DOI broj: 10.5937/rudarstvo26183J

KAKO KRUŽNA ŠARŽA UTIČE NA POVEĆANJE PRINOSA, STABILNOST I KVALITET PROIZVODA

ENHANCING PROCESS PERFORMANCE: THE IMPACT OF THE RECYCLE LOOP ON YIELD, STABILITY, AND QUALITY

Vladimir Jovanović[1], Dejan Todorović[1], Sonja Milićević[1], Branislav Ivošević[1], Aleksej Kornev[1], Dragan Radulović[1], Pavle Stjepanović[2]

v.jovanovic@itnms.ac.rs

[1] – Institut za tehnologiju nulearnih i drugih mineralnih sirovina, Franše d'Eparea 86, Beograd;[2] – Rudarski institut, Batajnički drum 2, Zemun, Beograd

Apstrakt

Iako su bezbrojni sati posvećeni razvoju procesa, inženjeringu odgovarajuće opreme i izboru optimalnih dobavljača, jedan često zanemarivan, ali izuzetno važan aspekt uspešne proizvodne linije predstavlja kružna šarža (cirkulatuvna šarža, petlja reciklaže). Ova tema je posebno značajna kada se govori o obradi rasutih čvrstih materija. Postrojenja za obradu rasutih čvrstih materija ne funkcionišu kao linearni procesi, već kao dinamički cirkulišući sistemi, a kružna šarža je ključni element koji upravlja tom cirkulacijom. Bez obzira na to da li se radi o granulisanju đubriva, peletizaciji katalizatora ili sušenju krečnjaka, integracija i dizajn kružne šarže imaju značajan uticaj na efikasnost i prinos procesa. U ovim sistemima, kružna šarža nije samo sredstvo za povratak materijala koji nije u skladu sa specifikacijama — ona je mehanizam koji omogućava doslednu proizvodnju sa visokim prinosom.

Ključne reči: *kružna šarža, kontrola procesa, kvalitet proizvoda, prinos procesa*

Abstract

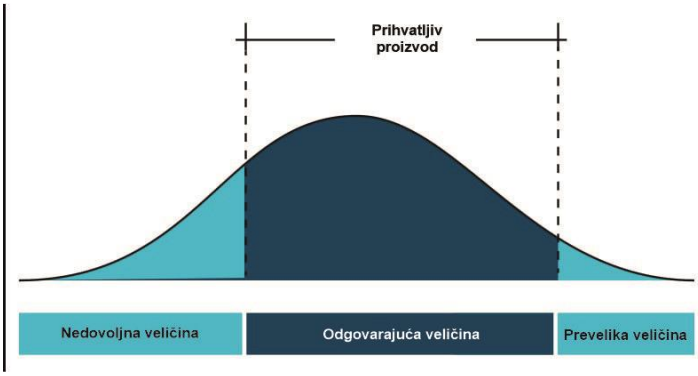
Although countless hours are devoted to process development, engineering of appropriate equipment, and the selection of optimal suppliers, one often overlooked yet extremely important aspect of a successful production line is the recycle loop (circulating batch, recycling loop). This topic is particularly significant when dealing with the processing of bulk solid materials. Plants for processing bulk solids do not operate as linear processes but rather as dynamic circulating systems, with the recycle loop being the key element that governs this circulation. Whether it involves fertilizer granulation, catalyst pelletization, or limestone drying, the integration and design of the recycle loop have a significant impact on

process efficiency and yield. In these systems, the recycle loop is not merely a means of returning out-of-spec material—it is a mechanism that enables consistent, high-yield production.
Keywords: *recycle loop, process control, product quality, process yield*

UVOD

Definicija kružne šarže

Kružna šarža se koristi u industrijskim procesima kako bi se usmerio materijal koji ne ispunjava specifikacije dalje od proizvoda koji odgovara tim normama, ponovo ga šaljući kroz proces kao sirovinu. Ova metoda omogućava ponovnu obradu proizvoda koji ne zadovoljava određene standarde, čime se maksimizira ukupni prinos. Širok spektar industrijskih i hemijskih procesa koristi kružnu šaržu, ali njen značaj postaje posebno očigledan kada se obrada odnosi na rasute čvrste materije. Iako bi idealno bilo da proces proizvede 100% proizvoda unutar specifikacija u jednom prolazu, u stvarnosti, retko koji proces može da postigne ovaj cilj. Postizanje 100% prinosa unutar specifikacije postaje još manje izvodljivo kada su rasute čvrste materije u pitanju, jer je matematički nemoguće ostvariti visok prinos bez kružne šarže[1]. Drugim rečima, bez obzira na to koliko pažljivo je proces dizajniran, samo deo materijala će ispuniti specifikacije svaki put kada prođe kroz sistem. Ovo se pretežno dešava zato što rasute čvrste materije sadrže milione pojedinačnih čestica (bilo da se radi o granuli ili prahu), pa se ne može očekivati da se svaka čestica ponaša identično tokom celog proizvodnog procesa. Sudari čestica, neujednačena izloženost obradnim sredstvima, oscilacije u hranjenju i mnogi drugi faktori utiču na način na koji se različite čestice kreću kroz proces i šta doživljavaju tokom tog vremena. Kao rezultat, izlaz se sastoji od različitih atributa kvaliteta, pri čemu samo deo dobijenog materijala ispunjava specifikacije u bilo kojem pojedinačnom prolazu.



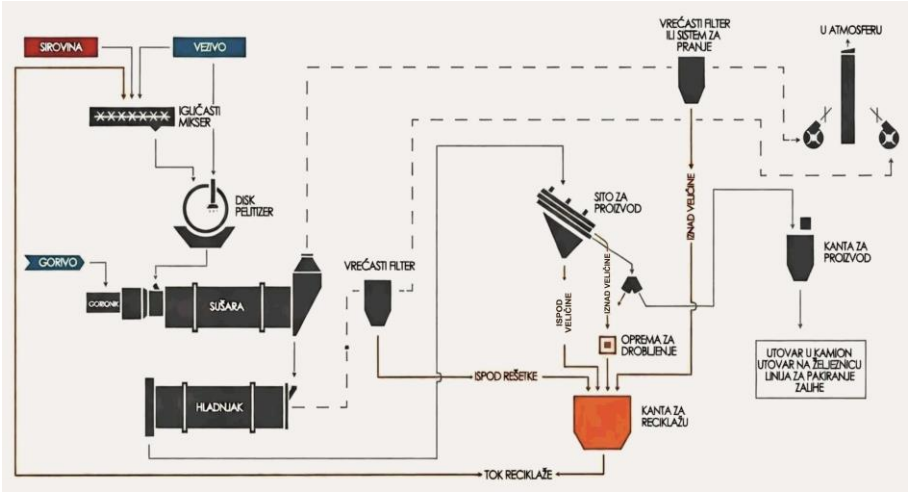
Slika 1. Ova kriva zvona ilustruje raspodelu veličine čestica (PSD) tipičnog izlaza procesa, prikazujući deo "većih" i "manjih" čestica koje bi se vraćale u proces kao reciklaža. [2]

U mnogim operacijama, ovaj "povratni" prinos unutar specifikacije može biti samo između 30% i 70%. Ako ne postoji kružna šarža, preostali materijal bi bio izgubljen kao otpad. S obzirom na uključivanje kružne šarže, međutim, čestice van specifikacije dobijaju više prilika za kondicioniranje, sušenje ili rast do specifikacije, čime se ukupni prinos postrojenja može približiti 95% do 99%. Kao posledica, povratni (reciklažni) materijal čini većinu materijala koji prolazi kroz postrojenje u bilo kojem trenutku. Na primer, postrojenje sa kapacitetom od 50 t/h može imati između 200 i 400 t/h materijala koji teče kroz njega. Kao rezultat toga, oprema za procesiranje se dimenzioniše ne samo prema brzini gotovog proizvoda, već i prema ukupnoj cirkulišućoj masi koju pokreće petlja reciklaže. Na kraju, uključivanje kružne šarže transformiše varijabilan proces u sistem visoke efikasnosti.

Funkcionisanje kružne šarže

Materijal se analizira prema ciljnim kvalitetnim specifikacijama — bilo da se radi o temperaturi, sadržaju vlage, veličini čestica ili drugim relevantnim faktorima. Materijal koji ne ispunjava specifikacije ponovo se uvodi u proces. U zavisnosti od tipa procesa, može biti potreban korak predobrade kako bi se osiguralo da materijal zadovoljava idealne zahteve za hranjenje. Na primer, kada proizvod mora da zadovolji određenu raspodelu veličine čestica (PSD), kao što je slučaj u procesu granulisanja đubriva, kružna šarža često uključuje opremu za smanjenje veličine kako bi se razbile veće granule pre ponovnog uvođenja. [3] Manji proizvodi, često u kombinaciji sa sitnim česticama prikupljenim iz sistema za hvatanje čestica,

kombinuju se sa usitnjenim većim materijalom i vraćaju se na početak procesa, kako je prikazano na slici 2.



Slika 2. Kružna šarža u ovom dijagramu toka peletizacije je istaknuta narandžastom bojom, pokazujući način na koji se manji i veći proizvodi preusmeravaju nazad na početak, pri čemu se veći najpre usitnjavaju. [4]

PREDNOSTI KRUŽNE ŠARŽE

Iako je poboljšanje prinosa često najočiglednija korist, prava vrednost kružne šarže postaje očigledna kroz njenu ulogu u stabilizaciji i omogućavanju samog procesa. Dobro dizajnirana kružna šarža osigurava:

Operativnu stabilnost Pored unapređenja prinosa, kružna šarža igra ključnu ulogu u stabilizaciji operacija sa rasutim čvrstim materijama. Pošto reciklirani materijal obično čini većinu mase koja prolazi kroz sistem, on deluje kao toplotni, mehanički i vlažni amortizer, ublažavajući kratkoročne fluktuacije u brzini hranjenja, sastavu i operativnim uslovima. Topli, delimično sušeni ili delimično obrađeni reciklirani materijal pomaže u ublažavanju temperaturnih oscilacija, umanjuje sadržaj vlage i obezbeđuje doslednu populaciju čestica unutar opreme za proizvodnju. Ova cirkulišuća masa praktično apsorbuje poremećaje koji bi inače mogli da se prenesu kroz proces, omogućavajući postrojenju da zadrži stabilnu operaciju čak i kada se

uslovi u gornjim nivoima menjaju [5]. Na ovaj način, kružna šarža funkcioniše kao jedan od najvažnijih kontrolnih elemenata u celokupnom toku.

Sposobnost granulisanja U sistemima vlažnog granulisanja (peletizacije), gde se granule formiraju slojevima, manje granule predstavljaju ključnu sirovinu "seme peleta", koja je idealna za akumuliranje slojeva potrebnih za rast. U procesu granulisanja finog praha, proces bez reciklažne struje oslanjao bi se isključivo na prah sirovine, što može dovesti do prekomernog stvaranja sitnih čestica i slabog rasta granula.

Smanjenje otpada Korišćenje kružne šarže ne samo da sprečava gubitak materijala u obliku proizvoda van specifikacije, već takođe omogućava proizvođaču da uhvati i valorizuje druge izvore otpada, najčešće sitne čestice prikupljene iz sistema za hvatanje. Često se prašina i sitne čestice prikupljene tokom tretmana ispušnih gasova nažalost odbacuju kao otpad jer ne postoji lak način za njihovu upotrebu. Međutim, ponovnim slanjem ovih prikupljenih sitnih čestica kroz proces kao deo kružne šarže, proizvođači mogu ostvariti vrednost koju sadrži ovaj otpad. Dodatno, u slučaju granulisanja, ova sirovina u obliku sitnih čestica pruža dragocen izvor materijala potrebnog za rast peleta.

Zašto je važna kontrola kružne šarže?

Jedan od najvažnijih aspekata kružne šarže je sposobnost pravilnog upravljanja njome. Kao što je već pomenuto, reciklirane čestice predstavljaju najveći deo sirovine koja ulazi u sistem u mnogim postrojenjima, često između 70% i 90% u sistemima peletizacije i granulisanja. To ukazuje na to da kružna šarža značajno utiče na ukupne karakteristike hranjenja. Pravilna kontrola, koja se često vrši korišćenjem rezervoara i hranilica, omogućava prerađivačima da upravljaju distribucijom materijala tako što kontrolišu koliko reciklaže ulazi u proces.Bez adekvatne kontrole, kružna šarža može izazvati nestabilnost cele proizvodne linije, što dovodi do problema kao što su nestabilnost sušača, preopterećenje drobilice, pojavljivanje prašine i sitnih čestica, kao i formiranje blata ili drugih proizvodnih nedostataka.[6] U mnogim slučajevima, ovi problemi se pogrešno pripisuju opremi ili operativnim uslovima u gornjim nivoima, dok je pravi uzrok neuravnotežena ili loše kontrolisana kružna šarža.Upravljanje količinom reciklaže takođe je važno iz drugih razloga; ako postrojenje proizvodi previše reciklaže, skladištenje i rukovanje mogu postati problematični. S druge strane, ako postrojenje proizvodi premalo, operateri se mogu suočiti sa teškoćama u održavanju stabilnog rada linije i mogu doživeti poremećaje u procesu. Iz ovih razloga, ključno je da operateri prate stopu

reciklaže, vršeći prilagođavanja ulazu reciklaže kada je to potrebno. Hranilica za gubitak težine je idealna za merenje reciklaže, ali često nije ekonomski isplativa. Mnogi operateri će umesto toga pratiti struju konvejera i dizalica za reciklažu, pri čemu viša ili niža amperaža pokazuje više ili manje prisutne reciklaže.

Kontrola sastava reciklaže

Pošto se kružna šarža koristi za stabilizaciju procesa i čini značajan deo ulazne sirovine, sastav reciklažne struje je od vitalnog značaja za upravljanje. Ako se sastav reciklaže previše pomeri u jednom pravcu, ceo proces može postati nestabilan. Stoga, raspodela veličine čestica, temperatura, sadržaj vlage i druge važne specifikacije kvaliteta proizvoda unutar kružne šarže moraju se meriti i pratiti tokom vremena, uz prilagođavanja od strane operatera kada je to potrebno. Prikladna raspodela parametara osigurava da hranjenje, a time i proizvod, ostane dosledan.

Kako se izračunava stopa reciklaže?

Za razliku od stope hranjenja ili brzine bubnja, stopa reciklaže nije direktno postavljena od strane operatera — ona je rezultat metrike koja ukazuje na to kako proces funkcioniše. Stvarna stopa reciklaže u postrojenju može se neprekidno menjati, dok operateri nastoje da održe proces blizu ili na poznatoj idealnoj brzini. Stopa reciklaže se obično izražava kao delovi celokupnog; na primer, tri dela reciklaže na jedan deo sirove hrane predstavljaju ukupni protok od četiri dela. U ovom primeru, očekivalo bi se da proces proizvede približno 25% prinosa, s obzirom na to da se u stabilnom procesu količina sirovog materijala koja ulazi u sistem očekuje da napusti sistem kao gotov proizvod.

Ukupni protok:
Ukupno = 3 + 1 = 4 dela

Prinos (gotov proizvod iz sirovog ulaza):
Prinos = (Sirovina) / (Ukupni protok) = 1/4 = 0,25 = 25%

Pretpostavka stacionarnog stanja:
Ulaz sirovine ≈ izlaz gotovog proizvoda

Idealna stopa reciklaže varira među operacijama, pri čemu niz specifičnih faktora procesa utiče na to, uključujući koliko su uske specifikacije proizvoda, ponašanje čestica i efikasnost separacije. Takođe, stopa reciklaže može se smatrati odrazom složenosti procesa. Neka postrojenja mogu smatrati stopu reciklaže 5 prema 1 prihvatljivom, dok druga postrojenja mogu postići stopu 2 prema 1.

Uspostavljanje stope reciklaže tokom dizajniranja procesa

Idealo, stopa reciklaže treba da se drži što je moguće niže, jer više stope reciklaže zahtevaju opremu koja može da podnese veći ukupni protok materijala, iako se količina gotovog proizvoda ne menja. Iz ovih razloga, utvrđivanje prave stope reciklaže tokom razvoja procesa je ključno kako bi se osiguralo da su sistem i oprema pravilno dimenzionisani i sposobni da funkcionišu efikasno bez nepotrebnih uskih grla.Ovo čini testiranje u okruženju razvoja procesa od suštinskog značaja. Ovde, kontinuirano testiranje omogućava operaterima da dovedu proces do optimalne proizvodnje i zatim mere proizvod i reciklažni otpad kako bi izračunali stopu. [7] Bez ovih podataka, oprema se često dimenzioniše na osnovu pretpostavki koje ne uzimaju u obzir stvarno ponašanje reciklaže, što dovodi do hroničnih uskih grla, nestabilnosti ili skupih retrofita.

Upravljanje reciklažom u postojećim postrojenjima

Nedostatak razumevanja uloge reciklaže u procesu, često u kombinaciji sa nedovoljnom kontrolom, dovodi mnoge operacije da se bore sa svojim kružnim šaržama, videći ih kao smetnju umesto kao moćan alat koji one predstavljaju. Dodatno, neuravnoteženje u stopi reciklaže možda neće uvek biti očigledno, što može rezultirati naizgled neobjašnjivim poremećajima u procesu, niskim prinosom unutar specifikacije i problemima sa kvalitetom proizvoda. U takvim slučajevima, preporučuje se da postrojenje prođe kroz procesnu reviziju.

Bez obzira na to da li je kružna šarža uzrok problema, procesna revizija pomaže da se otkriju uzroci problema sa kvalitetom proizvoda i prinosom, često identifikujući neefikasnosti usput.[8] Ova vrsta dubinske analize procesa igra ključnu ulogu u ponovnom uspostavljanju ravnoteže procesa i maksimizaciji efikasnosti i prinosa kada se pojave problemi u proizvodnji.Revizije procesa takođe mogu pomoći operaterima da dublje razumeju svoj proces i kako se stopa reciklaže može koristiti da ublaži fluktuacije i održi kvalitet proizvoda.

ZAKLJUČAK

Iako se često zanemaruje, kružna šarža nije opcionalna u obradi rasutih čvrstih materija — ona je od suštinskog značaja za održavanje stabilne operacije i postizanje maksimalnog prinosa unutar specifikacije. Kada je pravilno dizajnirana i kontrolisana, kružna šarža postaje osnova celog procesa, upravljajući rastom granula, energetskom efikasnošću, uniformnošću proizvoda i ukupnim protokom.

Zahvalnica: Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije na finansijskoj podršci istraživanjima (ugovor 451-03-33/2026-03/200023).

REFERENCE

1. Brown, C. D. & Green, L. (2021). "The role of recycling loops in the processing of bulk solids", International Journal of Chemical Engineering. Istražuje granice efikasnosti u procesima kada se uključuju reciklažne petlje.
2. https://feeco.com/wp-content/uploads/2022/07/Granular-Fertilizer-Equipment-and-Systems.pdf
3. He, Y., & Liu, Z. (2020). "Impacts of recycled material on product quality and process efficiency", Chemical Engineering Journal. Članak se fokusira na uticaj reciklanih materijala na kvalitet gotovih proizvoda i efikasnost procesa.
4. https://feeco.com/wp-content/uploads/2022/07/FEECO-Mining-and-Mineral-Processing-Capabilities.pdf
5. Marković, M. & Petrović, D. (2020). "Uticaj reciklaže na prinose i stabilnost u industriji.", Časopis za Hemiju, Tehnologiju i Inženjerstvo. Ovaj članak istražuje kako reciklažne petlje utiču na produktivnost i stabilnost operacija u industriji.
6. Petersen, H. (2022). "Recycling in Bulk Solids Processing: Challenges and Opportunities", Materials Science Engineering Reviews. Ovaj članak razmatra izazove i mogućnosti reciklaže materijala u industrijskim procesima.
7. Smith, J. R., & Thompson, A. B. (2019). "Optimization of recycle loops in bulk solid processing systems", Journal of Process Engineering. Ovaj članak detaljno analizira optimizaciju petlji reciklaže u sistemima koji se bave obradom rasutih čvrstih materija.
8. Karaman, A. & Chang, X. (2023). "Managing the recycling process: Key performance indicators and methodologies", Journal of Manufacturing Processes. Ovaj rad obrađuje mjere uspešnosti i metodologije upravljanja reciklažnicima.

Vladimir Jovanović v.jovanovic@itnms.ac.rs
ORCID:0000-0001-6069-1630
Dejan Todorović d.todorovic@itnms.ac.rs
ORCID 0000-0002-2776-3388
Sonja Milićević s.milicevic@itnms.ac.rs
ORCID 0000-0001-8929-1673
Branislav Ivošević b.ivosevic@itnms.ac.rs
0000-000109445-8159
Aleksej Kornev a.kornev@itnms.acrs
0000-0002-4217-4063
Dragan Radulović d.radulovic@itnms.ac.rs
Pavle Stjepanović pavle.stjepanovic@ribeograd.co.rs
0000-0001-5458-7968
DOI broj: 10.5937/rudarstvo26191S