



PREGLED TEHNIČKE LITERATURE I DOKUMENTACIJE

Uređuje: Domagoj Vrsaljko

PROCESNO INŽENJERSTVO

Claudia Pudack i sur.

Recikliranje PET-a – Kristalizacija olakšava održivost

(PET Recycling – Contributions of Crystallization to Sustainability)

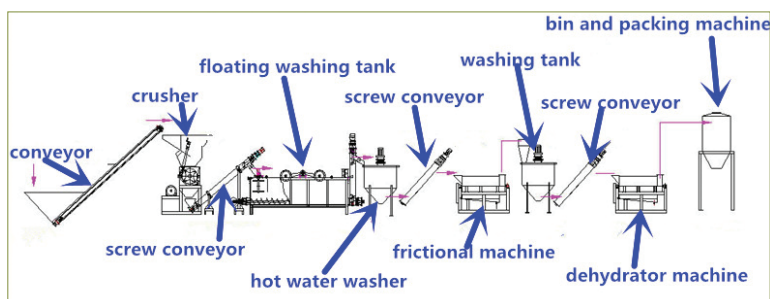
Poli(etilen-tereftalat) (PET) najčešći je plastomerni polimer iz porodice poliestera. To je prirodno prozirna i polukristalna plastika koja se upotrebljava za proizvodnju boca i vlakana za tekstilne proizvode. Neke od najvažnijih karakteristika PET-a uključuju njegovu otpornost na vodu, visok omjer čvrstoće i mase te široku dostupnost kao ekonomične plastike koja se može reciklirati. PET je u svojem najčišćem obliku amorfni materijal nalik staklu zbog svoje niske brzine kristalizacije. Rani pokušaji povećanja brzine kristalizacije uključivali su toplinsku obradu taline polimera i ugradnju promotora kristalizacije i sredstava za nukleaciju. Nasuprot tome, male količine odgovarajućeg komonomera, poput izoftalne kiseline, smanjuju brzinu kristalizacije, poboljšavajući time toplinsku otpornost i mehanička svojstva tog poliestera.

Danas na tržištu PET-a dominiraju dva standardna tipa materijala, PET za vlakna i PET za boce. Te se vrste razlikuju po molekularnoj težini, optičkom izgledu i proizvodnim formulacijama, tj. količini i vrsti komonomera, stabilizatora, metalnih katalizatora i bojila. PET za vlakna ima molekularnu masu od 15 000 do 20 000 g mol⁻¹, dok se prosječna molekularna masa PET-a za boce kreće od 24 000 do 36 000 g mol⁻¹. Ostali, posebni zahtjevi za potonje su visoka razina transparentnosti i sastav koji ispunjava propise za ambalažu hrane.

Poli(etilen-tereftalat) jedan je od najčešćih polimera i njegova je trajnost postala glavna briga za okoliš. Aktualna javna rasprava o plastičnim osta-

cima također je pokrenula reviziju tehnologija recikliranja PET-a. Ovaj se istraživački članak usredotočuje na kemijsku reciklažu PET-a metanolizom. Procesom se PET razgrađuje u dva glavna produkta reakcije, dimetil tereftalat (DMT) i etilen glikol (EG). Naknadno odvajanje destilacijom u kombinaciji s kristalizacijom taline bez otapala pouzdano uklanja kritične nečistoće i komponente koje nisu dio PET polimera te osigurava čiste monomere pogodne za ponovnu polimerizaciju. PET je higijenski, čvrst, lagan i otporan na udarce te je jedan od najčešće upotrebljivanih, svestranih i najpouzdanijih materijala za pakiranje. No, iako je PET lako reciklirati, znatan dio PET-ovih proizvoda za jednokratnu uporabu završava kao plastični otpad, od čega dio čak i u oceanima. Trenutačno je zagađenje plastikom jedna od najvećih briga za okoliš, a javna rasprava pokrenula je reviziju tehnologija recikliranja PET-a.

PET se lako može preraditi, a mehaničko recikliranje PET-a dobro je uspostavljeno kao i tržište za proizvodnju vlakana od otpadnih boca. Suprotno tome, recikliranje boca za ponovnu proizvodnju boca od PET-a mora udovoljavati propisima za ambalažu hrane, i stoga se temelji na tehnikama kemijskog recikliranja.



Slika 1 – Linija za mehaničko reciklažu plastičnih boca
(izvor: <https://paradiseppe.com/>)

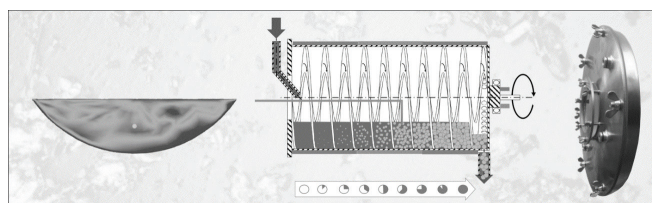
Chem. Ing. Tech. 92 (4) (2020) 452–458

Marius Meise i sur

Karakteristike vremena zadržavanja novog kristalizatora/reaktora s Arhimedovim vijkom

(Residence Time Characteristics of the Novel Archimedean Screw Crystallizer/Reactor)

U specijalnoj, kemijskoj i farmaceutskoj industriji šaržni reaktori s miješanjem dominiraju kao kemijski reaktori, isparivači i kristalizatori. Imaju mnoge prednosti: visoku fleksibilnost provedbe postupka, kao i radnih parametara, lako se čiste, široku paletu materijala za izradu i jednostavan rad. Međutim, oni također imaju razne nedostatke. Gradijenti temperature, koncentracije i protoka u uređaju mogu rezultirati velikom varijabilnošću šarži pa ponekad niskom kvalitetom proizvoda i prinosom. Nadalje, reaktori s miješanjem imaju samo ograničenu mogućnost uvećavanja. Uvećanje procesa od laboratorija do proizvodne skale često dovodi do različitih problema, posebno s obzirom na radne parametre koji



Slika 2 – Kristalizator s Arhimedovim vijkom. Taj kristalizator omogućuje kontinuiranu kristalizaciju bez povratnog miješanja i bez pada tlaka te ima bolje rezultate u usporedbi sa šaržnim kristalizatorom. Trenutačno se većina reakcija i kristalizacija provodi u šaržnim reaktorima. Šaržni postupci imaju brojne tehničke i ekonomske nedostatke. Nažalost, prijelaz u kontinuirane ili protočno-kotlaste reaktore često nije jednostavno ili nije moguće provesti zbog neprihvatljivo široke raspodjele vremena zadržavanja, visokog pada tlaka i tehničke izvedivosti. Novi kristalizator s Arhimedovim vijkom je drugačiji, rješenje je za sve te probleme za protoke od 10 l h⁻¹ do 100 m³ h⁻¹ i vrijeme zadržavanja od 10 sati i više (izvor: <https://www.wilk-graphite.com/>).

određuju kvalitetu, kao što su specifična ulazna snaga, brzina periferne miješalice, vrijeme reakcije ili stvaranje mrtvih zona i gradijenata brzine. Loše provedeno uvećanje procesa rezultira gradijentima temperature i koncentracije koji dovede do loše, nepredvidive kvalitete i prinosa. Stoga je razvoj robusnih, jeftinih, kontinuiranih procesa koji izbjegavaju te nedostatke od velikog interesa i trenutačno je predmet intenzivnih akademskih i industrijskih istraživanja.

Ovaj rad predstavlja novi dizajn kontinuiranog kristalizatora, kristalizatora s Arhimedovim vijkom, koji, kako i naziv sugerira, rabi integrirani Arhimedov vijak kao transportni element.

Chem. Ing. Tech. 92 (8) (2020) 1074–1082

Jorge Iván Salazar Gómez i sur.

Dizajn i primjena sustava za proizvodnju složenih plinskih smjesa i kalibracijskih plinova

[Design and Implementation of a Gas Generating System for Complex Gas Mixtures and Calibration Gases]

Globalni okvir utvrđen Pariškim sporazumom za ublažavanje emisija stakleničkih plinova i ograničenje globalnog zatopljenja glavni je socioekonomski izazov za mnoge industrije s visokim emisijama. Posljednjih godina tehnološka poboljšanja i razvoj učinkovitijih procesa stalno smanjuju potražnju za energijom i emisiju stakleničkih plinova. U međuvremenu je termokemijska učinkovitost nekih od trenutačnih tehnologija postala gotovo optimalna. Uvođenjem dodatnih tehnoloških inovacija gotovo da nema mogućnosti smanjenja emisije stakleničkih plinova. Stoga se daljnje smanjenje može postići samo radikalnim, novim proizvodnim procesima ili integriranim proizvodnim mrežama kad neizbježne emisije dimnih plinova iz jedne proizvodnje služe kao sirovina druge kemijske proizvodnje.

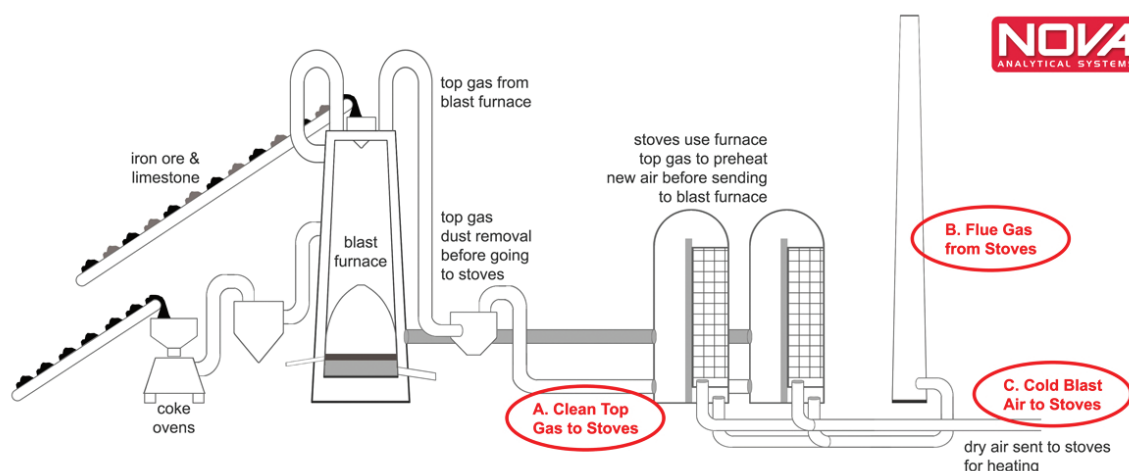
Dizajn sustava za proizvodnju složenih plinskih smjesa temelji se na podacima dobivenim stehiometrijskim proračunima

Vijkom se pokreće aksijalno kretanje otopine proizvoda i ograničava se neželjeno aksijalno miješanje. Ta konstrukcija rezultira uskom raspodjelom vremena boravka i time promiče definiranu kvalitetu proizvoda. Da bi se kvantitativno procijenile karakteristike protoka kristalizatora i istaknuo utjecaj promjenjivih radnih parametara kao što su brzina vrtnje i volumetrijski protok, u radu se analizira utjecaj vremena zadržavanja s varijacijom ostalih radnih parametara.

dimnih plinova iz industrije za proizvodnju čelika, koji sugeriraju više od 250 potencijalnih komponenata. Komponente se mogu klasificirati na temelju njihove koncentracije u tri kategorije: glavne (5 % do 99 %), minorne (0,1 % do 5 %) i komponente u tragovima (<0,1 %). Skupina komponenata u tragovima najveća je kategorija s obzirom na broj spojeva s više od 500 članova. Predstavlja samo 0,1 % do 1 % spojeva dimnih plinova i čine ju kemikalije koje uključuju organske spojeve koji sadrže sumpor i dušik, alkane, olefine, aromatične tvari i policikličke aromatske ugljikovodike.

U radu je opisan sustav za proizvodnju složenih plinskih smjesa dizajniran za oponašanje stvarnih industrijskih matrica plina s tragovima u rasponu od niskih pptv do visokih ppmv te minornim i glavnim komponentama u rasponu od niskih do visokih postotaka s promjenjivom razinom relativne vlažnosti (0 % do 80 % RH). Taj proizvodni sustav kombinira različite metode stvaranja plinova za proučavanje uzoraka fragmentacije u kontroliranim uvjetima, primjene alternativnih sirovina u katalitičkim procesima, kao i izvedbe procesa pročišćavanja i kondicioniranja plinova.

Chem. Ing. Tech. 92 (10) (2020) 1574–1585



Slika 3 – Tri položaja za analizu plinova u čeličanama. Analizatori plina mogu se upotrebljavati za praćenje atmosferskih plinova i dimnih plinova u čeličanama i drugim teškim industrijama. Izrada čelika je teška industrija koja uključuje postupak proizvodnje čelika od željezne rude, izravno reduciranih proizvoda od željeza i/ili otpada. Osnovne i elektrolučne peći danas su najviše u primjeni za proizvodnju čelika. U osnovnom procesu kao glavni ulaz upotrebljavaju se tekuće sirovo željezo iz visoke peći i staro željezo. U postupku elektrolučne peći upotrebljava se otpadni čelik ili izravno reducirano željezo. Izlazni dimni plinovi mogu sadržavati jako velik broj spojeva u različitim postotcima. Istraživanjima se pokušava pronaći primjena za spojeve iz dimnih plinova čeličane (izvor: <https://www.nova-gas.com/>).

Nils Tenhumberg, Karsten Bükler

Ekološka i ekonomska procjena proizvodnje vodika različitim tehnologijama elektrolize vode

[Ecological and Economic Evaluation of Hydrogen Production by Different Water Electrolysis Technologies]

Zeleni ili niskougljični vodik igra ključnu ulogu u iskorištavanju tokova ugljikova dioksida ili tokova koji sadrže ugljikov dioksid za proizvodnju vrijednih kemikalija poput sintetskog metana, metanola ili obnovljivih goriva. Uz godišnju svjetsku proizvodnju od oko 61 milijuna tona, vodik je već nužan bazni materijal za kemijsku i petrokemijsku industriju. Najveće količine troše se u rafinerijama, u proizvodnji amonijaka i u proizvodnji metanola. Gotovo 96 % cjelokupnog vodika potječe iz fosilnih izvora, uglavnom iz prirodnog plina putem parnog reformiranja metana (engl. *steam methane reforming*, SMR). Elektroliza vode se primjenjuje za proizvodnju malih količina vodika relativno visoke čistoće i može biti ekonomski isplativa za male pogone generacije vodika u područjima s jeftinom električnom energijom.

Različite tehnologije proizvodnje vodika iz obnovljivih i neobnovljivih izvora razvijene su s ciljem proizvodnje po konkurentnim troškovima, ali s manjim utjecajem na okoliš od najsvremenije komercijalne proizvodnje vodika. Vodik s niskim udjelom ugljika može se dobiti pirolizom metana, rasplinjavanjem biomase ili elektrolizom vode uporebljujući obnovljive izvore poput vjetroelektrana i solarnih ili nuklearnih elektrana.

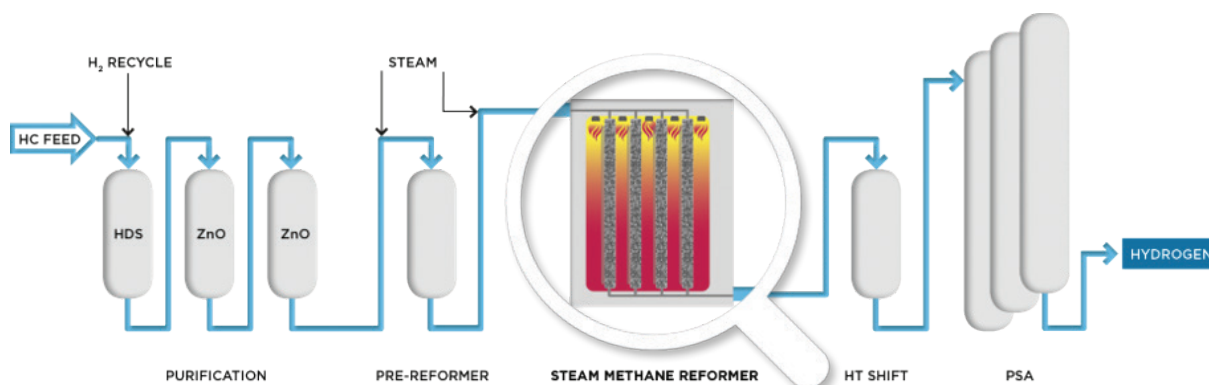
Ovaj rad predstavlja procjenu različitih tehnologija elektrolize vode s obzirom na njihovu specifičnu potražnju za energijom, ugljični otisak i predviđene troškove proizvodnje u 2030. Iz trenutne perspektive alkalna elektroliza vode procjenjuje se kao najpovoljnija tehnologija za ekonomičnu proizvodnju vodika s niskim udjelom ugljika iz obnovljivih izvora.



Slika 4 – Sustav za adsorpciju pod promjenjivim tlakom (engl. *Pressure Swing Adsorption*, PSA) se primjenjuje za oporabu i pročišćavanje vodika iz raznih struja bogatih vodikom. Tehnologija se oslanja na razlike u adsorpcijskim svojstvima plinova da bi ih se razdvojilo pod tlakom i učinkovit je način proizvodnje vrlo čistog vodika.

Ulazni plin za adsorpciju pod promjenjivim tlakom može biti sirovi vodik iz raznih izvora, uključujući parno reformiranje metana, djelomičnu oksidaciju, kriogeno pročišćavanje, otpadne plinove nakon pročišćavanja pogona za proizvodnju metanola, etilena i stirena te iz plinskih postrojenja i postrojenja za proizvodnju amonijaka. Tijekom procesa adsorpcije pod promjenjivim tlakom, vodik se obnavlja i pročišćava pod tlakom blizu tlaka dovoda, dok se adsorbirane nečistoće uklanjaju snižavanjem tlaka. Otpadni plin, koji sadrži nečistoće, može se čak i bez kompresora vratiti natrag u sustav s gorivom. Cijeli postupak je automatski (izvor: <http://www.cottinginc.com/>).

Chem. Ing. Tech. 92 (10) (2020) 1586–1595



Slika 5 – Parno reformiranje metana (engl. *steam methane reforming*, SMR) daleko je najvažniji industrijski postupak za proizvodnju vodika. Njime se proizvodi oko 80 % vodika proizvedenog u SAD-u i 40 % u svijetu.

Najprije se prirodni plin prije miješanja s parom prethodno zagrije i iz njega ukloni sumpor. Metan reagira s parom u prisutnosti katalizatora dajući vodik, ugljikov monoksid i malu količinu ugljikova dioksida. Nakon toga, u sustavu za adsorpciju pod promjenjivim tlakom (engl. *Pressure Swing Adsorption*, PSA) ugljikov dioksid i druge nečistoće uklanjaju se iz struje plina, ostavljajući čisti vodik. Desorbirani plin iz sustava za adsorpciju pod promjenjivim tlakom može se rabiti kao gorivo za izgaranje u reformeru. Ta je tehnologija najpovoljnija tamo gdje je prirodni plin lako dostupan. Budući da ima najmanje operativne troškove, ta tehnologija je najpoželjnija za veće kapacitete (izvor: <https://www.clariant.com/>).