



# Energetska učinkovitost i vakuumska piroliza otpada

Otpad i Sunce u službi fotokatalitičke razgradnje  
Mikroonečišćivala u vodama OS-MI

KK.01.1.1.04.0006



## Sadržaj:

Otpad, kružno gospodarstvo

Energija iz otpada

Energetska učinkovitost

Vakuumska piroliza

Energetska učinkovitost i vakuumna piroliza

Proizvodnja CNT iz otpada vakuumskom  
pirolizom

Budućnost

# Otpad, kružno gospodarstvo

Principi kružnog gospodarstva stavljaju naglasak na **odgovorno iskorištavanje resursa**, u skladu s idejom proizvodnje korisnog katalitički aktivnog materijala iz otpada.

Kako se ne bi gubile vrijedne sirovine koje se nalaze u plastici i otpadu od plastike te stvarao negativan utjecaj na okoliš, nju je potrebno reciklirati ili energetske oporabiti.

Jedan od problema koji se rješava projektom OS-Mi je **nedovoljno korištenje otpada kao resursa**.

# Energija iz otpada

Proces koji pretvara čvrsti otpad u električnu energiju, toplinu ili gorivo. Može smanjiti emisiju stakleničkih plinova, potrebu za odlagalištima otpada i ovisnost o fosilnim gorivima.

Nažalost, WTE nije široko poznat ili popularan među javnošću. Zato je potrebno više edukacijskih i svijesti o tome kako informirati i uključiti ljude u WTE.

Niz dostupnih istraživanja govori u prilog korištenju komunalnog/industrijskog/poljoprivrednog otpada kao izvora ugljika za proizvodnju ugljikovih nanocjevčica (eng. carbon nanotubes, CNT).

# Energetska učinkovitost

Energetska učinkovitost pirolize ovisi o nekoliko faktora, kao što su vrsta otpada, sadržaj vlage u otpadu, dizajn i način rada reaktora, te krajnja upotreba proizvoda.

Piroliza može postići visoku energetska učinkovitost, ako se ugljenizirani ostatak i pirolitičko ulje koriste za proizvodnju toplinske energije i električne energije ili se zajedno koriste s fosilnim gorivima.

Energetska učinkovitost u pirolizi (plastičnog) otpada važan je aspekt ove tehnologije, jer utječe i na ekološku i ekonomsku održivost procesa.

# Piroliza

Piroliza je termičko-kemijski proces bez prisustva kisika pri kojem dolazi do razgradnje organskih polimera te se oni pretvaraju u **plinove, pirolitičko ulje i ugljenizirani (kruti) ostatak**.

Postupak koji se odvija bez prisustva kisika, čime je **smanjena emisija stakleničkih plinova**.

Općenite karakteristike pirolize su sljedeće:

- odsustvo ili smanjeno prisustvo kisika (kisik može biti prisutan u gorivu)
- temperature procesa (300-1200 °C);
- produkti su plinovi, pirolitičko ulje i ugljenizirani (kruti) ostatak;
- visoka ogrjevna moć plina dobivenog pirolizom (22-30 MJ/m<sup>3</sup>).

Ključni parametri su temperatura, trajanje procesa, stopa zagrijavanja, vrijeme zadržavanja, tlak.



**Custom-made višezonska cijevna peć za vakuumsku pirolizu ili pirolizu u struji inertnog plina, izrađena kroz projekt OS-Mi.**

Proces pirolize posebno je učinkovit za otpadne plastike koje bi inače mogle biti teške ili nemoguće reciklirati. Ovaj proces pretvara te plastike u vrijedne kemikalije i goriva, pružajući održivo rješenje za pirolizu njihove ponovne upotrebe ili odlaganje na ekonomičan i ekološki odgovoran način.

Piroliza se uglavnom primjenjuje **na organske materijale**. To je u osnovi **proces karbonizacije** u kojem se organski materijal visoke molekulske mase razgrađuje ili puca kako bi se proizveo čvrsti ostatak s visokim (ili višim) sadržajem ugljika te neki hlapljivi proizvodi.





Vrste otpada koje su pogodne za vakuumsku pirolizu:

- ✓ **Plastika:** Plastični otpad, kao što su ambalaža, boce i drugi plastični materijali, može se obrađivati vakuumskom pirolizom kako bi se dobila sirovina za gorivo ili kemijski proizvodi.
- ✓ **Guma:** Stare gume mogu se pirolizirati kako bi se dobilo gorivo, plinovi ili ugljenizirani ostatak.
- ✓ **Biomasa:** Organski materijali poput drva, ostataka usjeva ili otpada iz agroindustrije mogu se pirolizirati kako bi se proizvela pirolitička ulja ili ugljenizirani ostatak.
- ✓ **Miješani komunalni otpad:** kako bi se smanjila količina otpada koja završava na odlagalištima i proizveo koristan materijal.
- ✓ **Plinoviti otpad:** Plinovi koji se oslobađaju tijekom pirolize mogu se koristiti kao energent ili kemijska sirovina.
- ✓ **Industrijski otpad:** Razni industrijski otpadi, uključujući otpad iz kemijske industrije ili otpadne materijale iz proizvodnje, mogu se pirolizirati kako bi se smanjila njihova količina i izvukla vrijedna komponenta.
- ✓ **Otpadna ulja i maziva:** Stara ulja i maziva mogu se obrađivati vakuumskom pirolizom kako bi se dobila sirovina za ponovnu uporabu.

## Spora piroliza: primarni produkt ugljenizirani ostatak

Temperatura procesa je između 200°C i 500°C → omogućuju sporiju i kontroliranu razgradnju materijala → visoka energetska učinkovitost i smanjeni gubici energije.

Glavni proizvod je ugljenizirani ostatak. Smanjene emisije plinova i čestica.

Trajanje: nekoliko sati ili dana.

Stopa zagrijavanja: do 100 °C/min

Produkti spore pirolize su približno:

35% ugljenizirani ostatak

30% pirolitičko ulje

35% pirolitički plin.

## Brza piroliza: glavni produkt pirolitičko ulje

Proces se odvija na temperaturama od 500°C do 1000 °C i kratkim vremenima zadržavanja, što rezultira brзом razgradnjom materijala u čvrste, tekuće i plinovite frakcije.

Glavni produkt je pirolitičko ulje, koje se može koristiti kao sirovina za proizvodnju biogoriva ili kemijskih spojeva.

Brza stopa zagrijavanja, do 10,000 °C/min

# Vakuumska piroliza

Relativno nova tehnika pirolize prikladna za pretvorbu biomase, plastičnog otpada, otpadnih guma i otpadnog mulja sa pročištača otpadnih voda.

Usisavanje pod vakuumom brzo uklanja hlapljive proizvode iz reakcijske komore, smanjujući vrijeme zadržavanja para u procesu i minimizirajući sekundarne reakcije.

Prednosti: niska temperatura raspadanja materijala, manji intenzitet sekundarnih reakcija i kraće vrijeme zadržavanja para u samom reaktoru.

Radi pri niskom tlaku (15 – 20 kPa) i određenoj temperaturi (300 - 800°C).

# Proizvodnja CNT-a iz otpada vakuumskom pirolizom

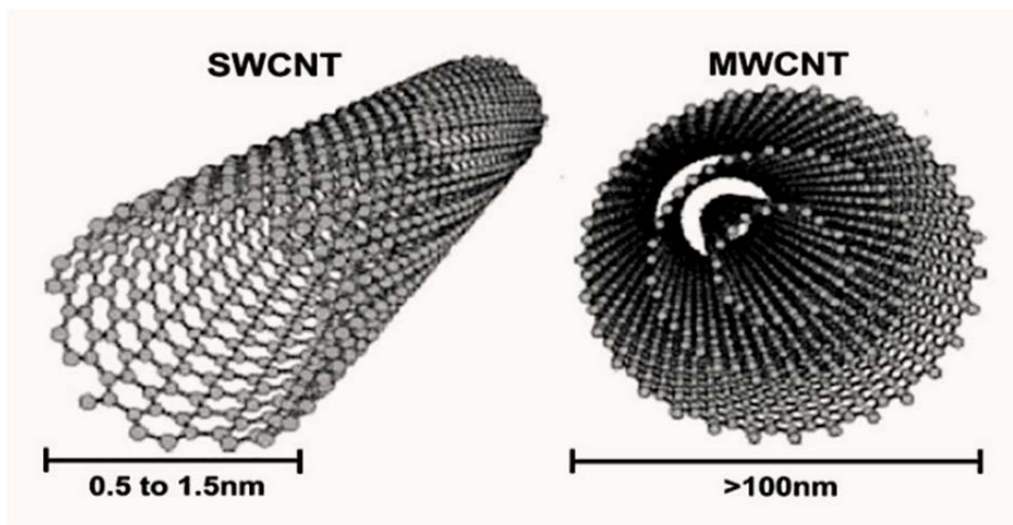
Ugljikove nanocjevčice ( eng. *carbon nanotubes*, CNT) su cilindrične molekule koje se sastoje od valjanih listova jednoslojnih ugljikovih atoma (grafena).

Sinteza CNT-a može se dogoditi iz različitih izvora: ugljikovodici u plinovitom i tekućem obliku ili čak polimeri iz otpada, pružajući alternativnu metodu za gospodarenje otpadom.

Na kvalitetu CNT-ova uvelike utječe prisutnost različitih plastičnih materijala ili kao mješavina različitih plastika.

Struktura ugljikove nanocjevčice formirana je slojem ugljikovih atoma koji su spojeni zajedno u šesterokutnu (saće) mrežu:

- Jednozidna struktura ugljikove nanocjevčice (SWCNT)
- Višezidna struktura ugljikove nanocjevčice (MWCNT)



**Svojstva ugljikovih nanocjevčica:** električna provodljivost; čvrstoća i elastičnost; toplinska vodljivost i širenje; emisija elektrona; Visoki omjer slike

### **Primjena CNT-ova:**

1. Nanobiotehnologija, posebice za biosenzore;
2. Nanotransporti: ciljana dostava lijekova, terapijske svrhe te inženjerstvo tkiva;
3. Nanoelektronika;
4. Poboljšanje svojstava konstrukcijskih materijala, polimera, metala ili keramike;
5. Pročišćavanje vode i zraka;
6. Energetika: superkapacitori, baterije, gorivne ćelije;
7. Katalizatori.

Sinteza jednoslojnih i višeslojnih CNT-a na industrijskoj razini trenutno se postiže energetske te resursno intenzivnim procesima kao što je CVD ili plamena sinteza.

CVD i plamena sinteza su tehnologije koje troše odnosno koriste skupe ugljikovodike kao i visoko-zapaljive spojeve poput dušika ( $H_2$ ). Stoga, kako bi industrijska proizvodnja CNT-a postala održiva i sama po sebi sigurna koriste se dostupna alternativna goriva poput otpada.

Piroliza je **endotermički proces**. Utvrđivanje ukupne energetske ravnoteže i termalne učinkovitosti procesa temeljni je korak u dizajniranju učinkovitog reaktora za pirolizu. Upotreba obnovljivih izvora energije za provođenje pirolize mogla bi učiniti proces ekonomičnijim i ugljično neutralnim.



# Energetska učinkovitost i vakuumska piroliza: ključni faktori

**Kontrola temperature:** Učinkovita kontrola temperature ključna je za energetska učinkovitost. Procesi pirolize često zahtijevaju visoke temperature, a precizna kontrola može smanjiti gubitke energije i osigurati optimalne prinose proizvoda.

**Obnova topline:** Mnoge moderne sustave pirolize karakteriziraju mehanizmi obnove topline. Toplinske izmjenjivači mogu uhvatiti i ponovno koristiti toplinu iz procesa kako bi predgrijali ulaznu sirovinu ili pružili energiju za druge procese unutar postrojenja, poboljšavajući ukupnu energetska učinkovitost.

**Katalizatori:** Neki procesi pirolize koriste katalizatore kako bi smanjili potrebnu temperaturu za pirolizne reakcije, čime se smanjuje potrošnja energije. Katalizatori također mogu poboljšati iskoristivost i kvalitetu proizvoda.

**Odabir sirovine:** Vrsta plastične sirovine koja se koristi može utjecati na energetska učinkovitost. Neki plastike lakše se piroliziraju i zahtijevaju manje energije od drugih. Istraživanja se provode kako bi se identificirale najprikladnije sirovine za učinkovitu pirolizu.

Piroliza je **endotermički proces**. Utvrđivanje ukupne energetske ravnoteže i termalne učinkovitosti procesa temeljni je korak u dizajniranju učinkovitog reaktora za pirolizu. Upotreba obnovljivih izvora energije za provođenje pirolize mogla bi učiniti proces ekonomičnijim i ugljično neutralnim.

**Analiza energetske ravnoteže** za vakuumsku pirolizu ključan je proces za procjenu energetske učinkovitosti i izvedivosti tehnologije. Uključuje procjenu ulaza i izlaza energije tijekom procesa vakuumske pirolize.

**Energetska učinkovitost pirolize** jest termalna učinkovitost dobivena kao omjer razlike između ukupnih energetske vrijednosti pirolitičkih proizvoda i termalne energije potrebne za zagrijavanje uzorka na energiju sadržanu u sirovini izračunatoj na temelju viših energetske vrijednosti.

# Budućnost

- 1. Istraživanje i inovacije:** Nепrestana istraživanja i razvoj u području vakuumske pirolize plastičnog otpada ima za cilj poboljšati energetsку učinkovitost. To uključuje inovacije u dizajnu reaktora, razvoju katalizatora i optimizaciji procesa.
- 2. Regulatorni i ekonomski faktori:** Vladini propisi i ekonomski poticaji mogu utjecati na usvajanje energetski učinkovitijih tehnologija pirolize. Subvencije, cijene ugljika i ekološke politike mogu potaknuti inovacije i poboljšanja u učinkovitosti.

**Piroliza plastičnog otpada je obećavajuća tehnologija za postizanje kružnog gospodarstva i rješavanje globalne krize plastičnog otpada.**



## Otpad i Sunce u službi fotokatalitičke razgradnje Mikroonečišćivala u vodama OS-MI KK.01.1.1.04.0006

Projekt je sufinanciran od strane Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj.

Sadržaj materijala isključiva je odgovornost Geotehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

