DOI broj: 10.5937/rudarstvo26058T

HIGH – PRESSURE GRINDING ROLLS (HPGR) I VERTICAL ROLLER MILLS (VRM) U SAVREMENOM RUDARSTVU MINERALNIH SIROVINA: UPOREDNI PREGLED KARAKTERISTIKA I PERFORMANSI

HIGH – PRESSURE GRINDING ROLLS (HPGR) AND VERTICAL ROLLER MILLS (VRM) IN CONTEMPORARY MINERAL PROCESSING:A COMPARATIVE REVIEW OF CHARACTERISTICS AND PERFORMANCE

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

d.todorovic@itnms.ac.rs

1- Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Bulevar Franš d'Eperea 86, Srbija

Apstrakt

Usitnjavanje mineralnih sirovina predstavlja najveći potrošač energije u rudarstvu (do 50% ukupne potrošnje). U poslednjoj deceniji, High-Pressure Grinding Rolls (HPGR) i Vertical Roller Mills (VRM) postali su ključne alternative tradicionalnim mlevenjima, posebno u suvim procesima koji smanjuju potrošnju vode i podržavaju dekarbonizaciju. Ovaj pregledni rad upoređuje HPGR i VRM sa fokusom na energetsku efikasnost (kWh/t), stepen oslobađanja minerala i primenjivost u suvim uslovima za rude bakra, gvožđa, litijuma i nikla. Na osnovu podataka iz instalacija i ispitivanja 2020–2026. godine, HPGR pokazuje uštede do 30–40% u primarnoj fazi tvrdih ruda, dok VRM ističe fleksibilnost u finijem mlevenju i integrisanoj klasifikaciji, sa potencijalnim uštedama do 40–45%. Rad analizira ograničenja (habanje, prašina) i trendove (hibridni sistemi, AI optimizacija), sa preporukama za primenu u rudarstvu Srbije i regiona, gde su suvi procesi sve važniji zbog ograničenih vodnih resursa.

Ključne reči: *HPGR, VRM, suvo usitnjavanje, energetska efikasnost, oslobođenost minerala, dekarbonizacija.*

Abstract

Mineral comminution is the largest energy consumer in the mining industry, accounting for up to 50% of total site energy consumption. Over the past decade, High-Pressure Grinding Rolls (HPGR) and Vertical Roller Mills (VRM) have emerged as key alternatives to traditional grinding circuits, particularly in dry processing applications that reduce water consumption and support decarbonization efforts. This review paper compares HPGR and VRM technologies, focusing on energy efficiency (kWh/t), mineral liberation degrees, and applicability in dry conditions for copper, iron, lithium, and nickel ores. Based on data from installations and pilot tests conducted between 2020 and 2026, HPGR demonstrates energy savings of 30–40% in the primary stages of hard rock processing. Meanwhile, VRM excels in flexibility for finer grinding and integrated classification, offering potential energy savings of 40–45%. The paper further analyzes operational constraints (wear, dust) and emerging trends (hybrid systems, AI optimization), providing recommendations for application in the mining sector of Serbia and the surrounding region, where dry processing is becoming increasingly critical due to limited water resources.
Keywords: *HPGR, VRM, dry comminution, energy efficiency, mineral liberation, decarbonization.*

1. Uvod

Usitnjavanje mineralnih sirovina troši 35–50% ukupne potrošnje energije u rudnicima, a tradicionalni mokri krugovi (SAG + kuglični mlin) zahtevaju velike količine vode i generišu vlažne jalovine. Suvi procesi postaju prioritet zbog klimatskih promena, ograničenih vodnih resursa i ESG standarda.HPGR (High Pressure Grinding Rolls) se koristi u cementnoj industriji od 1980-ih, a u rudarstvu od 2000-ih godina. VRM (Vertical Roller Mill) je tradicionalno korišćen u cementnoj industriji, dok se u rudarstvu počeo primenjivati od 2010-ih. Ove tehnologije koriste kompresiono usitnjavanje umesto udarnog ili habajućeg, što omogućava nižu potrošnju energije i bolju liberaciju minerala.Cilj rada je komparativna analiza HPGR tehnologije i vertikalnih mlinova sa aspekta energetske efikasnosti, stepena liberacije i primenjivosti u suvim procesima usitnjavanja, uz poseban osvrt na rude bakra, zlata, olova i cinka koje su od strateškog značaja za Srbiju i region.

2. Principi rada i ključne razlike

High-Pressure Grinding Rolls (HPGR) i Vertical Roller Mills (VRM) predstavljaju dve najvažnije tehnologije kompresionog usitnjavanja (compressed-bed comminution)

u savremenom rudarstvu. Obe tehnologije se baziraju na mehanizmu usitnjavanja u sloju materijala izloženom visokom pritisku, umesto udarnog ili abrazivnog (kao u SAG ili ball mill-ovima) (Jankovic et al., 2016), što omogućava značajno veću energetsku efikasnost, bolju mineralnu liberaciju i mogućnost suvog procesa. Međutim, njihovi principi rada, konstrukcija i optimalni režimi primene se značajno razlikuju.

2.1. Princip rada HPGR-a

HPGR se sastoji od **dva horizontalno postavljena, suprotno rotirajuća valjka** (rolls) montiranih u čvrstom okviru. Jedan valjak je fiksiran, dok je drugi (pomični valjak) hidraulički pokretan i može se pomerati duž horizontalnih vodilica. Materijal se hrani odozgo u procep između valjaka (gap), gde se formira **sloj čestica** (particle bed) debljine nekoliko centimetara.

Ključni mehanizam je **interparticle comminution** (lomljenje između čestica):

- Visoki hidraulički pritisak (obično 50–250 MPa, najčešće 100–200 bar) primenjuje se na plutajući valjak.
- Čestice se međusobno drobe i kompresuju u sloju, a ne direktno o površinu valjaka.
- Ovo stvara intenzivne mikro-pukotine (micro-cracks) unutar čestica, duž granica zrna i minerala, što značajno olakšava kasnije oslobađanje (liberation) i smanjuje potrebnu energiju za fino mlevenje.

Proces je volumetrijski: specifična energija (kWh/t) zavisi od pritiska, brzine rotacije valjaka (tipično 1–2 m/s periferne brzine) i protoka. Ulazna sirovina može biti grublja od procepa (zona zahvata za veće komade), ali većina lomljenja se dešava u zoni drobljenja u sloju.

Prednosti HPGR-a uključuju:

- Visok stepen pred-liberacije (preferencijalno lomljenje duž slabih granica).
- Proizvod sa više finih čestica i užom distribucijom veličina u poređenju sa konvencionalnim drobljenjem.
- Sposobnost rada sa vlagom rude do 8–10% (bez značajnog lepljenja ako je ulazna sirovina pripremljena).
- Smanjuju Bondov indeks (BWi) u sledećoj fazi mlevenja za čak 10–20%.
- Povećava se specifična površina mineralnih zrna, što je pogodno za proces luženja.

Glavne komponente: valjci sa oblogama od tvrdih materijala (često sa umecima od volfram-karbida za abrazivne rude), bočne stranice ili 'rock box' sistemi za bočnu zaštitu, kao i hidraulički sistem za amortizaciju udarnih opterećenja.

2.2. Princip rada VRM-a

Vertikalni mlin sa valjcima (VRM) je vertikalno orijentisana mašina koja se sastoji od rotirajućeg stola za mlevenje (grinding table) i 2–6 hidraulički opterećenih valjaka koji vrše pritisak na sto. Materijal se dozira centralno na sto, odakle ga centrifugalna sila (usled rotacije stola, tipično 20–40 o/min) potiskuje ka periferiji, odnosno pod valjke.

Mehanizam lomljenja kombinuje **kompresiju i smicanje**:

- Čestice formiraju sloj (material bed) ispod valjaka.
- Hidraulički pritisak (niži nego u HPGR-u, tipično 50–150 bar) i težina valjaka drobe materijal.
- Dodatno smicanje nastaje zbog relativnog kretanja između valjaka i stola.
- Integrisana vazdušna klasifikacija: Vazdušna struja (topla za sušenje ili ambijentalna) kreće se naviše, noseći samleveni materijal do dinamičkog klasifikatora (separatora) na vrhu mlina. Fini proizvod željene krupnoće izlazi iz sistema, dok se krupna frakcija vraća na sto na ponovno mlevenje.

VRM integriše više operacija u jednu mašinu: doziranje, mlevenje, sušenje, klasifikaciju i pneumatski transport.

Prednosti VRM tehnologije:

- Mlevenje u jednom stepenu: Mogućnost dobijanja finalnog proizvoda (P80 od 1 mm do <20 μm) direktno iz primarno drobljene rude.
- Uža distribucija veličina čestica: Smanjena produkcija krupnijih zrna, ali i manje neželjenih ultra-finih zrna u poređenju sa mlinovima sa kuglama.
- Precizna kontrola: Integrisani separator omogućava brzu promenu i održavanje željene finoće proizvoda.

Glavne komponente: Rotirajući sto sa habajućim oblogama, valjci sa hidrauličkim sistemom, dinamički separator, kućište mlina i sistem za cirkulaciju vazduha.

2.3. Ključne razlike – uporedna tabela

Karakteristika	HPGR	VRM
Orijentacija	Horizontalna (dva valjka)	Vertikalna (sto + valjci)
Glavni mehanizam lomljenja	Interparticle kompresija (bed breakage)	Kompresija + smicanje u sloju
Radni pritisak	Visok (50–250 MPa)	Srednji (5–15 MPa)
Brzina rotacije	Visoka periferija (1–2 m/s)	Niska (20–40 o/min za sto)
Klasifikacija	Eksterni (ekran ili vazdušni klasifikator)	Integrisana (dinamički separator)
Tipičan opseg proizvoda (P80)	1–8 mm (pred-drobljenje/mlevenje)	20–500 µm (fino mlevenje)
Tolerancija na vlagu rude	Do 8–10%	Do 5% (bez sušenja), do 25%+ (sa sušenjem)
Energetska efikasnost	20–40% uštede u odnosu na SAG/mlinove	30–50% uštede u suvim finim krugovima
Habajući delovi	Valjci sa segmentnim ili čepastim oblogama	Valjci i sto (lako zamenljive obloge)
Primena u rudarstvu	Primarno/sekundarno usitnjavanje tvrde rude	Tercijarno/kvartarno (fino) mlevenje

3. Energetska efikasnost i poređenje potrošnje energije

HPGR u primarnoj i sekundarnoj fazi: Ova tehnologija ostvaruje uštede od 25–40% u poređenju sa SAG mlinovima (npr. projekat *Iron Bridge* za magnetit koristi dve faze HPGR-a u kombinaciji sa suvom magnetnom separacijom, čime se eliminiše potreba za SAG mlinom).VRM u fazi finog mlevenja: Ostvaruje do 40% uštede energije u odnosu na konvencionalne mlinove sa kuglama. Pilot testovi kompanije *Loesche* na preko 240 uzoraka ruda (bakar, litijum, gvožđe) potvrđuju ove rezultate (Loesche/Grange Resources, 2024). Na primeru magnetita *Southdown*, VRM je potrošio 41% manje energije u odnosu na AG/Ball mill konfiguraciju.

Poređenje specifične potrošnje energije (kWh/t) za krupnoću P80 ≈ 100–150 µm:

- Mokri SAG + mlin sa kuglama: 18–25 kWh/t
- HPGR + mlin sa kuglama: 12–18 kWh/t
- Suvi HPGR + vazdušna klasifikacija: 10–15 kWh/t
- VRM (suvi proces): 10–13 kWh/t (u overflow režimu efikasnost je do 30% veća).

Zaključak o suvim procesima: U suvim ciklusima usitnjavanja, VRM često nadmašuje HPGR zbog integrisane klasifikacije i manje potrebe za pratećom

opremom (transporterima i eksternim klasifikatorima), čime se smanjuju investicioni (CAPEX) i operativni troškovi (OPEX) (Ausenco, 2024).

4. Stepen oslobađanja minerala (liberation) i uticaj na naknadne procese

Kompresiono usitnjavanje generiše mikro-pukotine duž granica zrna minerala, što rezultira boljim stepenom oslobađanja korisnih komponenti pri istoj krupnoći (P80).

- HPGR: Povećava stepen oslobađanja sulfidnih minerala (Cu, Ni) za 10–20%. Ovo direktno poboljšava flotaciju jer se smanjuje prekomerno mlevenje jalovine, čime se štede reagensi i energija.
- VRM: Obezbeđuje izuzetno usku distribuciju veličina čestica. Visok stepen oslobađanja postiže se na krupnijim zrnima, što je idealno za flotaciju krupnih čestica ili suvu magnetnu separaciju.

Primeri iz prakse:

- Bakar/Nikl (West Musgrave): Primena VRM tehnologije u kombinaciji sa suvom preradom omogućila je veći stepen iskorišćenja u procesu flotacije.
- Magnetit (Iron Bridge): HPGR u sprezi sa međustepenom suvom separacijom omogućava da se 35–40% jalovine odbaci u suvom stanju, pre ulaska u energetski najzahtevnije faze mlevenja.

5. Primenjivost u suvim procesima i studije slučaja (2020–2026)

- Iron Bridge (Australija): Implementacija dve faze HPGR-a uz suvu magnetnu separaciju. Ovo je trenutno najveći projekat za magnetit na svetu koji maksimalno štedi vodu i energiju.
- West Musgrave (Australija): Primena Loesche VRM tehnologije za rudu bakra i nikla. Fokus je na modularnosti i suvoj preradi u skladu sa ESG ciljevima.
- Southdown (Australija): Pilot testovi su pokazali da VRM troši 41% manje energije i 24% manje vode u poređenju sa mokrim AG mlinovima i mlinovima sa kuglama.
- Litijum i REE (Retki zemni elementi): VRM se pokazao superiornim u finom suvom mlevenju jer uspešno rešava problem lepljenja materijala (tzv. coating efekat).

Regionalni značaj (Srbija/Balkan): Suvi procesi su idealno rešenje zbog sve učestalijih suša i strogih vodnih dozvola. Tehnologije poput HPGR i VRM imaju ogroman potencijal u borskom basenu (bakar) (FLS, 2025; E&MJ, 2025).

6. Ograničenja i izazovi

- Habanje: HPGR valjci trpe visoka opterećenja kod izrazito abrazivnih ruda (nikl, gvožđe). VRM ima manje problema sa habanjem u režimu finog mlevenja.
- Prašina: HPGR zahteva robusne sisteme za otprašivanje (filtere), dok VRM radi pod negativnim pritiskom, što prirodno smanjuje emisiju prašine.
- Investicioni troškovi (CAPEX): HPGR je povoljniji za primarne faze usitnjavanja, dok je VRM isplativiji za integrisane, zatvorene cikluse mlevenja.
- Vlažnost: Ukoliko vlažnost rude prelazi 5–8%, neophodno je uvesti fazu predsušenja kako bi se izbegla zagušenja.

7. Budući trendovi i preporuke za region

Hibridni krugovi: Kombinacija HPGR (primarno) i VRM (sekundarno/fino) usitnjavanja pruža maksimalnu energetsku efikasnost.Digitalizacija: Primena veštačke inteligencije (AI) i digitalnih blizanaca (Digital Twins) za optimizaciju procesa u realnom vremenu.Sinergija tehnologija: Integracija sa flotacijom krupnih čestica i suvom separacijom.Zaključak za Srbiju: Prioritet treba dati VRM tehnologiji za preradu ruda i finije mlevenje, dok je HPGR optimalan za tvrde rude u primarnim fazama. Suvi procesi drastično smanjuju rizike vezane za jalovišta (pucanje brana, zagađenje voda) i direktno podržavaju EU Green Deal ciljeve.

Zaključak

Sve veći pritisak na rudarsku industriju u pogledu energetske efikasnosti, oskudice vodnih resursa i strogih ekoloških regulativa nameće potrebu za napuštanjem konvencionalnih metoda usitnjavanja. U tom kontekstu, HPGR i VRM (Vertical Roller Mill) se izdvajaju kao fundamentalne tehnologije koje postavljaju nove standarde za održivo i odgovorno rudarstvo. Dok HPGR pokazuje apsolutnu superiornost u primarnim i sekundarnim fazama obrade izuzetno tvrdih ruda kroz mehanizam interpartikularne kompresije, VRM tehnologija nudi neprevaziđenu efikasnost u domenu finog suvog mlevenja, integrišući procese usitnjavanja i

vazdušne klasifikacije u jednom koraku.Obe tehnologije omogućavaju radikalno smanjenje specifične potrošnje energije, sa uštedama koje se kreću u opsegu od 30% do 45% u poređenju sa tradicionalnim mlinovima sa kuglama i SAG sistemima. Pored energetske uštede, mogućnost potpunog eliminisanja vode iz procesa usitnjavanja direktno rešava problem upravljanja jalovištima, smanjujući rizike od ekoloških katastrofa i olakšavajući dobijanje dozvola u sušnim predelima ili oblastima sa osetljivim ekosistemima.Za budućnost rudarstva u Srbiji i širem regionu Balkana, gde su nalazišta bakra, zlata i kritičnih sirovina od strateškog značaja, implementacija ovih sistema nije samo tehnološko unapređenje, već imperativ. Prelazak na suve procese i visokoefikasno kompresiono usitnjavanje omogućio bi rudnicima u Boru, Majdanpeku i drugim lokalitetima da značajno smanje svoj karbonski otisak, optimizuju troškove proizvodnje i usklade operacije sa standardima EU Green Deal-a, čime se osigurava dugoročna konkurentnost na globalnom tržištu mineralnih sirovina.

Literatura

1. Jankovic, A., et al. (2016). Evaluation of High Pressure Grinding Rolls (HPGR) and Vertical Roller Mills (VRM) for dry comminution. Mineral Engineering Journal, Elsevier.
2. Loesche GmbH & Grange Resources (2024). Technical Report: Dry VRM Milling for Power and Water Benefits at Southdown Project.
3. Ausenco (2024). White Paper: Opportunities and challenges in dry comminution flowsheet design.
4. FLSmidth (2025). MissionZero: A study on sustainable copper mining and dry processing technologies.
5. Engineering & Mining Journal (E&MJ) (2025). State of the Art: Dry Mineral Processing and the shift from SAG mills.

Dejan Todorović d.todorovic@itnms.ac.rs
ORCID: ORCID 0000-0002-2776-3388
Vladimir Jovanović v.jovanovic@itnms.ac.rs
ORCID:0000-0001-6069-1630
Branislav Ivošević b.ivosevic@itnms.ac.rs
ORCID 0000-000109445-8159
Dragan Radulović d.radulovic@itnms.ac.rs
ORCID:
Sonja Milićević s.milicevic@itnms.ac.rs
ORCID 0000-0001-8929-1673
Aleksej Kornev a.kornev@itnms.ac.rs
ORCID: 0000-0002-4217-4063