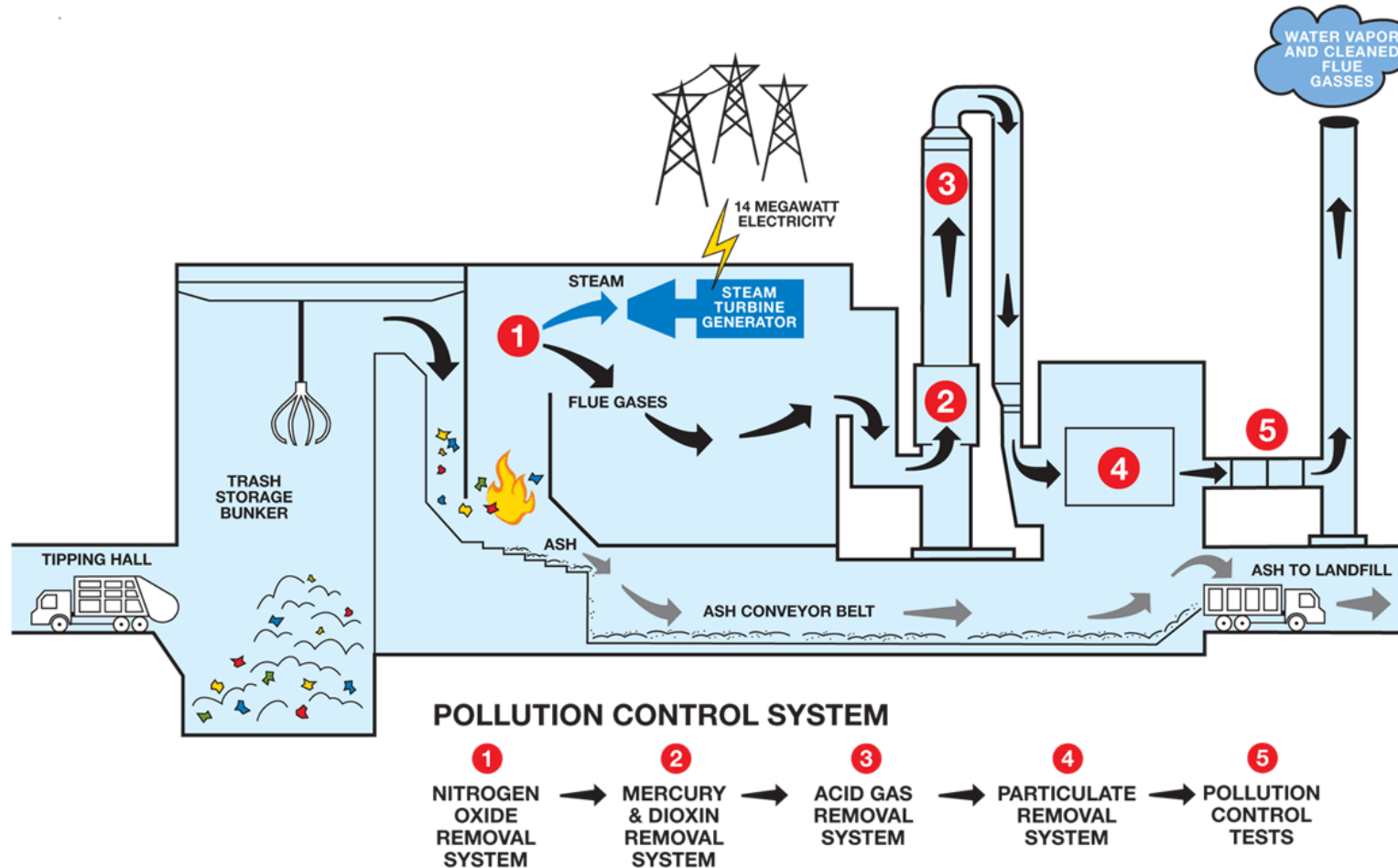
Kopenhagen (2017), 670 mil \$, 400.000 t/god, grijanje za 160.000,
el. energija za 62.500 kućanstava



Dublin (2017), 600.000 t/god, grijanje za 50.000, el.
energija za 80.000 kućanstava

Energetska uporaba

- Shematski prikaz sustava spaljivanja mase otpada (spaljivanja MSW)



Produkti procesa izgaranja:

- toplina
- plinovi/ toksični plinovi
- lebdeći pepeo
- donji pepeo

Energetska uporaba

- Spaljivanjem nastaju 2 kruta nusprodukta
 - **donji pepeo**
 - **lebdeći pepeo**
- **Donji pepeo** - punila (anorganski materijali), ne izgaraju spaljivanjem otpada
- **Lebdeći pepeo** - čestice pepela suspendirane u zraku, uklanja se opremom za pročišćavanje zraka
- Obje vrste pepela mogu sadržavati različite opasne tvari i neophodno ih je **analizirati prije** zbrinjavanja
- **Zbrinjavanje lebdećeg pepela** - miješanje s Ca(OH)_2 za proizvodnju cementa, zamjena za pijesak, glinu, šljunak ili vapnenac
- Smanjena potrošnja sirovina, manje emisije CO_2 , ušteda vode jer je prilikom upotrebe pepela potrebno manje vode za proizvodnju cementa
- **Zbrinjavanje donjeg pepela** - punilo za konstrukcijske primjene i nasipe, agregat za temelje cesta, podloge, kolnike i proizvode od lakog betona, kao sirovina u proizvodnji cementa

Energetska uporaba

- Pročiščavanje dimnih plinova
- Sustav kontrole onečišćenja plinovitih produkata spaljivanja koncipiran je u kontinuiranom slijedu pri čemu se otklanjaju:
 - Lebdeći pepeo
 - Ugljični oksidi (CO)
 - Sumporni oksidi (SO_x)
 - Dušični oksidi (NO_x)
 - Lako hlapivi organski spojevi (VOC, *volatile organic compounds*)
 - Postojani organski spojevi:
 - PCDD/PCDF (poliklorirani- dibenzo- p- dioksini/furani)
 - PAU (policiklički aromatski ugljikovodici)
 - HCB (heksaklorbenzen)
 - PCB (polikloriranibifenili)

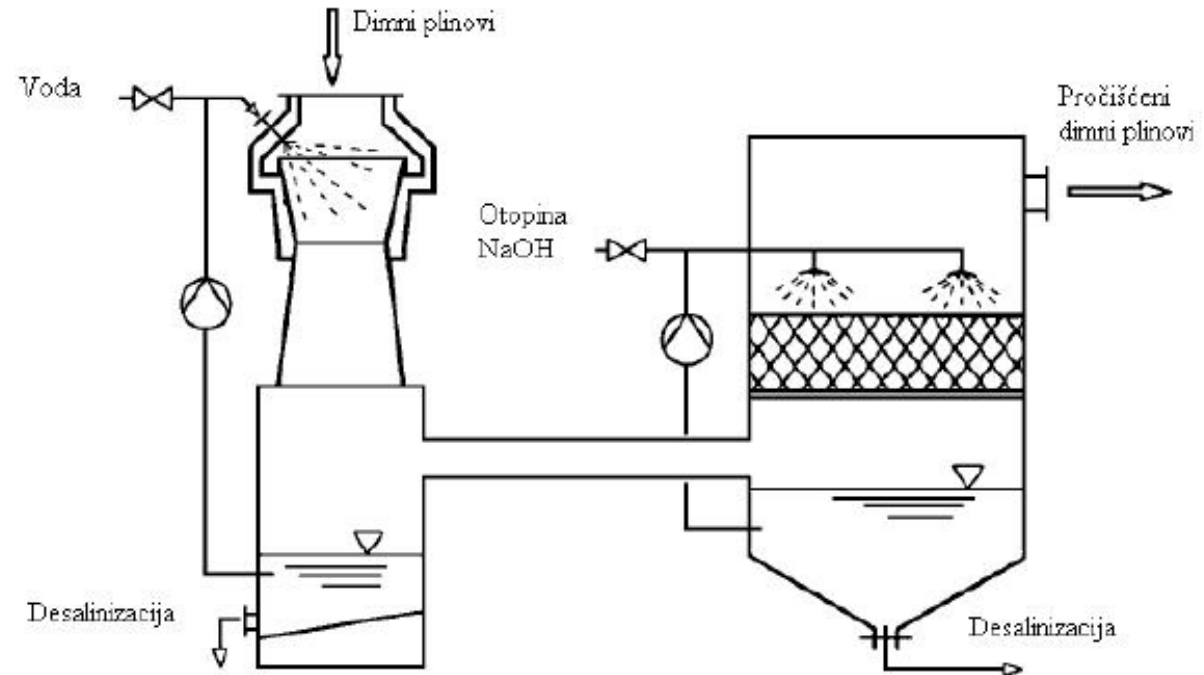
Energetska uporaba

- **Pročiščavanje dimnih plinova**
- Mokri, polusuhi i suhi postupak - za smanjivanje kiselih plinova (HCl , HF i SO_2)
- Elektrostatički i vrećasti filter - za otklanjanje prašine
- Selektivna katalitička i nekatalitička redukcija (SCR i SNCR) - za smanjivanje NO_x

Mokri postupak

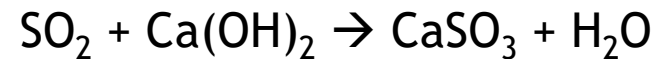
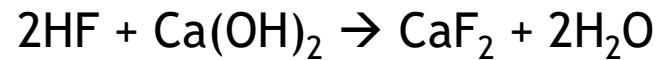
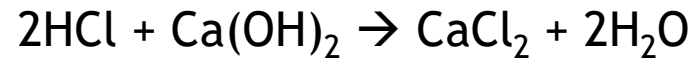
1. faza - odvajanje HCl i HF s vodom
pH 0-1

2. faza - odvajanje SO_2 dodatkom
 NaOH ili $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH oko 7



Energetska uporaba

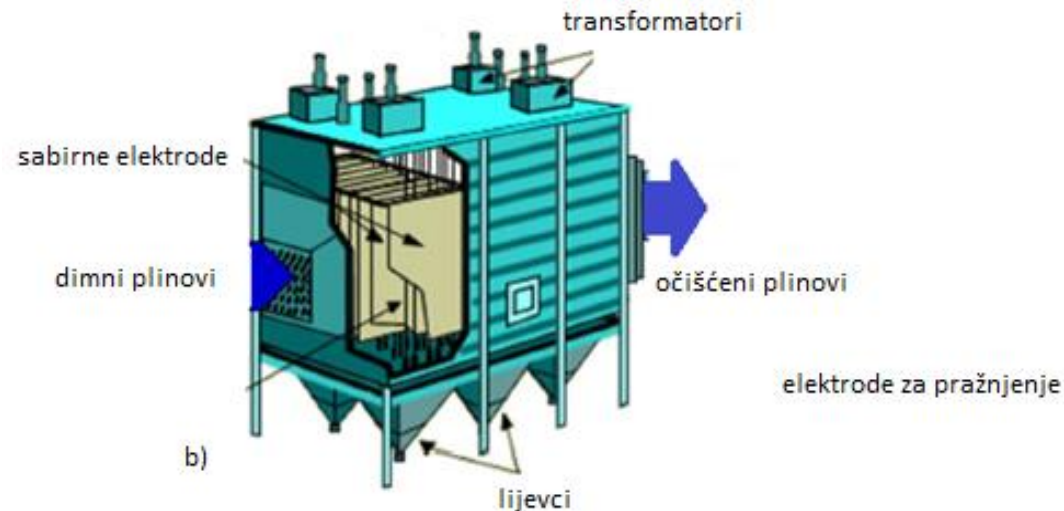
- **Pročišćavanje dimnih plinova**
- **Suhi postupak**
- Čišćenje kiselih tvari iz dimnih plinova suhim postupkom predstavlja najjednostavniji postupak u smislu korištene tehnologije
- **Kruti reagens, najčešće Ca(OH)_2 , ubacuje se izravno u dimne plinove kao fino mljeveni prah**



- **Polusuhi postupak**
- U ispirnom tornju, **lužnata otopina** (reagens) se **raspršuje** na način da se postigne što veća kontaktna površina između dimnih plinova i reagensa
- **Produkti reakcija su soli** koje napuštaju ispirni toranj (skruber) zajedno s pročišćenim dimnim plinovima
- Dimni plinovi se uvode u **elektrostatički ili vrećasti otprašivač**, gdje se **soli uklanjaju iz plinova**

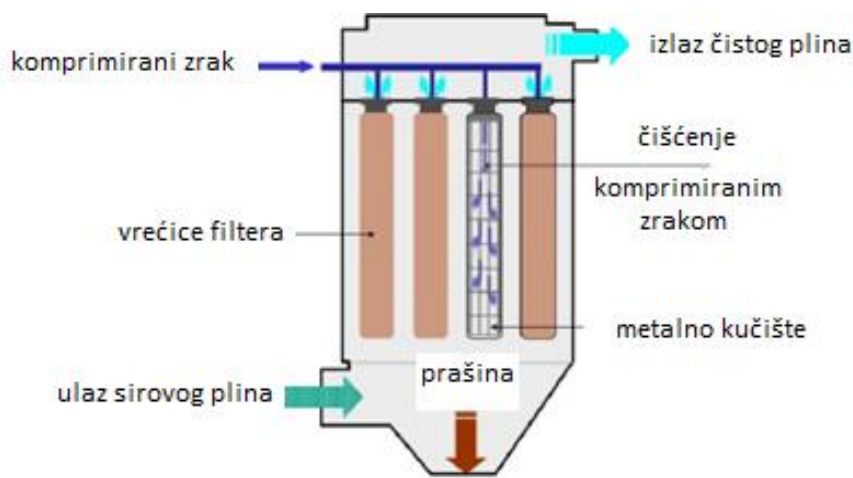
Energetska uporaba

- **Pročiščavanje dimnih plinova**
- **Elektrostatički otprašivač**
- Odvajanje čestica prašine zasniva se na **djelovanju elektrostatičke sile** u električnom polju
- Kako bi otprašivač mogao odvajati čestice, one moraju biti električki nabijene
- Nabijanje se vrši pomoću negativno nabijenih molekula zraka, koje se **vežu za česticu** te ju transportiraju do **pozitivno nabijene elektrode**, gdje se čestice izbijaju i gdje **nastaje sloj prašine**, koji se s vremenom mora **odstraniti vibriranjem elektrode**



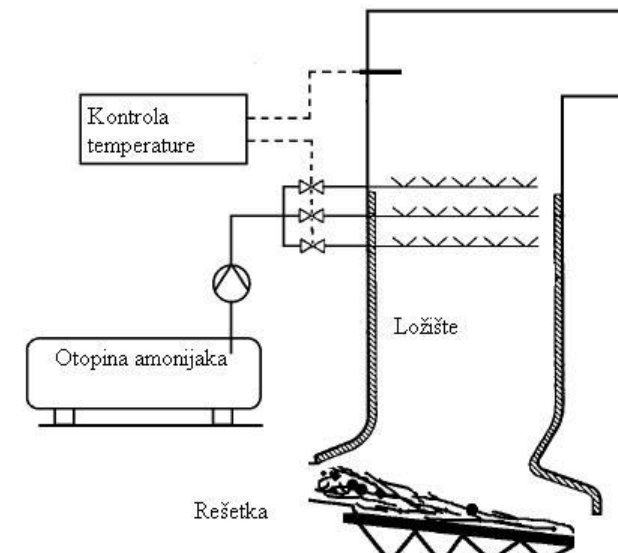
Energetska uporaba

- Pročišćavanje dimnih plinova
- Vrećasti filter
- Plinovi prolaze kroz filter koji sprječava prolazak čestica, te se one nakupljaju na površini filtera
- Ovo uzrokuje **pad tlaka na izlazu iz filtera** i zbog toga se filter mora redovito čistiti
- Pad tlaka u filteru koristi se kao indikator količine nataložene prašine
- Površina filtera može se čistiti trešnjom ili komprimiranim zrakom
- Komprimirani zrak se u kratkim impulsima upuhuje kroz filtersku površinu u smjeru suprotnom smjeru nastrujavanja dimnih plinova



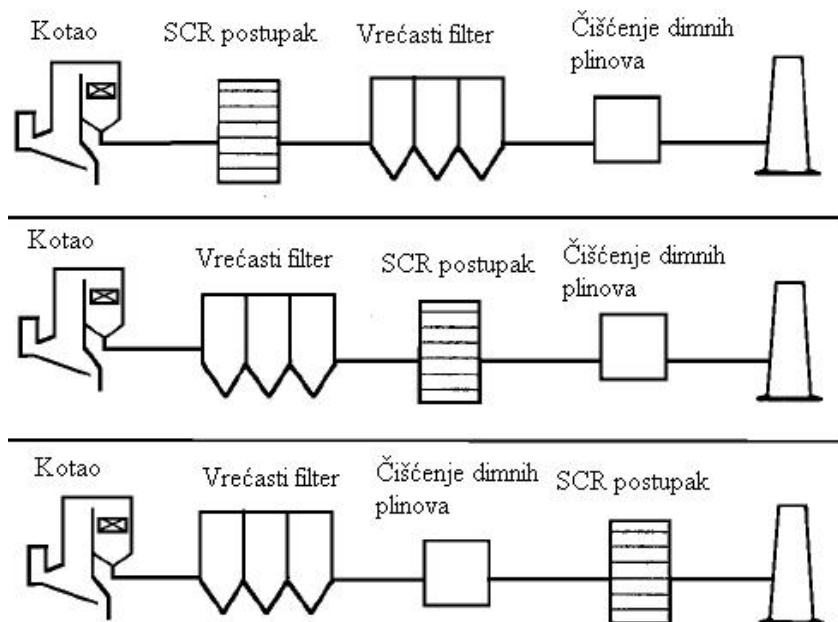
Energetska uporaba

- **Pročišćavanje dimnih plinova**
- **Selektivna katalitička i nekatalitička redukcija (SCR i SNCR)**
- **SNCR postupak**
- Odvija se u **gornjem dijelu ložišta** pri temperaturama **850-1000 °C**, gdje se ubrizgavanjem otopine amonijaka reduciraju dušikovi oksidi
- Nedostatak je **nepotpuna pretvorba reducensa (amonijaka)**, troši ga se više nego što bi bilo potrebno u idealnim uvjetima
- Nepotpuno pretvoreni amonijak odlazi nošen dimnim plinovima do postrojenja za čišćenje dimnih plinova, gdje se taloži u filterskoj prašini, te se kasnije oslobađa kao plin iz ostataka čišćenja dimnih plinova
- **Jeftinije od SCR postupka** uslijed manjih investicijskih, ali i pogonskih troškova



Energetska uporaba

- Pročiščavanje dimnih plinova
- *SCR postupak*
- Selektivna katalitička redukcija je katalitički proces pri kojem se **smjesa zraka i amonijaka (reducens)** u obliku plina ili vodene otopine dodaje smjesi **dimnih plinova** koji tada **prolaze kroz katalizator**
- Katalizator je obično porozan, načinjen od **Pt, Rh, TiO₂**
- Prolazeći kroz katalizator na oko 300 °C, amonijak reagira sa NO_x, te nastaje dušik i vodena para



Visoka temperatura, nije potrebno predgrijavanje, smanjena učinkovitost zbog visoke konc. metala i prašine

Potrebno predgrijavanje, sadrži kisele tvari koje umanjuju učinkovitost - nije preporučljivo

Najčešća pozicija, potrebno predgrijavanje za povećanje učinkovitosti

Energetska uporaba

- **Vrste spaljivanja prema konstrukciji ložišta**

1) Spaljivanje na rešetki

- Najstariji način toplinske obrade krutog otpada

- Otpad se kroz lijevak doprema do rešetke

- Rešetka je središnji dio postrojenja za spaljivanje otpada koje se sastoji još od opreme za:

- punjenje
- ložišta
- uređaja za dopremu zraka
- uređaja za odvođenje pepela

- Na početku procesa spaljivanja ložište se dodatno zagrijava s pomoćnim plamenicima budući da se uslijed ubacivanja “hladnog” otpada snižava radna temperatura



$T = 850-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

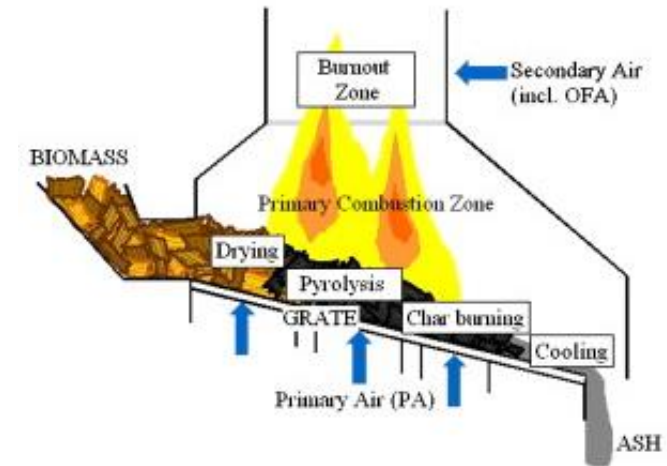
1. Lijevak za punjenje
2. Hranilica
3. Rešetka
4. Pražnjenje donjeg pepela
5. Ložište
6. Predgrijani zrak
7. Dovod primarnog zraka
8. Dovod sekundarnog zraka



Energetska uporaba

1) Spaljivanje na rešetki

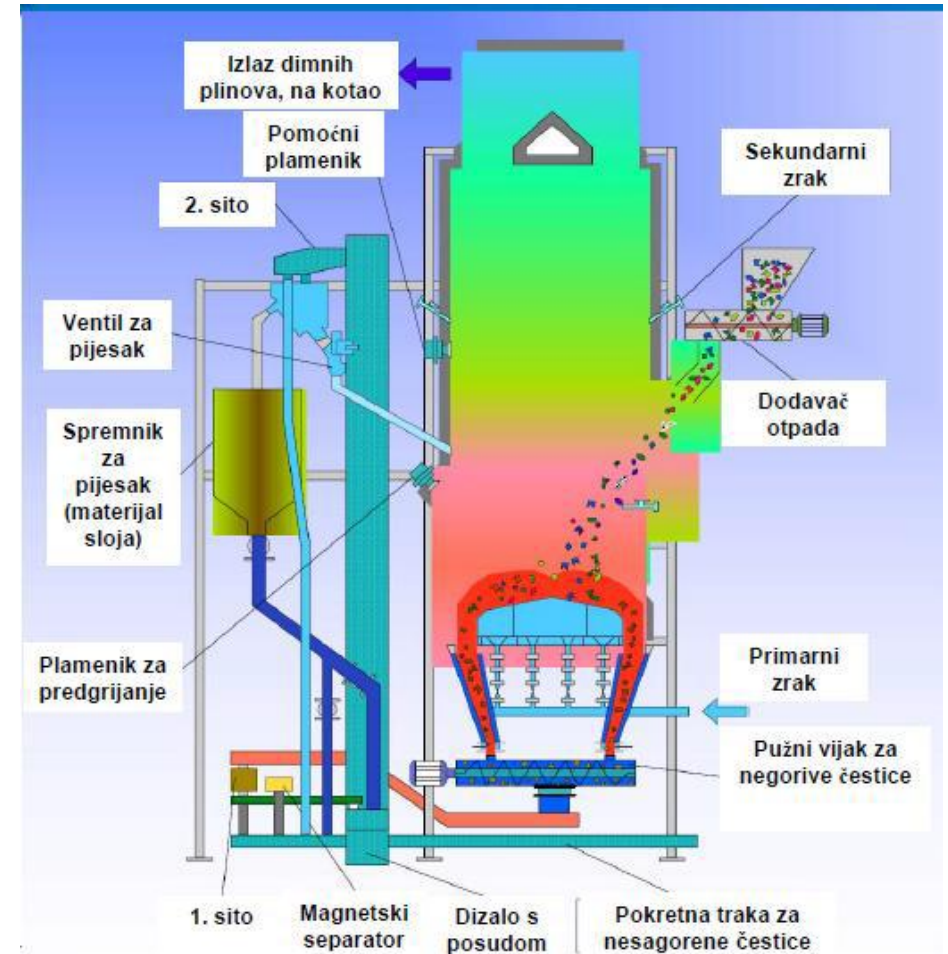
- Izgaranje otpada se odvija u nekoliko faza: **sušenje, paljenje, rasplinjavanje, glavno i naknadno izgaranje** gdje kruti ostaci izgaranja padaju prema dolje, a nastali dimni plinovi idu kroz ložište gore u kotao gdje predaju toplinu sustavu voda-para
- Zadaća **rešetke** je da **rasporedi otpad po širini** i da ga transportira po dužini rešetke i dovede potrebnu količinu zraka
- Iznad rešetke je komora za sagorijevanje u kojoj sagorijevaju plinovi prethodno razvijeni u procesu rasplinjavanja na rešetci
- Oslobođena energija sagorijevanja prenosi se na površinu kotla
- Pri procesu zrak se dovodi kao primarni i sekundarni
- **Primarni zrak se dovodi ispod rešetke**, gdje pri temperaturama od oko 230°C dolazi do zapaljenja otpada
- U rasponu temperatura od $230\text{-}850^{\circ}\text{C}$ dolazi do rasplinjavanja, na kraju se **sagorijevanje odvija na temperaturama većim od 850°C**
- Plinovi koji do tada nisu sagorjeli (npr. ugljični monoksid) odvoje se u **komoru za sagorijevanje** gdje zajedno sa sekundarnim zrakom sagorijevaju



Energetska uporaba

2) Spaljivanje u fluidiziranom sloju

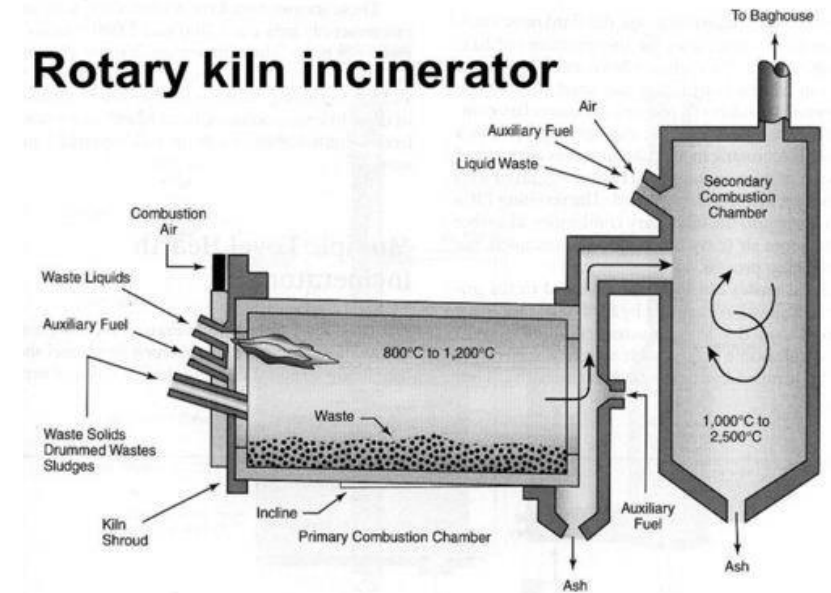
- Novija tehnologija u odnosu na rešetku
- U samom kotlu **otpad izgara i pretvara se u vrući granulirani sloj na pijesku**
- **Ubrizgavanje zraka** u tako nastali sloj stvara turbulencije i na taj način **pospješuje opskrbu svih dijelova goriva dovoljnom količinom kisika** i približavaju ovaj proces potpunom izgaranju
- Na ovaj je način moguće držati temperaturu iznad $970\text{ }^{\circ}\text{C}$ i znatno **smanjiti udio dušičnih spojeva u dimnim plinovima**
- Prednosti su postizanje vrlo visoke vrijednosti iskoristivosti kotla, i do 90 %, **manje emisije putem dimnih plinova u atmosferu**
- Viša cijena u odnosu na izgaranje na rešetci



Energetska uporaba

3) Spaljivanje u rotacijskoj peći

- Otpad se mehanički ili gravitacijski ubacuje u **cilindričnu peć pod kutom**, te se uz rotaciju peći **ostvaruje protok otpada kroz peć**
- Pomoću plamenika otpad koji prolazi kroz peć se spaljuje, nastali plinovi se filtriraju, proizvedena toplina se među ostalim koristi i za predgrijavanje otpada
- Ovaj postupak se **dosta koristi za spaljivanje opasnog otpada**, kliničkog otpada, **manje za komunalni otpad**, a takve peći se primarno primjenjuju u industriji cementa, vapna i gipsa
- Uobičajene temperature pri kojima se provodi izgaranje su 800-1200 °C
- Pri višim temperaturama povećava se rizik od stvaranja vapnenog taloga na stijenkama peći
- Prednosti su fleksibilnost u pogonu, relativno laka regulacija temperature, a posebno su **efikasne i ekonomične za srednje kapacitete**
- Nedostaci su **veliki pogonski troškovi** te nije primjenjivo za velika postrojenja



Energetska uporaba

4) Plazma spaljivanje

- Odvija se kod iznimno visokih temperatura od 2.200 do 13.900 °C
- Plazma je naziv za ionizirani plin i uobičajeno je da se zbog različitih svojstava u odnosu na krutine, tekućine i plinove smatra posebnim agregatnim stanjem tvari
- Zbog visokih temperatura prikladna za spaljivanje biomedicinskog i opasnog otpada
- **Produkti su sintetski plin (CO i H₂) i šljaka.** Velika količina anorganskih tvari u MSW povećava udio šljake
- Prednost - **čisto uništavanje opasnog otpada**, šljaka se može koristiti kao konstrukcijski materijal, dobivanje sintetskog plina
- Nedostatak - **visoki investicijski i pogonski troškovi**, niska ili čak negativna energetska bilanca



Energetska uporaba

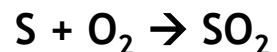
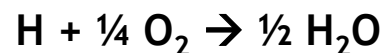
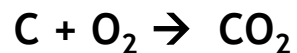
- **Primjer** - Procjena količine kisika potrebnog za izgaranje
- Izračunavanje potrebnog kisika za spaljivanje suhog MSW uz potpuno izgaranje
- Sastav MSW:
 - 60 mas.% papir, 30 mas.% miješana plastika, 10 mas.% tekstil
- **Zadatak:** Odrediti volumen zraka (u L) na temp. 20 °C i tlaku 1 atm potrebnog za izgaranje 1 kg gore definiranog otpada
- **Rješenje**
- **Molovi C, H, S i O u otpadu** su određeni na osnovi procjene sadržaja, postotaka C, H, S, i O u papiru, plastici i tekstilu u MSW (kemijska i fizikalna svojstva otpada, ranije predavanje)

	C %	H %	S %	O %
Papir	43	5,8	0,2	44,3
Plastika	60	7,2	0,1	22,8
Tekstil	48	6,4	0,2	40

Energetska uporaba

	Suha masa otpada, (g)	mol C	mol H	mol S	mol O
Papir (miješani)	600	21,7	34,8	0,038	16,6
Plastika (miješana)	300	15,0	21,6	<0,01	4,3
Tekstil	100	4,0	6,4	0,006	2,5
Ukupno	1.000	40,7	62,8	0,05	23,4

- Izračunavanje molova O_2 potrebnog za izgaranje C, H i S određuje se prema kemijskim reakcijama:



- Potrebni mol O_2 za izgaranje i nastajanje gornjih produkata su 1, $\frac{1}{4}$ i 1 mol O
- Pretpostavlja se da O_2 iz otpada odgovara 1/2 ukupno potrebnog kisika, stoga se potrebna konc. O_2 izračuna prema jednadžbi**

Energetska uporaba

	Suha masa otpada, (g)	Mol C	Mol H	Mol S	Mol O ₂
Papir (miješani)	600	21,7	34,8	0,038	16,6
Plastika (miješana)	300	15,0	21,6	<0,01	4,3
Tekstil	100	4,0	6,4	0,006	2,5
Ukupno	1.000	40,7	62,8	0,05	23,4

$$\left(40,7 \text{ mol C} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{\text{mol C}}\right) + \left(62,8 \text{ mol H} \times \frac{0,25 \text{ mol O}_2}{\text{mol H}}\right) + \left(0,05 \text{ mol S} \times \frac{1 \text{ mol O}_2}{\text{mol S}}\right) - \left(23,4 \text{ mol O} \times \frac{0,5 \text{ mol O}_2}{\text{mol O}}\right) = 44,8 \text{ mol O}_2$$

- Molovi O₂ se pretvaraju u litre pomoću opće plinske jednačbe, a potom se izračunaju litre zraka
- Rješenja su:
- V(O₂) = **1,077 L O₂ / kg otpada**
- V(zraka)= **5,22 L zraka / kg otpada**

ODLAGALIŠTA KRUTOG OTPADA

- **Odlagalište otpada** (*deponija*) je građevina namijenjena za trajno odlaganje otpada, kao organizirane komunalne djelatnosti. U sklopu odlagališta otpada mogu se nalaze i građevine za skladištenje te obrađivanje otpada
 - Odlagališta su grupirana prema kategorijama, odnosno pravnom statusu, veličini, vrstama odloženog otpada, stanju aktivnosti, utjecaju na okoliš i opremljenosti
- 1) **Legalna odlagališta** - za (trajno) odlaganje otpada, predviđene odgovarajućim prostorno-planskim dokumentima i sagrađene u skladu s važećim propisima
 - 2) **U postupku legalizacije** - za (trajno) odlaganje otpada, predviđene odgovarajućim prostorno-planskim dokumentima za koja je započeo, ali još nije dovršen postupak procjene utjecaja na okoliš i ishodenje potrebnih dozvola
 - 3) **Službena odlagališta** - veći neuređeni prostori za (trajno) odlaganje otpada, predviđeni odgovarajućim prostorno-planskim dokumentima, za koja nije proveden postupak procjene utjecaja na okoliš niti raspolažu ijednom od neophodnih dozvola
 - 4) **Dogovorna odlagališta** - neuređeni manji prostori za odlaganje otpada koji nisu predviđeni odgovarajućim prostorno-planskim dokumentima i za koje nije proveden postupak procjene utjecaja na okoliš. Ne raspolažu nijednom od neophodnih dozvola, ali djeluju uz znanje ili u dogovoru s nadležnim tijelom
 - 5) **„Divlja” odlagališta** - manji neuređeni prostori koji nisu predviđeni za odlaganje otpada, a formirali su ih najčešće građani bez prethodnog znanja tijela lokalne samouprave

Odlagališta krutog otpada

- Jakuševac sanacija

Do 1994.



1995.



1997.



Nekad u budućnosti...



2007.



1997.



Odlagališta krutog otpada

2002



2008



2021



Odlagališta krutog otpada

Odron 2023.

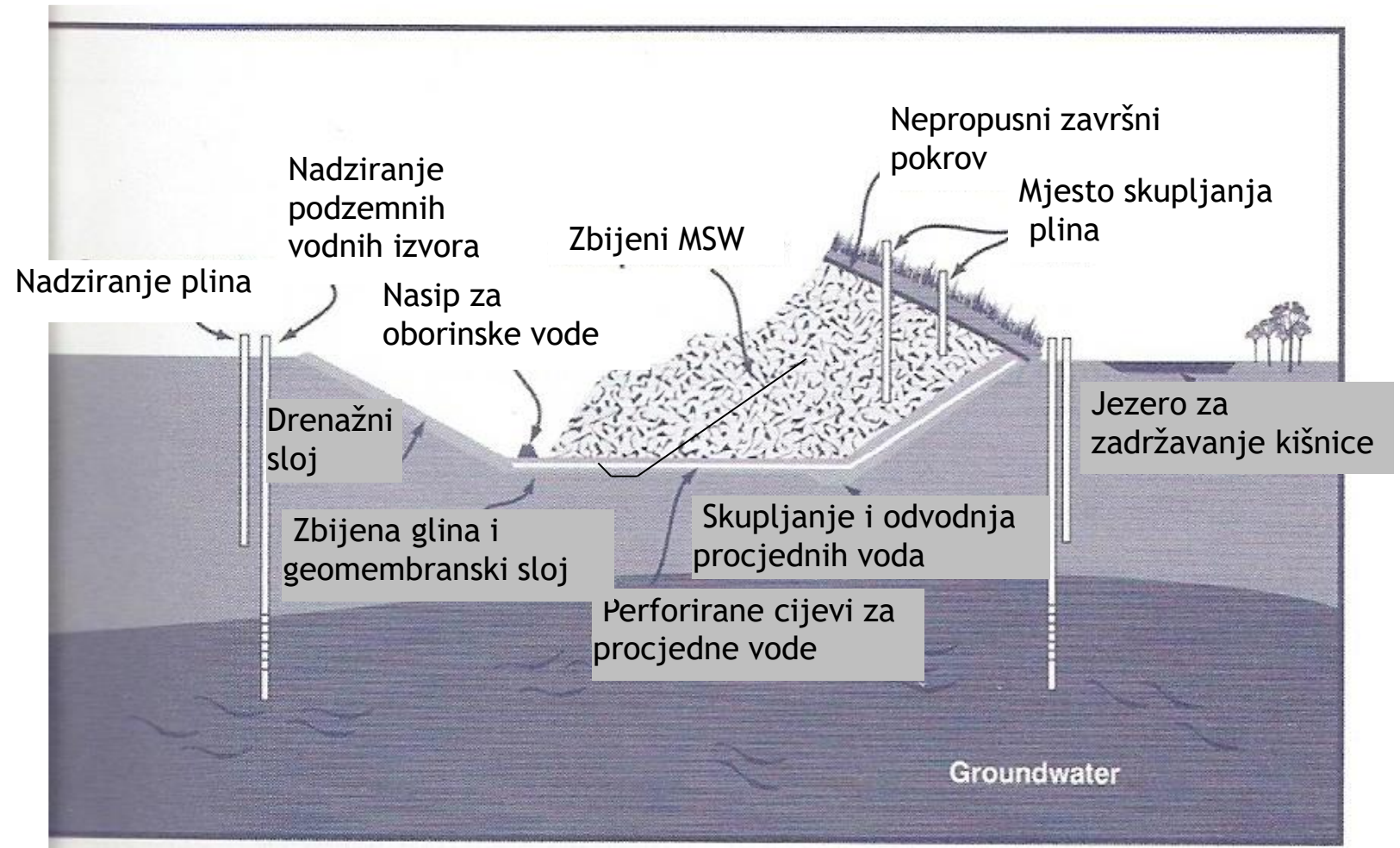


Odlagališta krutog otpada

- Moderna odlagališta su suvremeno tehnički opremljeni objekti s **ugrađenim sustavima za zaštitu okoliša**

Presjek modernog odlagališta

1. “bazen” odlagališta
2. geomembranski sloj
3. drenažni sloj
4. završni - pokrovni sloj
5. sustav za skupljanje procjednih voda
6. sustav za skupljanje plina
7. sustav za nadzor podzemnih voda
8. sustav za nadzor plina



Odlagališta krutog otpada

- Na odlagalištima otpad se zbija i **odlaže kao krutina**, svakodnevno se prekriva slojem zemlje uz ograničeni pristup vode i zraka
- Na taj način se na odlagalištima sprječava neugodan miris, požari, pristup grabežljivcima, insektima, kontrolira se nastajanje **plinova** (metan, CO₂) te **procjednih voda** (filtrata, *leachate*)
- U otpadu se biološki materijali razlažu (degradiraju) i pri tome se nekontrolirano odvija niz bioloških i kemijskih reakcija. Materijali se razlažu i pretvaraju u nisko molekularne **tekućine, plinove ili krutine**
- Neke se tvari kao što su ostaci voća i povrća brzo razgrađuju, a neke kao npr. papir i drvo se razgrađuju i nekoliko desetaka godina
- **Oborine i voda** iz vlažnih dijelova otpada dodatno potiču biološku razgradnju, ali i **ispiranje teških metala i organskih otrova** i tvari iz otpada nastaju **kontaminirane procjedne vode**
- S vremenom razlaganja otpada nastaje **anaerobno** okruženje koje omogućuje **nastajanje metana**

Odlagališta krutog otpada

Lokacija odlagališta

- **Odlagališta je potrebno** smjestiti tamo gdje je rizik od opasnosti za **okoliš i društvo najmanji**, tako da rizik bude minimalan i u slučaju:
 - loše projektiranog
 - loše izgrađenog
 - loše vođenog odlagališta
 - u slučaju elementarnih nepogoda
- Negativni aspekti i utjecaji odlagališta na društvo i okoliš uvijek postoje i neophodno ih je razmotriti prije odabira lokacije za odlagalište
- Smještaj odlagališta je društveno i pravno pitanje i uloga projektanata je da prikupe i daju na uvid sve podatke za analizu radi donošenja nepristrane odluke

Odlagališta krutog otpada

- Činjenice koje je potrebno razmotriti prije donošenja odluke o **lokaciji odlagališta**

Specifičnosti pojedinih lokacija koje treba izbjegavati

- poplavna područja
- geološki aktivna područja
- područja sklona klizanju i eroziji
- močvarna područja
- područja s značajnim eko sustavima i velikom biološkom raznovrsnošću
- područja od kulturnog i arheološkog značaja
- slivna područja pitkih voda

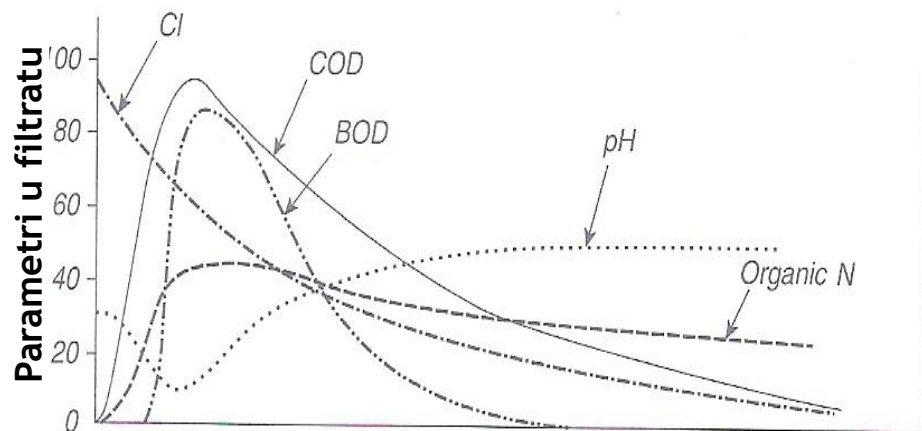
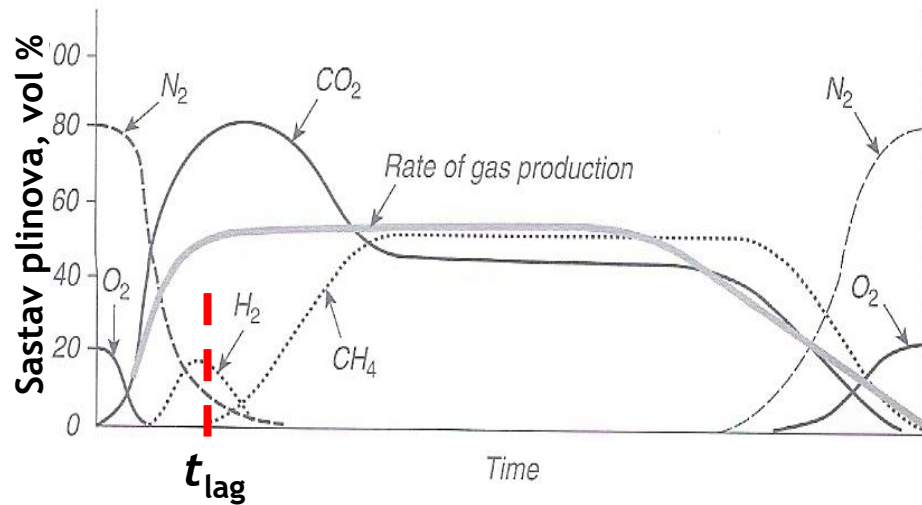
Ostale činjenice koje treba razmotriti

- minimalna cijena transporta otpada - tako da je odlagalište blizu centra generatora otpada
- minimalna cijena izgradnje i dovođenja infrastrukture za odlagalište (ceste, sustav pročišćavanja otpadnih voda)
- utvrditi da li je odabrana lokacija izložena ekstremnom vjetru i kiši
- utvrditi da li lokacija sadrži dovoljno zemlje koja se može upotrijebiti tijekom odlaganja otpada
- prilagoditi odabranu lokaciju krajnjim korisnicima odlagališta (lokalne zajednice-upotreba plina)

Odlagališta krutog otpada

- Razlaganje otpada na odlagalištu

- Otpad koji se odlaže na odlagalište, tj. biootpad podliježe nizu međusobno povezanih kemijskih i bioloških reakcija koje čine niz procesa biokemijskog razlaganja, nastaju nisko molekularne tvari (CO_2 , CH_4 , H_2O , kompost), koje se mijenjaju ovisnosti o vremenu razlaganja otpada



t_{lag} = početno vrijeme nastajanja CH_4

- U ranoj fazi razlaganja, dolazi do **potrošnje kisika** pri čemu nastaju produkti CO_2 i organske kiseline koje snižavaju pH procjednih voda (povećava se kiselost)
- Porast potrošnje kisika** kod procjednih voda mjeri se određivanjem KPK (COD) i BPK (BOD), u ranoj fazi razgradnje kada se organske tvari pretvaraju u tekuću fazu
- U kasnijoj fazi, nakon što je potrošen sav kisik, nastaje anaerobno okruženje, *mikroorganizmi* tada pretvaraju organske kiseline (BPK sadržaj) u metan

Odlagališta krutog otpada

- **Razlaganje otpada na odlagalištu**
- **Nastankom metana**, procjedne vode sadrže niže konc. onečišćenja budući da se **otopljene razgrađene tvari pretvaraju u plinsku fazu** ujedno se smanjuje volumen procjednih voda
- Vrijeme potrebno da se postignu optimalni uvjeti za nastajanje metana može varirati od 1 do 2 godine, pa sve do 20 godina
- Postoji mogućnost da nikada ne dođe do nastajanja metana ukoliko nisu povoljni biološki uvjeti
- Razlog ne nastajanja CH_4 može biti u prisutnosti:
 - kemijskih inhibitora (različita onečišćenja) u otpadu
 - dotoku većih količina kisika zbog loše projektiranog i izgrađenog odlagališta
- U fazi nastajanja metana plin se sastoji od približno 50 % metana i 50 % CO_2

Odlagališta krutog otpada

- **Razlaganje otpada na odlagalištu**
- U krajnjoj fazi razlaganja neophodno je **procjedne vode** sakupljati, obraditi / pročistiti
- Ovako nastale **procjedne vode imaju veći BPK nego otpadne vode iz kanalizacijskog sustava** i mogu biti opasne kao i mnoge visoko onečišćene industrijske otpadne vode
- Izdvajanje opasnog otpada iz komunalnog otpada na odlagalištu povećava nastajanje metana i smanjuje koncentracija opasnih tvari
- Nastajanje metana je značajno jer određuje kvalitetu procjedne vode budući da se **nastankom metana smanjuje koncentracija organskih tvari u procjednim vodama**, vidljivo iz smanjenih vrijednosti KPK i BPK
- Razvijanje metana nosi rizike:
 - eksplozija (5-15 % metana u mješavini sa zrakom je zapaljiva)
 - neugodni miris, utjecaj na ljudsko zdravlje, pogotovo radnika na odlagalištu
 - snažni staklenički plin (25 puta snažniji nego CO₂)
- Moguće je iskorištavanje metana za dobivanje energije
 - Los Angeles - 63 MW elektrana, Toronto - 33 MW

Odlagališta krutog otpada

- **Razlaganje otpada na odlagalištu**
- **Nastajanje plinova** na odlagalištu uzrokuje **nastajanje povećanih tlakova** koji uzrokuju njihovo **strujanje**
- Plin se mora kontrolirano izdvajati inače dolazi do njegovog nakupljanja i izbijanja, što može uzrokovati požar, eksploziju, trovanje i razaranja brtvenih slojeva, što obično dovodi do prodiranja oborinskih vode, povećavanja količine filtrata i daljnjeg onečišćenja okoliša
- Potpuno hvatanje, tj. kontrolirano skupljanje plinova zahtijeva:
 - ugradnju bušotina za plinove
 - ugradnju pumpi
 - cjevovoda za njihovu odvodnju
- **Postoje dva načina otplinjavanja - pasivni i aktivni**
- **Pasivni način** otplinjavanja podrazumijeva iskorištavanje vlastitog tlaka plina u tijelu odlagališta
- Održavanje ovakvog sustava je jednostavno, ali se postiže mali koeficijent obuhvata plina, nužan veći broj plinodrenažnih zdenaca

Odlagališta krutog otpada

- **Razlaganje otpada na odlagalištu**
- **Aktivni način otplinjavanja** je postupak isisavanja plina iz tijela odlagališta održavanjem podtlaka (5-15 kPa)
- Time se ne samo podržava izdvajanje plina već i ustaljuje proces biorazgradnje otpada
- Da bi proces funkcionirao bez zastoja, mora se osigurati
 - održavanje djelotvornog potlaka u odlagalištu
 - funkcioniranje za vrijeme aktivnog iskorištavanja plina ali i nakon zatvaranja odlagališta - pouzdanost sustava kroz duže vrijeme
 - dinamičko prilagođavanje kapaciteta otplinjavanja proizvodnji plina
- **Suvremena odlagališta mogu hvatati i više od 90 % nastalih plinova**, dobiveni plinovi se iskorištavaju za proizvodnju električne i toplinske energije
- Iz **1 tone kućnog biootpada** nastane $200 \times 10^6 \text{ m}^3$ odlagališnog plina, dostatnog za proizvodnju **200 kWh električne ili 400 kWh toplinske energije**
- Čak i kad se plinovi ne skupljaju za dobivanje energije potrebno ih je **spaliti** da se smanji njihov štetan utjecaj na okoliš

Odlagališta krutog otpada

- Razlaganje otpada na odlagalištu
- Odlagališne procjedne vode
- Uz stalne kontrole i nadzor na odlagalištima minimizira se dotok vode na odlagališta, dio vode ipak dotiče i stvaraju se procjedne vode
- Procjedne vode iznimno su onečišćene produktima biološke i kemijske razgradnje biootpada, različitim organskim otrovima i teškim metalima
- Tamnosmeđe boje su, neugodnog mirisa, zapravo su koncentrat svih ocijeđenih onečišćenja iz odlagališta otpada - nužna je stalna kontrola
- Koncentracija tvari u procjednim vodama značajno varira s obzirom na lokaciju i starost odlagališta

Odlagališta krutog otpada

- Razlaganje otpada na odlagalištu
- Odlagališne procjedne vode
- Tipične koncentracije i parametri onečišćenja za **ново** i **staro odlagalište**

	Jedinica	Konc. novog odlagališta	Konc. starog odlagališta
BOD	mg/L	10.000	100
COD	mg/L	18.000	300
Org. N ₂	mg/L (N ₂)	200	100
Alkalinitet	mg/L (CaCO ₃)	3.000	500
pH	-	6	7
Tvrdoća	mg/L (CaCO ₃)	3.500	300
Kloridi	mg/L	500	200

- Koncentracije tvari u filtratu kod **novog** odlagališta **znatno više** od onih kod starog, budući da se tvari s vremenom razlažu dalje u plinove i tako nestaju

Odlagališta krutog otpada

- **Razlaganje otpada na odlagalištu**
- **Odlagališne procjedne vode**
- U procjednim vodama odlagališta otpada uglavnom se nalaze:
 - **Spojevi s dušikom** - u organski vezanom obliku ili u obliku amonijaka, predstavljaju najveći postotak organskih spojeva u procjednim vodama odlagališta otpada i nastaju biorazgradnjom prisutnih organskih tvari. Dušik u nitratnom obliku troši se u aerobnim uvjetima i zato je prisutan u niskim koncentracijama
 - **Spojevi s fosforom** - uključeni su u fizikalne, kemijske i mikrobiološke transformacije. Topljivost im ovisi o pH vrijednosti i prisutni su u malim koncentracijama
 - **Teški metali** - javljaju se određene koncentracije Al, As, Ba, Fe, Cd, Co, Ag, Pb i Hg
 - **Kationi** - najčešći kationi koji se javljaju su Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} Reagiraju jedni s drugima i s kationima iz otpada stvarajući komplekse
 - **Anioni** - Cl^- , SO_4^{2-} , S^{2-} i HCO_3^- se samo djelomično transformiraju
 - **Organsko onečišćenje**
 - **Klorirani ugljikovodici i pesticidi**
 - **Specifični organski spojevi:** aromatski ugljikovodici, fenoli, klorirani alifatski spojevi koji se obično nalaze u tragovima

Odlagališta krutog otpada

- **Razlaganje otpada na odlagalištu**
- **Upravljanje procjednim vodama**
- Upravljanje procjednim vodama zahtijeva izgradnju nekoliko podsustava:
 - 1) **Brtveni slojevi** (hidro barijera) sprječava otjecanje procjednih voda, ali i dotjecanje kišnice na odlagalište
 - 2) **Sustav za skupljanje i odvodnju filtrata** s odlagališta
 - 3) **Sustav za obradu procjednih voda**
- 1) **Brtveni slojevi**
 - glina i mješavina gline s drugim materijalima kao prirodni nepropusni materijal
 - geomembrane (geosintetika, geotekstil, geomreže): EPDM guma, polietilen, poli(vinil-klorid)
- Brtveni slojevi smanjuju volumen procjednih voda i do 1000x
- Da bi se to postiglo potrebno je iznimno kvalitetno izgraditi brtvene slojeve

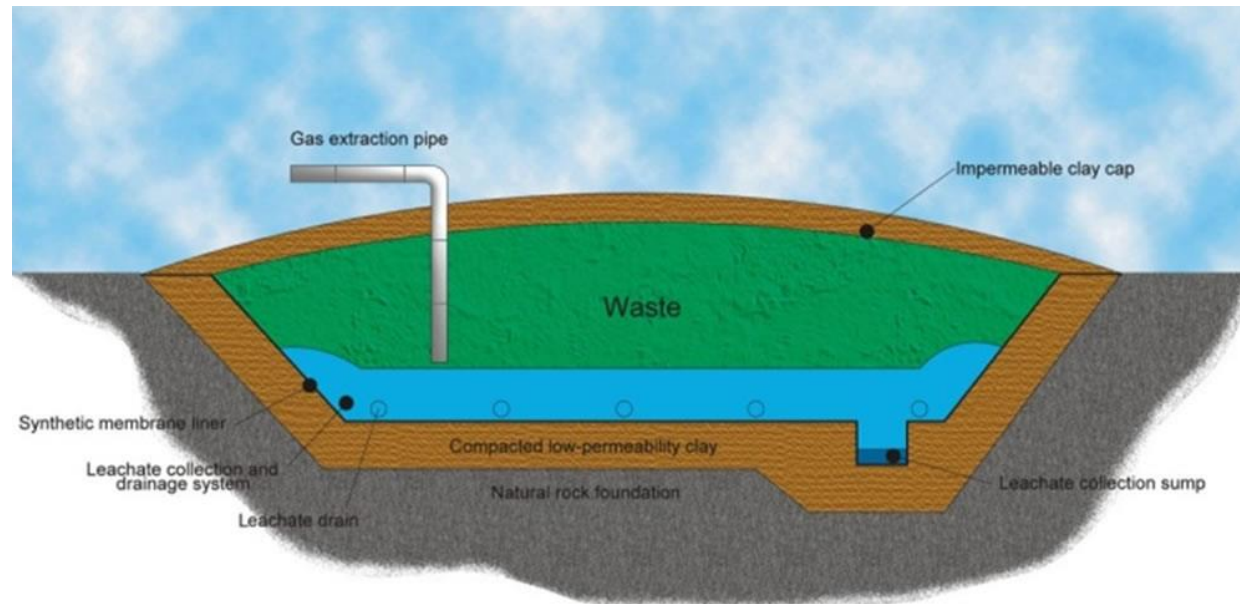


Odlagališta krutog otpada

- Razlaganje otpada na odlagalištu
- Upravljanje procjednim vodama

2) Sustav skupljanja procjednih voda

- smješta se na samo dno odlagališta, tj. iznad barijere podnožja
- sustav se sastoji od šljunka (drenažni sloj) i **perforiranih cijevi** čime se osigurava brzo odvođenje procjednih voda i nekontrolirano otjecanje s odlagališta
- **skupljene procjedne vode** pumpanjem se odvođe s odlagališta u **spremište** iz kojeg se dalje odvođe do sustava za pročišćavanje



Odlagališta krutog otpada

- **Razlaganje otpada na odlagalištu**
- **Upravljanje procjednim vodama**

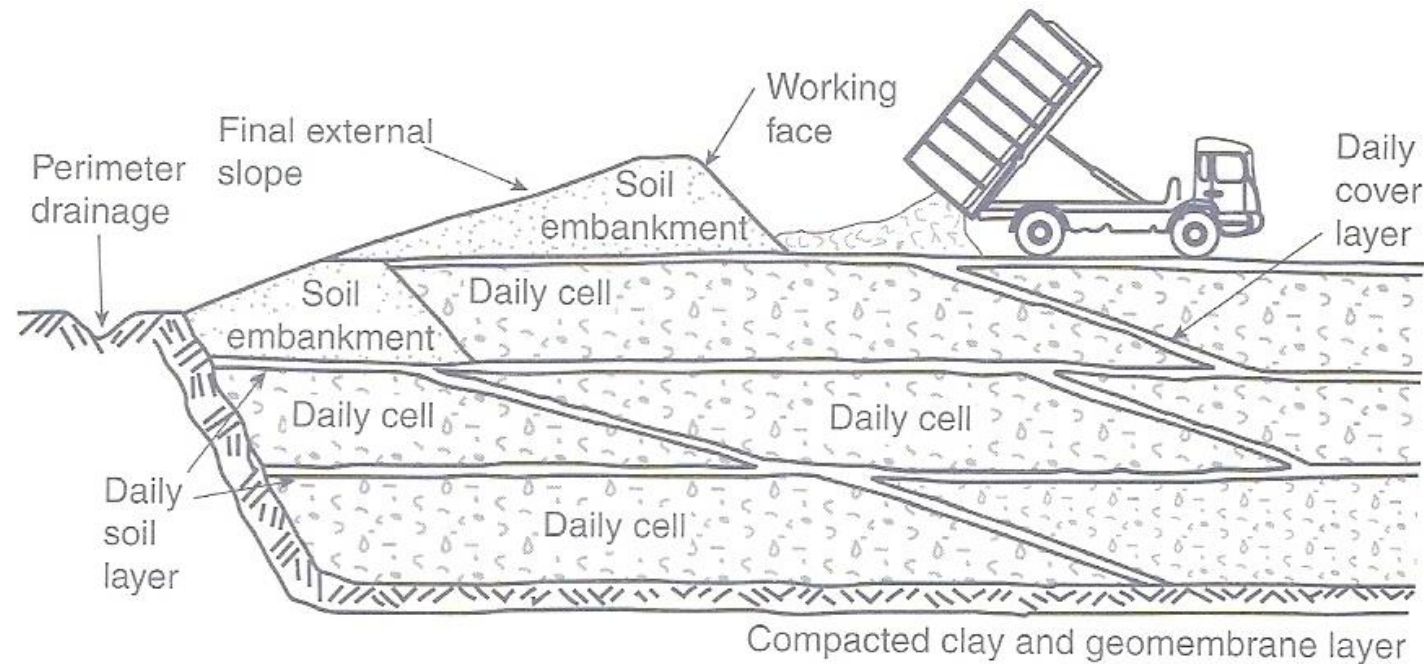
3) Sustav za obradu procjednih voda

- može biti izgrađen na odlagalištu ili se može cijevima odvoditi do komunalnog ili industrijskog sustav za obradu otpadnih voda budući da procjedne vode s odlagališta imaju puno sličnosti s onečišćenim komunalnim/industrijskim vodama
 - odabir sustava za obradu otpadnih voda ovisi o svojstvima procjednih voda, o utjecaju na okoliš uslijed ispuštanja nakon obrade i cijeni sustava za odvodnju u već izgrađeni sustav
-
- **Metode obrade procjednih voda**
 - Biološke metode pročišćavanja procjednih voda (aerobne - aktivni mulj, anaerobne)
 - Fizikalno-kemijske metode (flotacija, flokulacija, adsorpcija)
 - Napredne metode (membranske metode, elektrokemijske metode - elektrokoagulacija, elektroflotacija)

Odlagališta krutog otpada

- Projektiranje odlagališta

- Odlagalište se projektira kao **serija dnevnih komora** gdje se dnevni **otpad zbija i pokriva**
- Odlaganje i zbijanje otpada započinje uz rubove odlagališta prema centru odlagališta, a **horizontalni sloj dnevnih komora** naziva se „**kat**“ (eng. lift)



Broj mogućih katova ovisi:

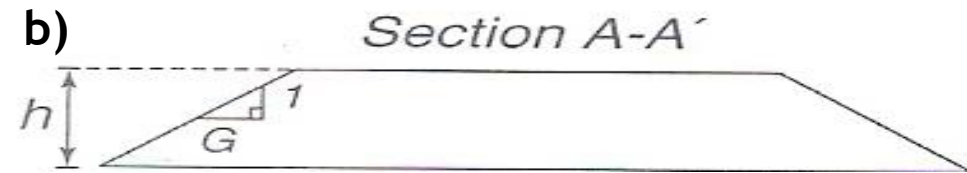
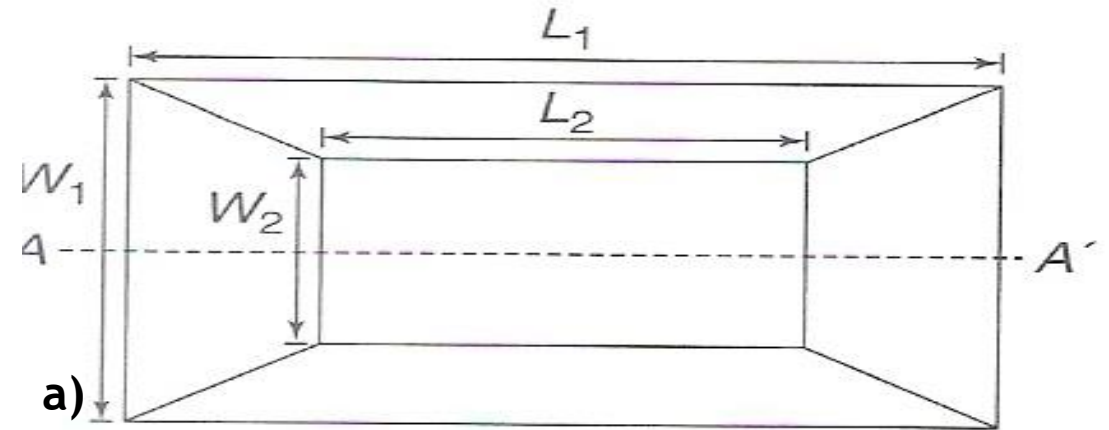
- o topografiji
- o položaju
- o planiranom kapacitetu odlagališta

konstrukcija odlagališta s dnevnim komorama i „katovima“

Odlagališta krutog otpada

- **Projektiranje odlagališta**

- Dva osnovna i najvažnija uvjeta kod projektiranja su:
 - površina
 - volumen „bazena“ odlagališta
- Površina odlagališta mora biti relativno ravna i čim veća što znatno doprinosi povećanju konačnog kapaciteta
- Stalno podizanje slojeva ne smije biti previsoko i mora biti stabilno što se postiže izgradnjom odlagališta u obliku **pravokutne krnje piramide**, kao na slici



- Geometrija površine odlagališta:

- a) tlocrt dna i pokrov
- b) bočni presjek

L - dužina odlagališta
 W - širina odlagališta
 G - nagib krnje piramide

Odlagališta krutog otpada

- **Projektiranje odlagališta**
- **Volumen odlagališta** prikazanog na slici definiran je jednažbom

$$V = \frac{h}{3} \{L_1 W_1 + [(L_1 - 2Gh)(W_1 - 2Gh)] + \sqrt{L_1 W_1 (L_1 - 2Gh)(W_1 - 2Gh)}\}$$

- gdje je G nagib krnje piramide i definiran je kao:

$$G = 0,5 \times [L_1 - L_2]/h$$

- Jednažbom se izračunava maksimalni volumen odlagališta koji se dobiva **iskopavanjem zemlje** koja kasnije služi za **dnevni pokrov**
- **Ukupni volumen odlagališta** čine volumeni **dnevnih komora** i **dnevni pokrovni sloj**
- Tipična debljina dnevnog pokrova zemlje (T) je 20 cm, a **volumen dnevne komore** V_s se izračuna prema jednažbi:

$$\frac{V_s}{V_r} = \left[\left(1 + \frac{T}{H}\right) \times \left(1 + \frac{G \times T}{L}\right) \times \left(1 + \frac{G \times T}{W}\right) \right] - 1$$

- gdje je V_r volumen dnevnog otpada, G nagib dnevne komore, H visina, L dužina i W širina dnevne komore

Odlagališta krutog otpada

- **Projektiranje odlagališta**

- **Radna površina na odlagalištu** ovisi o broju kamiona koji rade istovremeno na odlagalištu, površina mora biti dovoljno velika za njihov siguran rad
- **Radna površina** se projektira na osnovi:
 - količine dnevnog otpada (*npr. 1000 t/dan*)
 - veličine kamiona koji rade, prema jednadžbi

$$\frac{1000 \text{ t}}{\text{dan}} \times \frac{1 \text{ kamion}}{8 \text{ t}} \times \frac{1 \text{ dan}}{6 \text{ h rada}} \times \frac{6 \text{ m}}{\text{kamion}} \times \frac{0,167 \text{ h istovar}}{\text{kamion}} = 21 \text{ m}$$

- 6 m udaljenost između kamiona

- U jednadžbi je predviđeno da je **6 m udaljenosti između kamiona** dovoljno za siguran rad
- **Duljina radne površine od 21 m** omogućuje istovremeno rad **3,5 kamiona** stoga je potrebno još povećati površinu da mogu raditi istovremeno 4 kamiona što znači da **duljina radne površine mora biti 24 m**

Odlagališta krutog otpada

- **Upravljanje odlagalištem**
- **Tijekom životnog vijeka odlagališta** neophodno je stalno i kontrolirano upravljanje svim procesima u sustavu:
 - prikupljanje, odvodnja i pročišćavanje procjednih voda
 - nadzor pročišćenih procjednih voda
 - nadzor podzemnih voda
 - prikupljanje, odvodnja i nadzor plina
 - voditi kontrolu o buci, prašini, neugodnim mirisima
- **U kasnijoj životnoj fazi** neophodno je održavanje sustava:
 - održavanje sustava za skupljanje plinova
 - održavanje sustava za pročišćavanje otpadnih voda
 - zbog slijeganja odlagališta održavanje prilaznih cesta i radnih površina
- **Dobro upravljanje odlagalištem štiti lokalnu i širu zajednicu od onečišćenja, što podrazumijeva stalni nadzor i kontrolu**

Koncept organizacije zbrinjavanja (upravljanja) krutog otpada

- Uspješno upravljanje krutim otpadom zahtjeva sustavni pristup
- Odabir pojedinih komponenti sustava mora biti kombinacija koja daje **maksimalnu korist za uložena sredstva za sadašnje i buduće generacije**
- Kod svakog sustava treba izdvojiti krajnje ciljeve i prepoznati utjecaje koje mogu imati pojedine odluke u pojedinim komponentama na ukupni sustav
- **Ne postoji jedinstveno rješenje**, savršeno kružna ekonomija je gotovo nemoguća
- Ili možda ipak je, ali po kojoj cijeni?

