

# Aktualne tehnologije u energetskoj oporabi otpada

Prof. dr. sc. Daniel Rolph Schneider

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje  
Zavod za energetska postrojenja, energetiku i okoliš

*Okrugli stol o energetskoj oporabi (opasnog) otpada*

Akademija tehničkih znanosti Hrvatske

07. listopada 2026., FSB, Zagreb



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva  
i brodogradnje

University of Zagreb  
Faculty of Mechanical Engineering  
and Naval Architecture



# Trenutačna situacija u Europi



- U 2024. god. u EU energetske je oporabljeno **61 milijun tona** komunalnog otpada, što daje udio energetske oporabe (EOO) od **26%**.
- Preko **500** energana na otpad u EU (uključujući Norvešku, Švicarsku i UK), pri tome je Grčka trenutno u procesu planiranja i gradnje 6 postrojenja, dok Hrvatska, Bugarska, Rumunjska (ima nešto), Cipar i Malta nemaju niti jednu (Srbija ima dvije), plus **30** za **opasni otpad**.
- Povećanje **recikliranja** komunalnog otpada na **65%** do 2035. (CEP)
- **Odlaganje** ograničiti na maksimalnih **10%** ukupnog komunalnog otpada do 2035.
- Zabrana odlaganja otpada koji ima ukupni organski ugljik (TOC) veći od **5%** ili gubitak žarenjem (LOI) veći od **3%**; dakle isključivo otpad koji je prošao **prethodnu obradu** i iz kojeg se više ništa **ne može reciklirati** niti **energetski iskoristiti**.
- Zabrana odlaganja **odvojeno sakupljenog** otpada.

- Energetska oporba otpada (*Waste-to-Energy*, WtE) ) trenutno je neophodna jer ne postoji bolja alternativa za postupanje s određenom vrstom otpadom (nereciklabilni, opasni, infektivni).
- Korištenje otpadne topline (za proizvodnju energije), minerala i metala može značajno doprinijeti opskrbi sirovinama i energijom i postizanju europskih klimatskih ciljeva.
- EOO nudi mogućnost **higijenskog** i **sigurnog** zbrinjavanja otpada koji se ne može reciklirati, uz istovremeno korištenje njegovog energetskog sadržaja.
- Postrojenja za EOO, zajedno sa sortiranjem i recikliranjem otpada, nezamjenjiva su za izbjegavanje ekološki štetnog odlaganja otpada, koje se još uvijek provodi u mnogim državama članicama EU, pa i Hrvatskoj (u RH 51% udio odlaganja).
- U RH trenutno je operativno **pet** centara za gospodarenje otpadom (CGO) koji u sklopu MBO postupka proizvode velike količine goriva iz otpada (RDF/SRF) (25-40% ulazne količine), a još ih se **šest** gradi/projektira.

# Razlozi za gradnju EOO u RH



- Količine RDF-a U Hrvatskoj procjenjuju se na oko **400 tisuća tona godišnje** (s dovršetkom svih 11 CGO-a), uz srednju donju ogrjevnu vrijednost od **12-16 MJ/kg** i vlagu **20-30%**.
- Zbog nestandardizirane kvalitete i povišenog udjela klorida, takav RDF nije pogodan za sve procese suspaljivanja (cementare) i nerijetko završava u izvozu, što povećava troškove i emisije u transportu.
- Troškovi zbrinjavanja RDF/SRF-a u inozemnim energanama kontinuirano rastu, prosječna cijena preuzimanja RDF/SRF-a (tzv. *gate fee*) u zapadnoeuropskim energanama kretala se od 100-130 EUR/t između 2019. i 2024. godine (EIB i CEWEP), uz dodatne troškove transporta koji mogu povećati ukupnu cijenu i do 40%, što u ovom trenutku (2026.) predstavlja trošak od **180-200 EUR/t**.
- Pritom su europski energijski kapaciteti već preopterećeni: procjenjuje se da će do 2035. u EU i dalje postojati **deficit** od oko **40 milijuna tona** kapaciteta za **termičku obradu** rezidualnog otpada, čak i uz postizanje svih ciljeva recikliranja (CEWEP).

# Termo-kemijska konverzija – Izgaranje



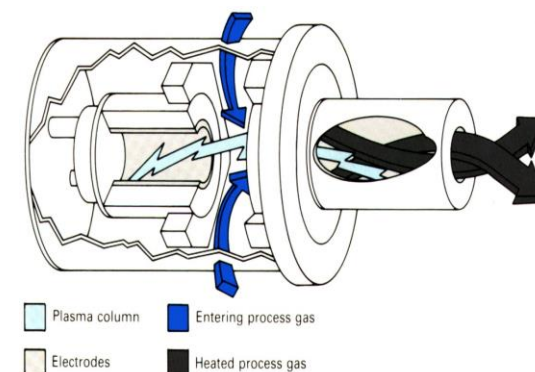
Termičkom obradom otpada se ostvaruje:

- Smanjenje mase i volumena otpada – **masa** se smanjuje do **75%**, a **volumen** do **90%**;
- Eliminacija **bioloških zagađivača** - poput virusa, mikroba, bakterija i sl., što je najveća dobrobit termičke obrade (većina ostalih metoda prerade otpada ne može uništiti ove zagađivače);
- Prerada **kemijskih zagađivača** – termička obrada otpada je, uz nuklearnu industriju, vjerojatno najkontroliranija industrijska djelatnost u Europi, tako da emisije moraju udovoljavati vrlo niskim graničnim vrijednostima za skoro 20 supstanci; stupa na snagu i nova **IED 2.0 direktiva**.
- Smanjenje emisija **stakleničkih plinova** - znatno se smanjuju emisije stakleničkih plinova u odnosu na emisije s odlagališta, u pravilu za 1-1,5 t CO<sub>2</sub>eq/t otpada;
- Izdvajanje **anorganskih tvari** – željezo, plemeniti metali (razni materijali (aluminij, bakar, željezo, pa čak i srebro i zlato) kao i nutrijenti (fosfor, cink, itd.).
- Iskorištenje energije pohranjene u otpadu – zakonski uvjet bez kojega se ne može realizirati termička obrada otpada; **jedna tona otpada** sadrži **energiju** kao **220 litara tekućeg** (fosilnog) **goriva**. → danas se pokazuje da je neophodno imati lokane energetske izvore (neovisne o fosilnim gorivima).

# Tehnologije (termokemijske) za energetska oporabu otpada



- **Izgaranje**
  - izgaranje na rešetki (zrakom hlađena ili vodom hlađena)
  - izgaranje u fluidiziranom sloju (mjehurićastom i cirkulirajućem)
  - izgaranje u rotacijskoj peći
- **Uplinjavanje** (rasplinjavanje, engl. *gasification*)
  - konvencionalno (tzv. siromašno izgaranje)
  - plazma uplinjavanje (plazma generatori/elek. baklje)
- **Piroliza** (npr. otpadnu plastiku)
  - konvencionalna (izvor topline izvana)
  - mikrovalna



Plazma generator - baklja

# Tehnologije (termokemijske) za opasni otpad



- **Spaljivanje (incineracija)**

- najrasprostranjenija i tehnološki najprovjerenija metoda za **opasni otpad**; obično na temperaturama od preko 1100 °C.
- najčešće **rotacijske peći**, ali može i rešetka i fluidizirani sloj; za **masovni opasni otpad** (npr. **medicinski, miješani industrijski**, i sl.).

- **Piroliza (termička razgradnja bez kisika)**

- Bez kisika na temperaturama od 300 °C do 900 °C.
- za specifične **homogene tokove** opasnog otpada: poput **otpadnih guma, muljeva iz rafinerija nafte, kontaminiranog tla ugljikovodicima ili elektroničkog otpada** (tiskanih pločica).
- Nema kisika pa je volumen plinova znatno manji nego kod spaljivanja - lakše filtriranje. Teški metali ostaju zarobljeni u krutom ostatku i ne odlaze u zrak.

- **Uplinjavanje (djelomična oksidacija)**

- na višim temperaturama od pirolize (800 °C do 1400 °C), u pod-stehiometrijskim uvjetima (nedovoljno kisika za potpuno spaljivanje).
- za **medicinski otpad**, opasne **industrijske muljeve** i ostatke iz **kemijske industrije**.
- visoka temperatura osigurava raspad složenih toksičnih molekula na osnovne elemente, a sintezni plin se nakon detaljnog čišćenja može koristiti u ložištima kotlova ili čak plinskim turbinama za proizvodnju el. energije.

- **Plazma tehnologija (plazma uplinjavanje)**

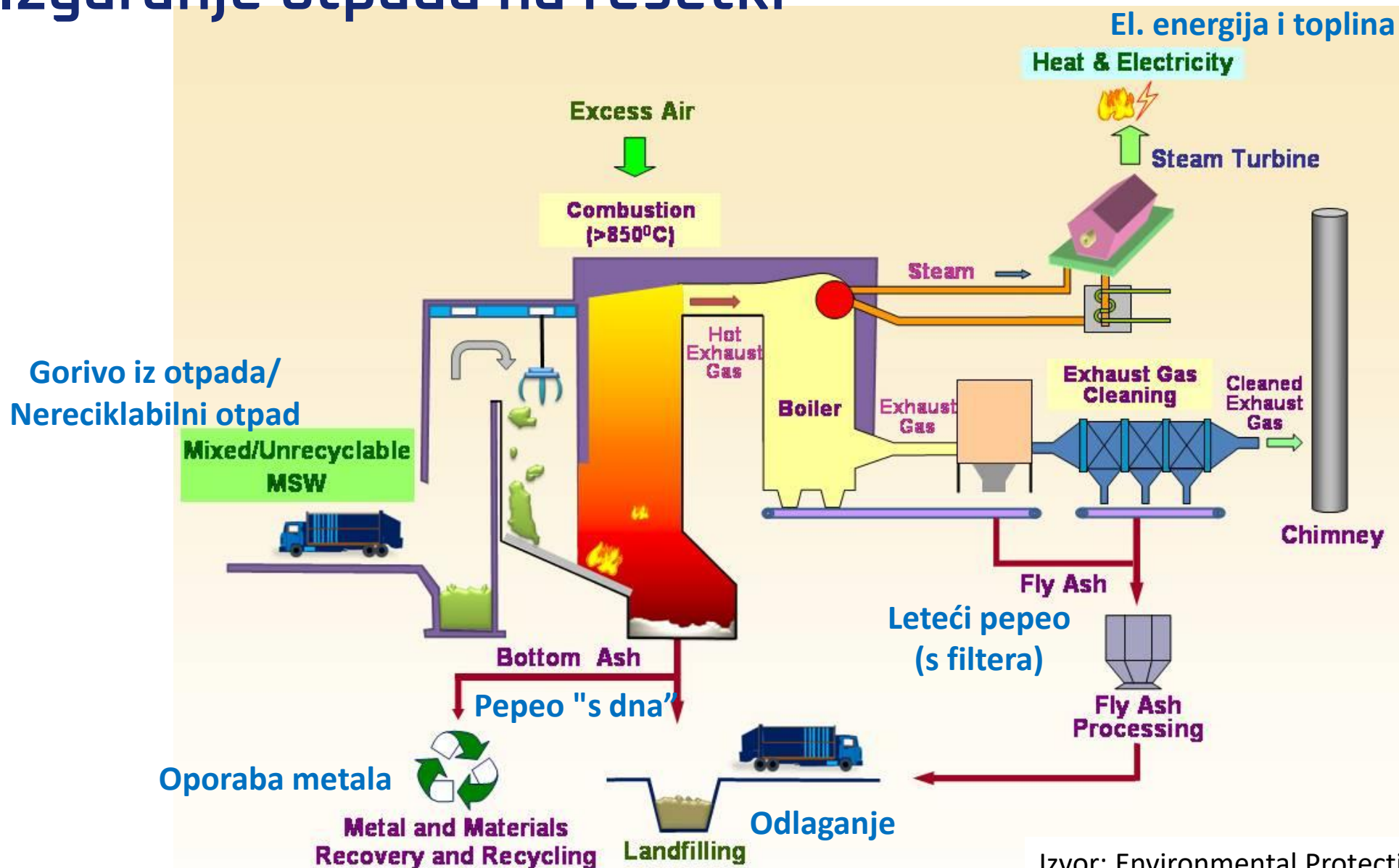
- vrlo visoke temperature od 3.000 °C do preko 10.000 °C, u okruženju bez ili s vrlo malo kisika.
- plin u stanje plazme; molekularne veze unutar opasnog otpada se u milisekundi potpuno kidaju i razlažu na osnovne atome.
- nastaje vrlo čist sintetski plin i vitrificirana troska – kruti ostatak, poput lave. Ta staklasta masa je potpuno neporozna; teški metali i otrovne komponente su trajno i fizički "zarobljeni" (imobilizirani) unutar staklene rešetke. Takav ostatak je potpuno netoksičan, ne može se isprati kišom u tlo i može se koristiti i kao materijal u građevinarstvu.
- za **najopasniji mogući otpad** – **kemijsko oružje, radioaktivni otpad** (za vitrifikaciju), **azbest**, teški **industrijski pepeo** i **toksične koncentrate** koji se ne smiju odlagati na klasična odlagališta. Najskuplja metoda.

- Najzastupljenija tehnologija (90-95% svih energana na svijetu; uplinjavanje i piroliza 3-8%; plazma uplinjavanje manje od 0,5%)
- Najveći broj referenci (kao i najveći broj ponuđača tehnologije)
- Operativna pouzdanost (desetljeća dokazanih radnih sati pogona bez prekida)
- Financijska održivost
- Bankabilnost (banke voljne kreditirati)
- Ekonomija razmjera (engl. *economy-of-scale*); lako se skalira prema većim količinama, uz povećanje iskoristivosti
- Investicijski troškovi (**CAPEX**) su veliki, zbog inflacije sada i **1100-1800 EUR/t otpada** (veći iznosi za EOO manjeg i srednjeg kapaciteta); **OPEX** je na razini 3-6% CAPEX-a.
- Od odluke da se ide s novom EOO do početka rada treba i do 8-10 god (3-4 godine planiranje, izrada dokumentacije, ishodenje svih dozvola i suglasnosti, financijska konstrukcija, sama gradnja 3-4 godine, probni rad).

# Izgaranje otpada na rešetki



fsb



Izvor: Environmental Protection Department  
[https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/prob\\_solutions/WFdev\\_IWMFtech.html](https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/prob_solutions/WFdev_IWMFtech.html)

# Izgaranje na rešetki



- Najveći udio svih energana na otpad u svijetu
- Zrela tehnologija (zreli industrijski standard)
- Može obrađivati vrlo velike količine otpada
- Kontinuirana obrada heterogenog otpada uz minimalnu prethodnu pripremu (obradu otpada)
- Visoka pouzdanost u proizvodnji električne i toplinske energije, stabilna energetska bilanca

# Izgaranje na rešetki



fsb



Copenhill WtE, Kopenhagen, Danska

Kapacitet: 400.000 t/god

Topl. en. za 90,000 kućanstva (1,363 GWh) i el. energ. za 80,000 kućanstva (244 GWh) u 2020.

Trošak gradnje: 670 milijuna USD

Francuska

000 t/god

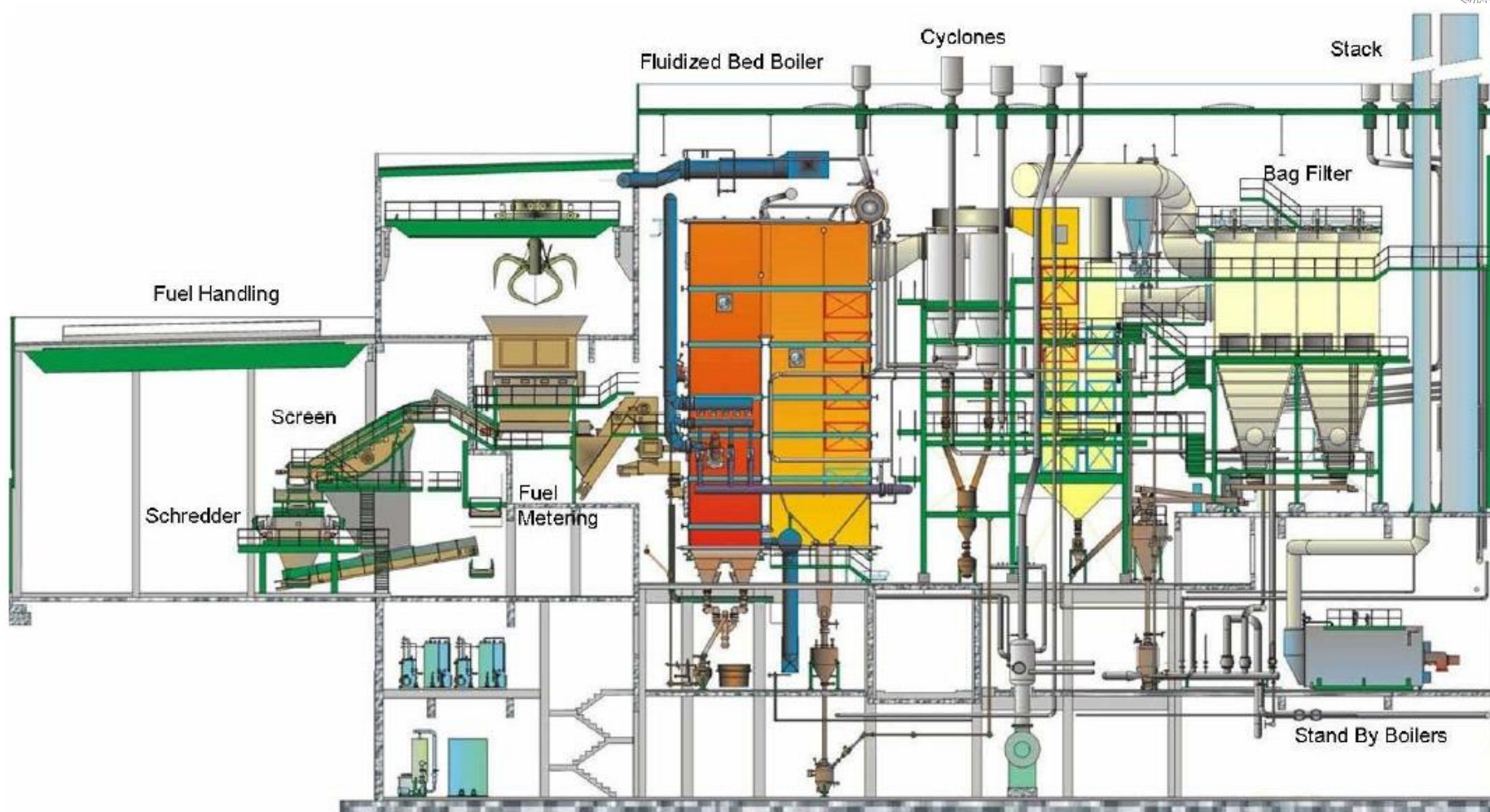
: 540 milijuna EUR (2007)

, Italija; Kapacitet: 803.000 t/g MSW (od čega 289.000 nase); Topl. en. 150 MWt; El. snaga 70 MWe

# Izgaranje otpada (RDF/SRF) u fluidiziranom sloju



fsb



Energana na gorivo iz otpada s fluidiziranim slojem, TRV Niklasdorf (ENAGES mbH)

Izvor: Energie- und Abfallverwertungsgesellschaft mbH

# Primjer izgaranja goriva iz otpada (RDF/SRF) u fluidiziranom sloju



- Kapacitet: **130.000-140.000 t/god** otpada
- Kogeneracijsko postrojenje; tehnologija izgaranja u mjehuričastom fluidiziranom sloju
- **Električna** snaga postrojenja (maksimalna): **7,5 MW<sub>e</sub>**; **toplinska: 5,5 MW<sub>t</sub>**
- Procesna para za industriju : do **31 t/h** → daje energiju susjednoj tvornici papira (Brigl & Bergmeister GmbH) i lokalnom sustavu daljinskog grijanja.
- Ukupni stupanj iskoristivosti postrojenja: **85-90%** (ovisno o donjoj ogrjevnoj vrijednosti otpada)
- Parametri svježe pare: 44 bar/400 °C
- Toplinska snaga kotla: 40 MW<sub>t</sub>
- Ogrjevna vrijednost **goriva** iz otpada (**ambalažni otpad, neiskoristivi otpad od reciklaže, otpadno drvo, kanalizacijski mulj**): **8-18 MJ/kg**
- Recirkulacija dimnih plinova kao i sekundarno uvođenje zraka za izgaranje (naknadno izgaranje)
- Višestruki sustavi za čišćenje dimnih plinova: filtri, cikloni, SCR DeNO<sub>x</sub>, mokro ispiranje, aktivni ugljen

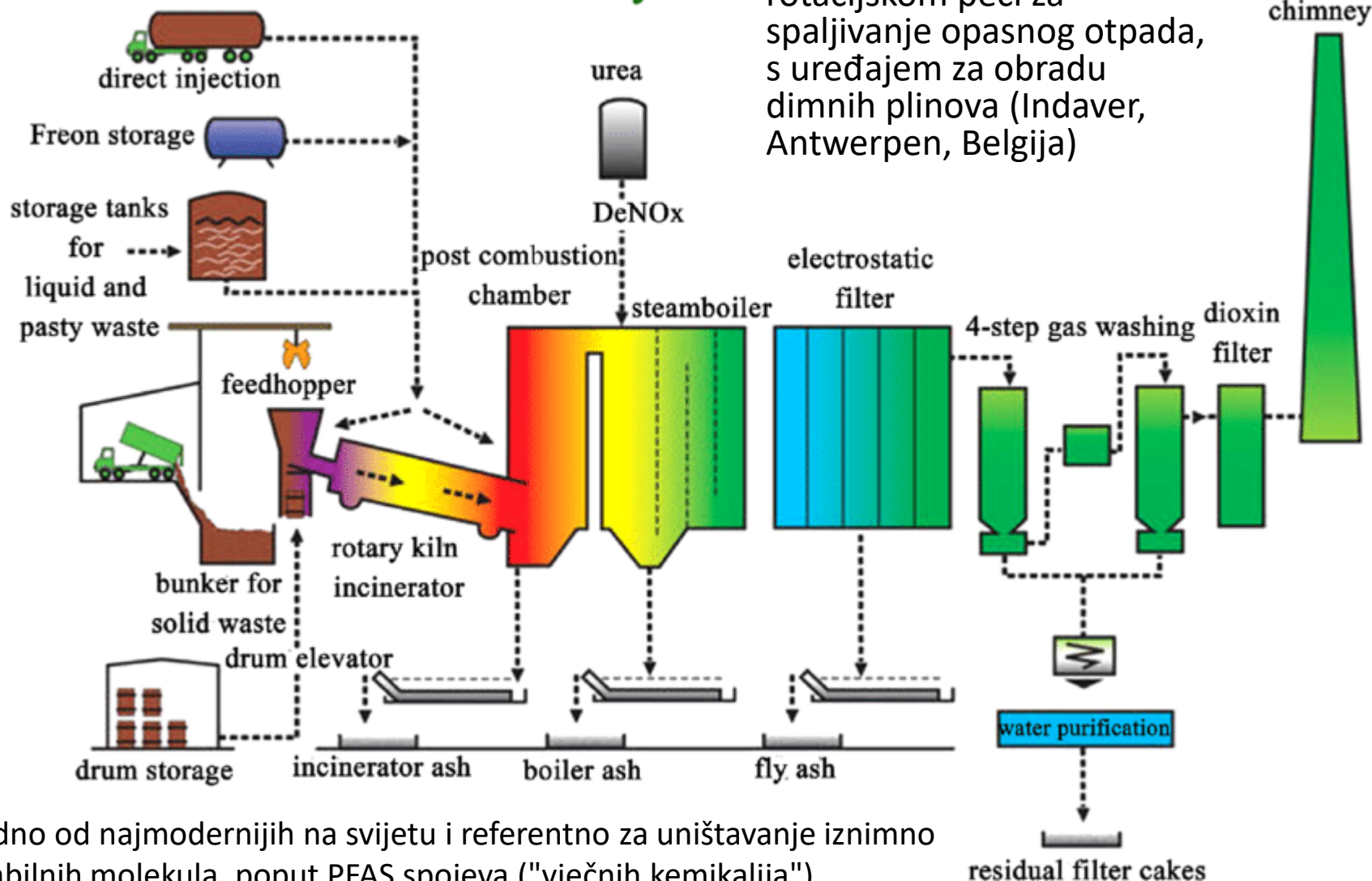
# Spaljivanje opasnog otpada



fsb

## Rotary kiln

Tipično postrojenje s rotacijskom peći za spaljivanje opasnog otpada, s uređajem za obradu dimnih plinova (Indaver, Antwerpen, Belgija)



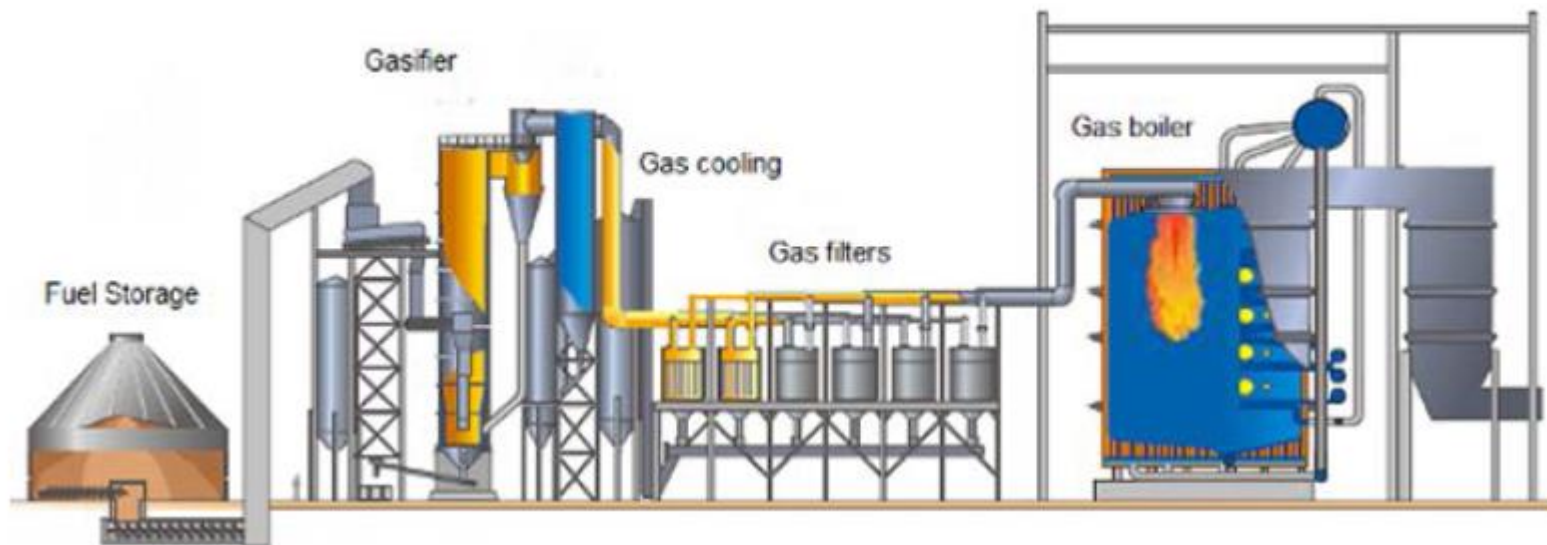
- Jedno od najmodernijih na svijetu i referentno za uništavanje iznimno stabilnih molekula, poput PFAS spojeva ("vječnih kemikalija").

- 60.000 t/god opasnog otpada
- Temp. izgaranja u rotacijskoj peći: **1.000-1.200 °C** (iako temp. plamena na gorioniku može ići i na **1.300-1.600 °C**, a temp. u peći može biti i do **1.300 °C**)
- U komori naknadnog izgaranja **1.100-1.200 °C**
- Dio pare proizvedene u kotlu (19 bara, 215 °C) izravno se koristi u postrojenju.
- Turbina snage 3,3 MWe pretvara ostatak pare u električnu energiju.
- Svejedno je to D10 (zbrinjavanje; zakonski)

# Uplinjavanje GIO (SRF i RDF)

## Lahti Energy WtE postrojenje Kymijärvi II (Finska)

- **Prvo postrojenje za uplinjavanje** na svijetu koja učinkovito generira električnu i toplinsku energiju iz **SRF** (goriva iz otpada).
- Ulaganje: 157 milijuna eura.
- U pogonu od 2012. godine, dobri rezultati; međutim kasnije su se pokazali problemi u radu.
- Dva rasplinjača s **cirkulirajućim** fluidiziranim slojem Metso.
- Proizvodi **50 MW** električne energije i **90 MW** topline za daljinsko grijanje.
- Kapacitet **250.000 t/god SRF** (standard CEN/TC343 SRF): usitnjena mješavina odvojeno sakupljenog krutog otpada od drveta, i neregiclabilnog papira, kartona i plastike (ne PVC).
- Kondicioniranje plina smanjuje potencijal korozije kotlovskih cijevi što omogućava viši tlak pare i temperaturu (**120 bara** i **540 °C** u usporedbi sa standardnih 65 bara i 480 °C) → poboljšana energetska učinkovitost parnog ciklusa (30% električna, 87,5% kogeneracijska).



## Ključni pogonski izazovi (Lahti Energy WtE postrojenje Kymijärvi II):

- 1. Osjetljivost sustava hlađenja i keramičkih filtera:** Da bi se spriječila visokotemperaturna korozija kotla uzrokovana kloridima i alkalnim metalima iz otpada, sintetski plin se hladi s 900 °C na 400 °C kako bi se nečistoće skrutnule i uklonile keramičkim filterima. Pri odstupanjima u temperaturi ili sastavu otpada dolazi do **stvaranja naslaga** u dimovodnim kanalima i povećanja pada tlaka na keramičkim cijevima uslijed kondenzacije teških katrana (tars).
- 2. Kvaliteta goriva i mehaničke blokade:** Varijacije u kvaliteti i dimenzijama komadića SRF-a te prisutnost neželjenih anorganskih primjesa (poput metalnih niti iz sjeckanih guma) povremeno uzrokuju blokade u sustavu za ekstrakciju pepela i doziranje goriva.
- 3. Visoki kapitalni i pogonski troškovi (CAPEX/OPEX):** Zbog višestupanjskog procesa (rasplinjavanje -> hlađenje plina -> keramička filtracija -> izgaranje u kotlu), visoke razine automatizacije te osjetljivog održavanja filtracijskog sustava, **troškovi pogona su znatno viši** u usporedbi s klasičnim energanama s izgaranjem na rešetki.

# Plazma uplinjavanje GIO (SRF i RDF)

## Tees Valley Renewable Energy Facility, TV1 i TV2 (UK)

- **Najveće WtE postrojenje za rasplinjavanje plazmom**, Teesside, sjeveroistočna Engleska.
- Integrirano rasplinjavanje s kombiniranim ciklusom (IGCC) koristi jedan veliki rasplinjač tvrtke *Westinghouse Plasma (Alter NRG)* s rasplinjavanjem pomoću kisika.
- Kapacitet TV1: **350.000 t/g RDF** (1100 t/d), MSW koji se ne može reciklirati: predobrađeni komunalni, komercijalni i industrijski otpad.
- Proizvodnja električne energije: **50 MW**.
- Gorivi plin se hladi i čisti kako bi se uklonile čestice, HCl i drugi kiseli plinovi, amonijak, sumpor i živa.
- Plin pogoni dvije plinske turbine s el. generatorima, s iskorištavanjem otpadne topline u kotlovima-utilizatorima. Para iz kotlova pogoni parnu turbinu s generatorom za dodatnu proizvodnju el. energije.

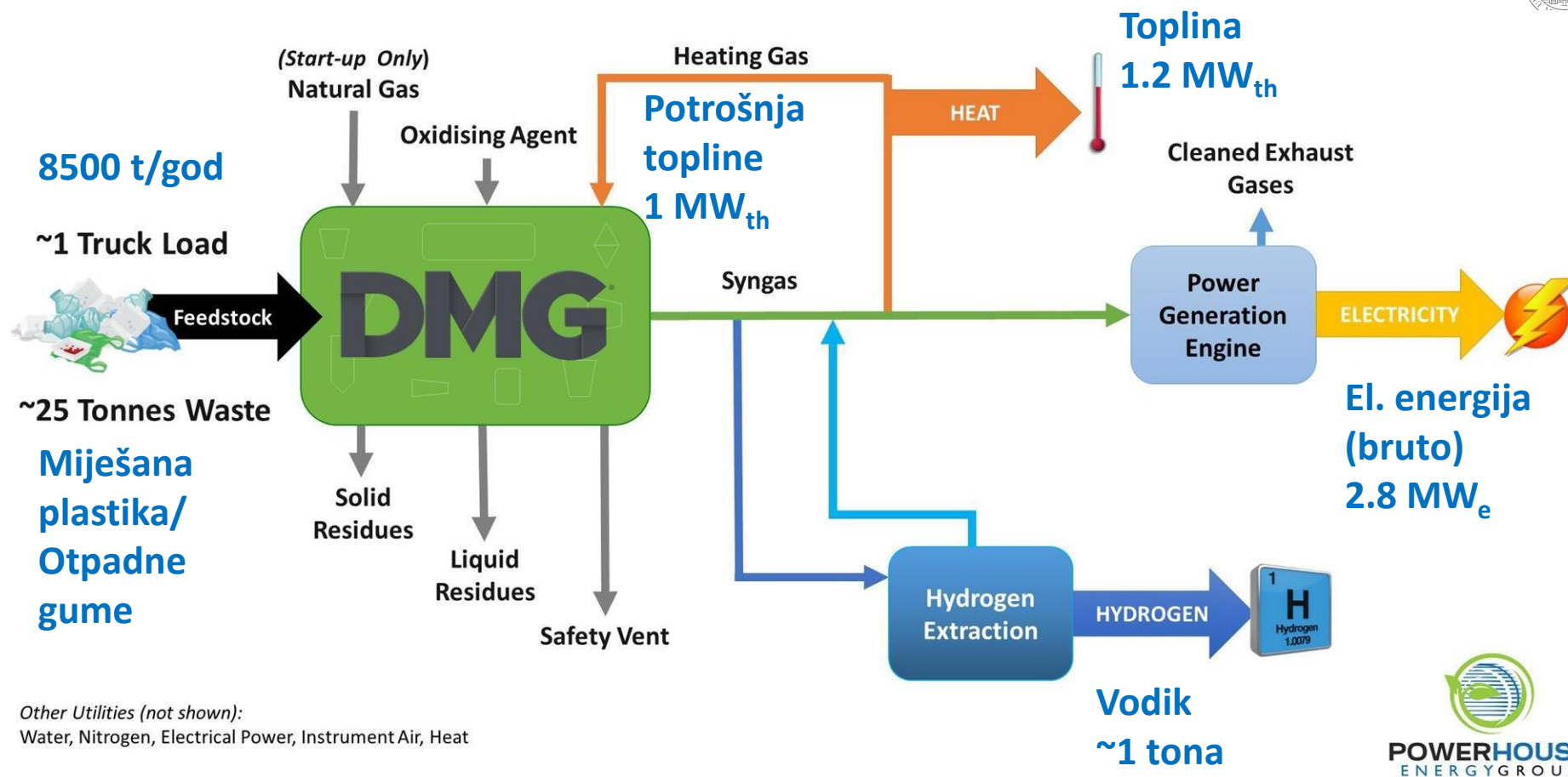


Projekt je zaustavljen netom prije završetka u 2016., zbog velikih tehničkih problema u radu; ogroman financijski otpis gubitka – oko 770 milijuna GBP.

## Ključni problemi (Tees Valley Renewable Energy Facility, TV1):

1. **Nedokazana tehnologija na velikoj količini (kapacitetu):** Iako je plazma uplinjavanje funkcioniralo u manjim razmjerima, reaktori ove veličine nisu bili dokazani na masovnoj komercijalnoj razini. Pokazalo se da iznimno veliki reaktori nisu mogli stabilno i pouzdano raditi.
  2. **Nepremostivi operativni i tehnički izazovi:** Tijekom probnog rada postrojenje nije uspijevalo održavati kontinuiran proces rasplinjavanja, ravnotežu mase i topline, niti stabilnu proizvodnju sintetskog plina iz nehomogenog miješanog komunalnog otpada.
  3. **Visoki troškovi (CAPEX i OPEX) i velika vlastita potrošnja energije:** Plazma baklje troše izrazito velike količine električne energije za održavanje visoke temperature (preko 3.000 °C). To je drastično smanjilo neto energetske učinkovitost postrojenja, a u kombinaciji s ekstremno visokim troškovima izgradnje i održavanja učinilo projekt ekonomski potpuno neodrživim.
- Plazma uplinjavanje dobro je za **opasni otpad**; potpuna **vitifikacija anorganskog dijela** te **razgradnja organskog dijela** u jednostavne molekule → dobiva se i **sintezni plin**.
  - Kod **plazma** uplinjavanja neopasnog goriva otpada danas je trend prema **proizvodnji vodika** (*Waste-to-Hydrogen*), npr. tvrtka Plagazi (Švedska), 2024. dobila je 30 mil. EUR iz modernizacijskog fonda EU.

# Modularno uplinjavanje (mali kapaciteti)



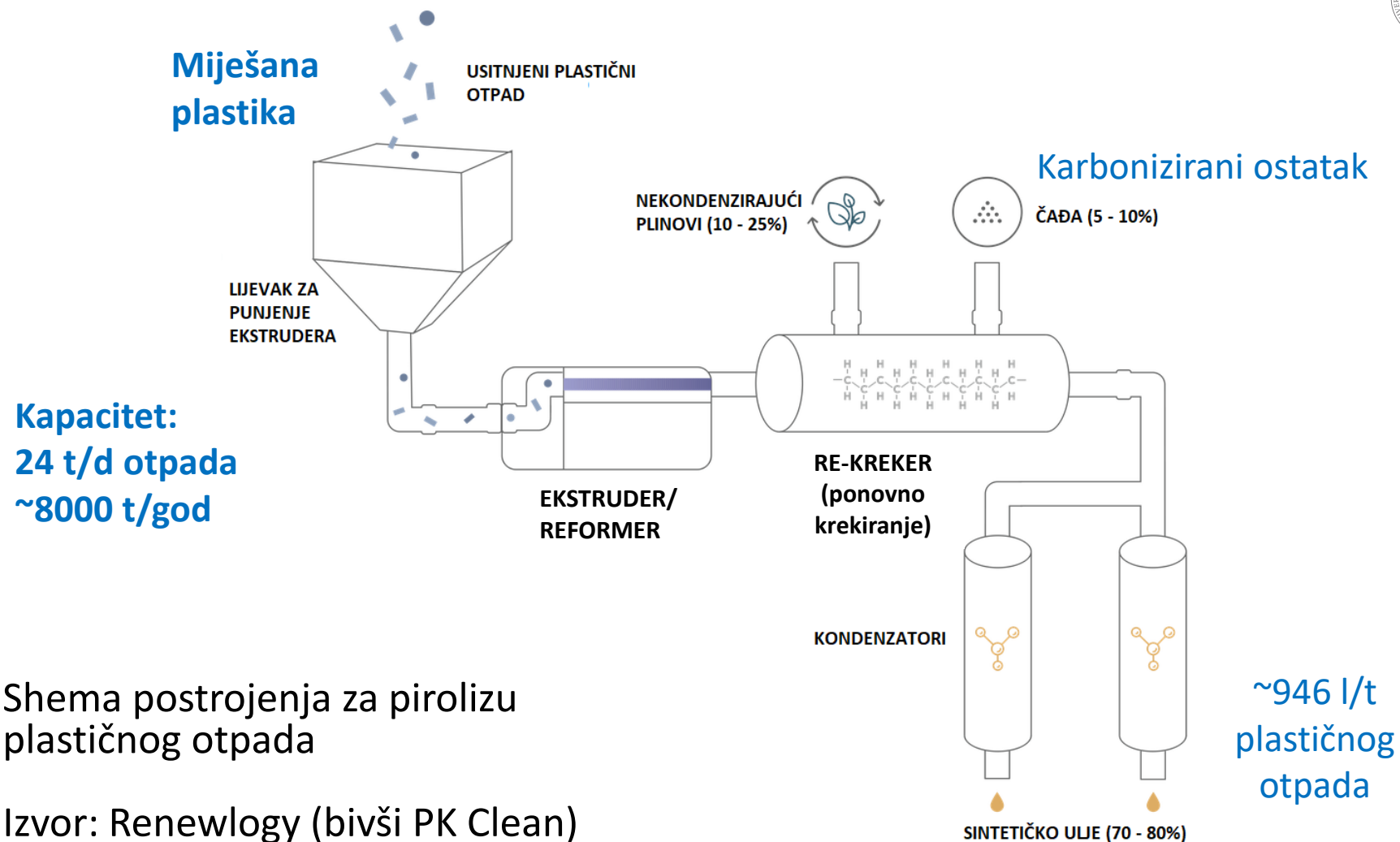
Pojednostavljeni dijagram tokova – distribuirano modularno uplinjavanje (DMG®- Distributed Modular Gasification).

Izvor: PowerHouse Energy Group plc

# Piroliza plastičnog otpada



fsb



Shema postrojenja za pirolizu  
plastičnog otpada

Izvor: Renewlogy (bivši PK Clean)

Naphtha (sirovina za proizvodnju polimera,  
dizelskog goriva, i drugih petrokemijskih produkata)

- Energetska uporaba neizostavan je dio sustava kružnog gospodarenja otpadom;
- Treba spaljivati samo otpad koji danas nije moguće reciklirati;
- Nije moguće drugačije postići ciljeve EU za zabranu odlaganja (maks. 10% do 2035.) i povećanje recikliranja (min. 65% do 2035.; za ambalažni otpad 75% do 2035.);
- EOO nije konkurencija recikliranju, nego prije odlaganju (niti reciklabilni niti energetski iskoristiv otpad više ne smije završavati na odlagalištima);
- Postoje danas i druge tehnologije ali nisu još dostigle komercijalnu zrelost ili nisu pogodne za velike količine (Konverzija plastičnog (nereciklabilnog/zagađenog) otpada u gorivo (npr. Piroliza/Katalitička razgradnja/Uplinjavanje, De-polimerizacija, itd.) → diesel (i slično dieselu), loživa ulja, kemikalije, i dr.

- EOO je neophodna da bi se opasni materijali (tvari opasnih/štetnih svojstava) držali van kružnog gospodarstva;
- EOO može proizvesti energiju (koja je oko 50% obnovljiva i 50% klimatski neutralna) s relativno dobrom učinkovitošću (uz istovremenu proizvodnju električne i toplinske energije za daljinsko grijanje i hlađenje); nove mogućnosti CCUS-a;
- Veliki dio anorganskih tvari sadržanih u pepelu s dna može se reciklirati (oko 20% pepela u EOO, pri čemu takav pepeo sadrži različite metale, potencijalne građevne materijale i druge korisne tvari kao što su fosfor i cink);
- Kružno gospodarstvo zahtijeva puno energije, koja se (djelomično) može dobiti iz EOO.