

**FINOM SZEMCSÉS TŰZÁLLÓIPARI ALAPANYAGOK DISZPERZITÁSI  
TULAJDONSÁGAINAK SZABÁLYOZÁSA ÉS SZEMCSETERVEZÉSE  
ÖRLÉSI MŰVELETEKKEL**

**Doktori (PhD) értekezés tézisei**

**Készítette:**

Tamás László

okl. előkészítéstechnikai mérnök

**Tudományos témavezetők:**

Dr. Rácz Ádám

*egyetemi docens*

*Prof. Dr. habil Mucsi Gábor*

*egyetemi tanár*

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

**A doktori iskola vezetője:** Prof. Dr. Szűcs Péter

*egyetemi tanár, MTA levelező tagja*

## I. Az értekezés célja, tudományos előzményei

Alapvető emberi törekvésünk a fejlődés és fejlesztés során, hogy azt a lehető leghatékonyabban érjük el, mely hatékonyság az adott körülmények függvényében változatosan definiálható. A termelő ipar számára az alapanyagok előkészítése során kritikus fontosságú, hogy az a lehető legalacsonyabb energiafelhasználás mellett kerüljön a kívánt állapotba. Különösen igaz ez az olyan iparágak esetén, melyek a (EII-s- Energy Intensive Industries) Energiaintenzív Iparhoz tartoznak. Számos esetben azonban a változatos technológiai folyamatokkal, nagy energiaintenzitás mellett előállított alapanyagok további mechanikai eljárástechnikai előkészítésre szorulnak annak érdekében, hogy a felhasználási terület által megkívánt terméktulajdonságokkal is rendelkezzenek. Tekintettel arra, hogy a mechanikai eljárástechnika legalapvetőbb és egyben legenergiaigényesebb művelete az aprítás, kiemelt fontosságú a szemcseméretcsökkentő folyamatok során lezajló alapjelenségek vizsgálata. Számszerűsítve, Napier-Munn (2015) szerint a világ teljes elektromos energiafelhasználásának közel 2 %-a fordítódik a különböző előkészítési folyamatokra, melynek a 80 %-át ölelik fel az aprítási folyamatok (Abouzied és Fuerstenau, 2009). Hasonló következtetésre jutott Tromans és Meech (2002) is, akik azt is megállapították, hogy a bányászat során felhasznált energia 65-80 %-a ugyan aprításra fordítódik, ennek ellenére mindösszesen 1-2 % energiafelhasználás köthető az újonnan előállított és megnövelt szabad anyagfelülethez. Ilyen körülmények között Kawatra és Eisele (2005) szerint, remek lehetőség kínálkozik az energiaintenzív és jelenleg energetikailag nem hatékony szemcseméretcsökkentő folyamatok fejlesztésére és/vagy kiváltására.

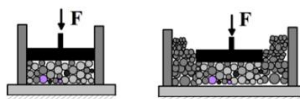
A tudományos értekezésem témájának fókuszában a mesterségesen előállított, magas alumínium-oxid tartalmú, különleges mechanikai tulajdonságokkal rendelkező tűzállóipari alapanyagok aprítási műveletekkel végzett szemcsetervezése áll. Ezen anyagok aprítása, keménységük (Mohs), korund: 9, mullit: 6-7 és abrazív tulajdonságuk miatt rendkívül nehéz feladat. A legnagyobb gyártási volumennel ebben az anyagsoportban a korund rendelkezik, melynek a fentebb említett tulajdonságai teszik lehetővé, hogy a különböző iparágak nagyon változatos felhasználási területeken alkalmazzák. A legfontosabb ipari jelentőségű felhasználása a magas olvadáspontja miatt a tűzállóanyaggyártás, a kémiai ellenállóképessége révén a vegyipar, a rendkívüli abrazív tulajdonságát pedig a szemcseszórás és polírozás területén hasznosítják. Fontos még megemlíteni az olyan nagyvolumenű felhasználással rendelkező iparterületeket is mint az űr és repülőgép ipar, orvostechnológia és a különböző kopásálló felületek gyártásával foglalkozó lamináltipar, melyek különösen szigorú kritériumrendszernek megfelelő korundfrakciókat használnak fel a termelési folyamataikban. A mullitot legfőképpen a kerámiaiparban használják fel, tűzálló mázak és zománcok készítésére.

A tudományos kutatásom során arra a kérdéskörre kerestem a választ, hogy a mesterségesen előállított, magas alumínium-oxid tartalmú tűzállóipari alapanyagok esetén a konvencionális, jelenleg ipari alkalmazásban lévő aprítási folyamatok helyett innovatív aprítási technológiákkal hogyan lehet szabályozni a felhasználó ipar által elvárt tulajdonságokat, amelyeket meghatározott tulajdonságfüggvényekkel jellemezhetünk.

A szemcsés anyagok törése számos, jelenleg is kevésbé ismert mikrofolymat eredményeképpen jön létre. Ennek fő oka, hogy ezeket a jelenségeket több paraméter együttesen befolyásolja, és együttes hatásuk következtében fognak komplex hatást gyakorolni a keletkezett termékszemcsék tulajdonságaira. A kompressziós igénybevétellel történő aprítás területén három fő esetet különböztetünk meg, melyeket Prof. Klaus Schönert rendkívül alapos módon, alapjelenségi szintre lebontva vizsgált meg. Az **egyszemcse törés** esetét az 1966-ban megírt doktori disszertációjában mutatta be, melyben részletesen tárgyalta a különböző anyagú szemcsék törését, azok energetikai szükségleteit, az egyszemcse törés szemcsemérettől való függését, az eltérő energiaszintek melletti egyszemcsetörési valószínűséget, valamint a termékszemcsék méreteloszlását és fajlagos felületét, ezzel lefektetve az egyszemcsetörés tudományos leírásának alapjait. Disszertációjában felismerte, hogy az anyagi tulajdonságok befolyásolják a szemcsék törését és törési szilárdságát, valamint a deformációra való hajlamukat. Beszámolt róla, hogy a törési szilárdság definiálható a szemcse töréséhez szükséges energiával, illetve annak maximális szakítószilárdságával is. Schönert 1966-os doktori disszertációja egyértelművé tette, hogy a törés és azon belül is az egyszemcsetörés teljes megértéséhez nélkülözhetetlen a legelemibb törési folyamatok vizsgálata. A **zárt szemcseágyas törés** során létrejövő nagyszámú szemcse-szemcse kölcsönhatás aprítási folyamatra gyakorolt komplex hatásának megértésének érdekében, Schönert felismerte, hogy kulcsfontosságú a legalapvetőbb mikrofolymatok és alapjelenségek megfelelően elmélyült vizsgálata. Klaus Schönert, Rumpf Professzor 1977-ben történő nyugdíjba vonulása után, a Karlsruhei Egyetemen kutatóival együtt kezdte el vizsgálni a zárt szemcseágyas aprítást dugattyúsprés berendezésben. A Schönert által használt dugattyúpréses berendezés és metodika, mind a mai napig standard eljárás az szemcseágyösszenyomással történő igénybevétel vizsgálatára. A tudományos eredményei az 1977-es német-, majd az 1982-es évben elfogadott amerikai szabadalmában öltöttek testet. Megállapította, hogy a lassú kompressziós igénybevétel hatására a szemcseágy térfogatcsökkenést szenved el, mely kedvező energiahatékonyaságú szemcseméretcsökkentést tesz lehetővé. A **nyitott szemcseágyas törés** esetében a kompresszióval igénybe vett szemcsék a terhelés hatására a kompressziós zónán kívülre kerülhetnek, így csökkentve az aprítás hatékonyságát, melyet az 1. ábra szemléltet. Schönert (1979) végül arra a következtetésre jutott, hogy energetikai szempontból a leghatékonyabb

kompressziós törési mechanizmus az egyszemcsetörés, melyet a zárt és végül a nyitott szemcseágyas törés követ.

1984-ben Schönert az 1977-es és 1982-es szabadalmát felhasználva, egy laborméretű, 200 mm hengerátmérőjű, 0,1-3 m/s kerületi sebességgel üzemelő HPGR (High Pressure Grinding Rolls) azaz nagynyomású őrlőhengerpár) berendezést épített kutatótársával, mellyel megvalósította a folyamatosüzemű, nagynyomású zárt szemcseágyas aprítást (Schwechten és Schönert, 1984). Az új technológia első ipari alkalmazására, annak energiaérzékeny mivolta következtében a cementiparban került sor 1985-ben (Schönert 1988). A HPGR berendezések hatékonyságát a cementiparban számos szerző megerősítette:



1. Ábra szemcseágy összenyomás zárt és nyitott térben

Forrás: Prof. Dr. J. Tomas (2014)

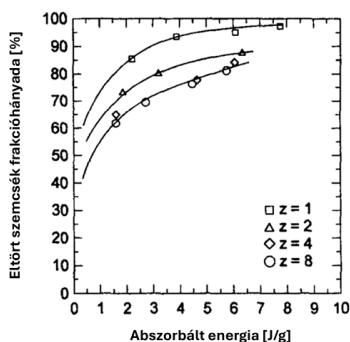
Wüstner (1986) szerint a cementőrlés során 30%-os energia megtakarítás is elérhető a zárt körfolyamatban üzemeltetett HPGR-golyósmalom rendszerrel, az egylépcsős golyósmalmi őrléshez képest. Teljesen azonos következtetésre jutott Patzelt (1992) is, a HPGR-golyósmalom körfolyamatát illetően, cementklinker őrlése esetén. Ellerbrock (1994) úgy találta, hogy a klinker aprítása HPGR berendezéssel nem csak 15 %-os energiamegtakarítást jelent, de a kapacitás is növekedett 20 %-kal. Fontos látni, hogy amíg a golyósmalmok energetikai hatékonysága erősen korlátozott a feladási és célszemcseméret függvényében, a fajlagos őrlési munkaigény Marchal (1997) szerinti 30–42 kWh/t-ról, egészen 20-30 kWh/t-ra redukálható HPGR-golyósmalom aprítási rendszerrel (Alsop és Post, 1995), Cembureau, 1997, Von Seebach és társai, 1996). Madlool és társai (2011) különböző HPGR-golyósmalom konfigurációk vizsgálata során megállapították, hogy akár 10-50 %-os energiahatékonyságjavulás is elérhető. A cementipari alkalmazhatóságának jó bizonyítékaul szolgál, hogy Daniel (2007) -es tanulmánya szerint, a világon nagyjából már 400 nagykapacitású HPGR berendezés üzemelt a klinkerőrlés területén. Mindezek ellenére, az elsődleges ipari alkalmazások a HPGR berendezéseket illetően főleg az előaprítás területére koncentráálódtak, a későbbiekben mégis teret nyert magának a technológia a hibrid-őrlés és nagyobb aprítási finomságot igénylő ipari feladatokban is (Kellerwessel, 1993 és Kellerwessel, 1996). A berendezés megbízhatósága, egyszerűsége és nagy kapacitása végül olyan előnyös tulajdonságoknak bizonyultak, amelyeket a bányászat már hosszú ideje keresett (Kodali és társai, 2011).

A számos alapkutatás és berendezés fejlesztés eredményeképpen, bár a törési mechanizmus és technológia alkalmazása során lejátszódó folyamatok nem lettek minden részletre kiterjedően tisztázva, később megtörtént az első igazán sikeres ércapritási alkalmazás a chilei Los Colorados bányában 1998-ban. Akkoriban az őrlemény fajlagos felületének növelésére mindösszesen 14 darab nagynyomású őrlőhengerpár üzemelt a világ különböző bányáiban, illetve 3 darab a különböző ércek durvaapritására (Van der MEER, 2012). 2013-ban Sesemann (2013) szerint pedig 130 HPGR berendezés üzemelt a világ számos érc és ásványanyag előkészítő üzemében.

Látható, hogy a HPGR berendezések és a bennük létrehozott folyamatos üzemi, nagynyomású, kompressziós szemcseágyas aprítási forma Klaus Schönert professzor munkásságán alapszik, és neki köszönhetően terjedhetett el az aprítási technológiákat igénylő különböző iparágakban, melynek tudományos háttérét és leírását a szisztematikus dugattyúspréses vizsgálataival alapozta meg. Ezen vizsgálatai eredményeképpen 50 MPa szemcseágynyomásban határozta meg, a hatékony szemcseágyas aprítás minimális nyomásértékét, mely ideális esetben és anyagtól függően 100-300 MPa is lehet (Schönert, 1988). Bevezette az „interparticle breakage”, vagyis a szemcsék közti törés fogalmát, mely a szemcseágyas aprítás során következik be. Tudományos munkája során megállapította, hogy az aprítás hatékonysága, a szemcsék által alkotott szemcseágy által a berendezésből abszorbeált energiával áll a legszorosabb összefüggésben, mely a legrelevánsabb faktor a szemcsetörés energetikai aspektusában (Schönert, 1991). Néhány évvel később Schönert (1996) definiálta az ideális szemcseágy kritériumrendszerét, melyet az alábbi feltételekhez kötött kutatása alapján: 1. Véletlenszerűen homogén szemcseágy megléte 2. Homogénen tömörített szemcseágy 3. Az igénybe vett szemcsék térfogata vagy tömege ismert 4. Elhanyagolható falhatás a törési folyamat szempontjából. A kutató úgy találta, hogy ezen körülmények elérhetőek az egymással párhuzamos hengeres nyomófelületek által dugattyús prés berendezésben, abban az esetben, ha a szemcseágy vastagság legalább hatszorosa a maximális feladási szemcseméretnek, illetve az ágy átmérője legalább háromszor akkora, mint annak magassága. Schönert (1996) megállapította, hogy adott fajlagos abszorbeált energiaszintek alkalmazása esetén, az egymáson elhelyezkedő szemcserétegek számának csökkentésével növekszik az eltört szemcsék frakciójának hányada, vagyis a feladott szemcsék törési valószínűsége, melyet a 2. ábra szemléltet. Hasonló eredményekre jutott Gutsche és Fuerstenau (1999), Pourghahramani és Forssberg (2007). Ezen jelenség okait a következőkben látta Schönert (1996): (1) a szemcseágyvastagság növelése a szemcseszám és ezáltal a kontaktpontok számának növekedésével emelkedett súrlódási veszteséget eredményez, (2) az elasztikus és plasztikus deformációk száma a megnövekedett kontaktpontok miatt szintén magasabb összehajtási-igényű folyamatot eredményez, (3) a szemcsékben létrejött mikro-repedések létrejövetele is további energiát igényel. Fontos

megemlíteni, hogy a kontaktpontok számának növekedése kedvező hatással bír a kubikus szemcsealakú és alacsony szemcse szélesség-szemcsehosszság arányú töret kialakulására. Briggs és Evertsson (1998) szerint ezért célszerű a kúpostörő berendezésekben tömött adagolást alkalmazni, hogy a törés során szemcseágj jöjjön létre, mely kedvez a blokkos, kubikus szemcsealak létrejöttének a töretben.

Schönert (1996) továbbá azt is kimutatta, hogy bár a dugattyúsprés falazata és a szemcsék között fellépő súrlódás jelentősen befolyásolja a nyomáeloszlást a szemcseágban, ennek ellenére a nyomáeloszlás aprításra gyakorolt hatása nem jelentős.



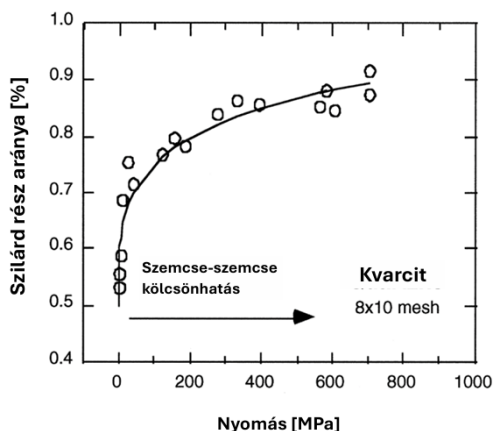
2. ábra. 3,2-4 mm-es kvarcselemcsék eltört frakcióhányada az energiaabszorpció függvényében

Forrás: Schönert (1996)

Látható, hogy számos kutató az elvégzett munkája során, alapvetően egyező eredményekre jutott a szemcseágvastagság hatását illetően, melyből az egyik legfontosabb levonható következtetés, az az, hogy az aprítás energetikai hatékonysága és a szemcseágvastagság fordítottan arányosak egymással, melyet a 2. ábra mutat be.

Az igénybevételnek kitett szemcseágvastagság mellett, a következő fontos alapparaméter a szemcseágnyomás, mely az ágyban elhelyezkedő szemcséket megerterheli. A szemcseágnyomás mértéke közvetlen hatással van a szemcsékben és az azok között kialakuló nyomás eloszlására, ezáltal pedig arra, hogy milyen törési mechanizmust fognak elszenvedni. Kanda és társai (1990) megállapították, hogy a szűken osztályozott, 1,19 - 1,41 mm-es szemcseméretű kvarcselemcsék szemcseágas aprítása során, a magasabb alkalmazott szemcseágnyomás nagyobb törési valószínűséget fog eredményezni, illetve csökkenti a keletkezett termék medián szemcseméretét is. Gutsche és Fuerstenau (1999) méréseik során arra lettek figyelmesek, hogy a szemcseágnyomás növelésével az ágyban lévő 1,68 – 2,38

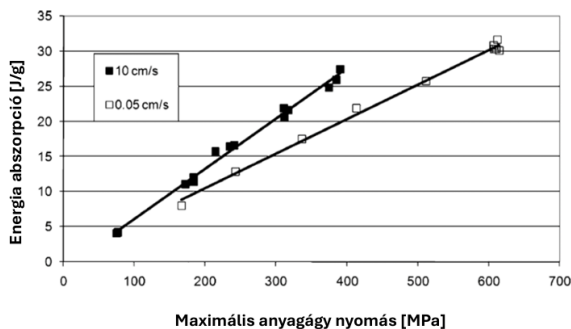
mm-es szemcseméretű kvarcit szemcsék először tömörödnek, majd a lehető legnagyobb halmazsűrűséget és az ezzel járó térkitöltést igyekeznek felvenni adott nyomásviszonyok mellett. Az alacsony nyomásviszonyok közepette a feladási szemcsékről apró fragmentumok törnek le, amik kitöltik az anyagágyban lévő hézagokat, ennek következtében a szemcseágy tömörödik, melyet a 3. ábra szemléltet. Megfigyelhető továbbá, hogy az 50-100 MPa nyomástartománytól, - ahol a szemcseágy tömörödésének tendenciája jóval alacsonyabb mértékűvé válik-, megkezdődik az effektív aprítás és szemcseméretcsökkenés folyamata, melyhez már kisebb ütemű szemcseágy kompakció társul. Mütze (2016) szemcseágy aprítási közleménye finomszemcsés 10 és 50  $\mu\text{m}$ -es szemcseméretű mészkő, kvarc és szilícium-karbid mintákon megmutatta, hogy a növekvő szemcseágynyomással együtt növekszik a szemcsékben tárolódó elasztikus energia, mely olyan törési energiavesztéshöz vezet, ami csökkenti az aprítási folyamat energiahatékonyágát. Összegezve tehát, a Schönert (1988) szerinti minimális 50 MPa szemcseágynyomás megléte mellett figyelembe kell venni, hogy a túlzottan magas értékű szemcseágynyomás használata csökkenő energetikai és törési hatékonysághoz vezethet. Rendkívül fontos tehát, hogy az adott aprítási célok ismeretében az optimális szemcseágynyomás kerüljön alkalmazásra, elkerülve az energiapazarlást és a megnövekedett berendezéskopást.



3. ábra. Az anyagágy tömörödés változása az alkalmazott nyomás függvényében  
Forrás: O. Gutsche. és D.W. Fuerstenau (1999)

A szemcseágyvastagság és nyomás mellett az igénybevétel sebessége is alapvetően fontos aprítási paraméter, mely esetében Kerber (1984) szerint az alacsonyabb igénybevételi sebesség kedvez a kompaktabb szemcseágy létrejöttének, illetve a nagyobb igénybevételi

sebesség emelkedett sűrűlódási veszteségekhez vezet a szemcsék kontaktpontjaiban. Mütze és Husemann (2008) dugattyúspréses kísérleteinél a 0,05 cm/s és a 10 cm/s nyomósebességek jelentősen eltérő energiaabszorpciós értékeket mutattak a különböző nyomásértékek mellett, amit a 4. ábra szemléltet. Látható, hogy a magasabb nyomósebességhez a 175-400 MPa nyomásintervallumban minden esetben jobb energiaabszorpció is társul, ami kulcsfontosságú mérőszám az aprítás hatékonyságának szempontjából. Érdekes azonban azt is figyelembe venni, hogy ehhez 200-szoros igénybevételi sebességre volt szükség.

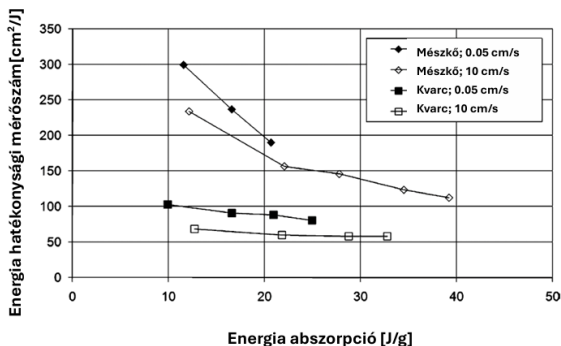


4. ábra. Energiaabszorpció az anyagágy nyomás függvényében különböző nyomósebességek esetén

Forrás: Mütze. T. és Husemann. K. (2008)

A törés energiahatékonysága a nyomási sebesség növekedésével csökkenő tendenciát mutat, melyet az 5. ábra szemléltet. Látható, hogy a kevésbé kemény mészkő, és a jóval keményebb 10-15  $\mu\text{m}$ -es kvarc szemcsefrakciók is hatékonyabban apríthatóak le alacsonyabb nyomósebességek alkalmazásával, mert az egységnyi abszorbeált energiára jutó felületnövekedés nagyobb.

Az anyagágyas aprítás vizsgálata dugattyúspréses kísérletekkel az elmúlt több mint 4 évtizedben számos szerző figyelmét felkeltette, melynek következményeként kiterjedt szakirodalom jött létre a tudomány ezen területén. A bemutatott kísérletsorozatok és az ebből létrejött tudományos közlemények változatos aspektusban vizsgálták fenomenológiai módszerekkel ezt az aprítási metódust. Ahogy azt fentebb bemutattam, bár számos szerző vizsgálta a kemény és ridegen törő, illetve abrazív tulajdonságokkal rendelkező kvarcot, mint modellanyagot a kutatásai során, az olyan rendkívüli mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyagokat, mint a korund, szilícium-karbid és a cirkon-szilikát csak kevés kutató alkalmazta modellanyagként anyagágyaprítási kutatásai során (Cooper és Eaton, 1962, Reichardt és Schönert, 2003, Karimi és Djokoto, 2012, Pedrosa és társai, 2019).



5. ábra. A törés energiahatékonysága az energiaabszorpció függvényében mészkő és kvarc esetén

Forrás: Mütze. T. és Husemann. K. (2008)

Szintén fontos megemlíteni, hogy a szemcseágyas aprítással létrehozott töret diszperzitási tulajdonságainak vizsgálata közül, a szemcsealak és az ebből következő halmazsűrűség nem álltak a kutatók fókuszában az elmúlt több mint négy évtizedben, valamint Pedrosa és társai, (2019) szerint sehol a világon nem alkalmaznak HPGR berendezést korund aprításra.

#### A szakirodalmi feldolgozásra alapozva az alábbi következtetéseket vontam le:

- Elenyésző számú tudományos közlemény foglalkozik az olyan rendkívül nagy mechanikai szilárdsággal rendelkező és különösen abrazív anyagok lassú kompressziós zárt szemcseágyas aprításával, mint a korund (Cooper és Eaton, 1962, Reichardt és Schönert, 2003, Karimi és Djokoto, 2012, Pedrosa és társai, 2019). Pedrosa és társai (2019) megjegyzik, hogy nincs tudomásuk arról, hogy 2019-ben bárhol a világon HPGR törőberendezést alkalmaznának korund törésre. Összességében mind a 4 publikáció szerzői arra a következtetésre jutottak, hogy a nagykeménységű, rendkívül ellenálló és abrazív anyagok aprítására is megfelelő technológiai megoldást nyújt a zárt szemcseágyas törési mód. Ennek ellenére kevés a tudományos közlemény ezen a területen, illetve a HPGR-ek ipari alkalmazása is a kevésbé abrazív és alacsonyabb mechanikai szilárdságú anyagok esetén terjedt csak el.

- A szemcsés anyagok diszperzitás és alkalmazástechnikai tulajdonságainak zárt szemcseágyas aprítással történő megváltoztatását a tudományos szakirodalom nagyrészt a szemcseméret-eloszlás és fajlagos felület vizsgálatával tárgyalja. A feladott anyag szemcsealakjának a törésre gyakorolt hatását számos esetben vizsgálták, azonban az

előállított töretszemcsék alakját elenyésző számú publikáció vizsgálja, miközben a vizsgálati anyagok egyik esetben sem tűzállóanyagipari alapanyag voltak.

- Az egy szilárd felületen való ütközés, és a szemcse-szemcse ütközés szemcsealakra gyakorolt hatását számos kutató vizsgálta, azonban egyik esetben sem foglalkoztak olyan speciális tűzállóanyagipari alapanyaggal, mint a mullit.

- A tudományos szakirodalom nem vizsgálja az ideális szemcseágytól vékonyabb ágyvastagság hatásait kellő mélységében, illetve említést sem tesz arról, hogy a szemcserétegek vastagságát csökkentve milyen szemcsealakot és az ennek következtében létrejövő halmazsűrűséget érintő változás érhető el.

## **II. Tudományos munkám célkitűzése**

1. A különböző szemcseméretű magas alumínium-oxid tartalmú olvasztott termékek, szemcsealak és szemcsefrakció-halmazsűrűségének tudatos eljárástechnikai szabályozása és annak tudományos megalapozása, különös tekintettel a kompressziós zárt szemcseágyas törés esetére.

2. Az aprítási igénybevételi környezet hatásának vizsgálata a töret diszperzitás tulajdonságaira magas alumínium-oxid tartalmú olvasztott termékek esetén, a tudatos terméktervezés megalapozásának érdekében. (Korund lassú kompressziós zárt szemcseágyas aprítása és ütés-ütközéses igénybevételű aprítás a mullit esetén).

3. A fentiekhez szükséges az alkalmazásterületek által elvárt diszperzitás tulajdonságok, valamint a zárt szemcseágyas aprítási módszert befolyásoló eljárásparaméterek közötti összefüggések meghatározása.

4. Kitűntetett cél, a kutatómunkát szolgáló kísérleti zárt szemcseágyas nagynyomású őrlő hengerpár megtervezése és elkészítése, amelynek alkalmazásával a kívánt célterméket a megfelelő minőségben és mennyiségben lehet előállítani. A berendezésfejlesztés eredményeképpen egy olyan nagynyomású őrlőhengerpár megalkotása volt a célom, mellyel effektíven aprítható a korund, egy olyan tranzienis szemcsetörési módszerrel, mely egyszerre biztosítja az egyszemcsetörésből, vagy alacsony szemcserétegszámból eredő hatékony szemcseméret csökkentést és rendelkezik a lassú kompressziós szemcseágyas törési módhoz köthető kedvező szemcsediszperzitási tulajdonságokkal.

## **III. Az elvégzett vizsgálatok leírása, kísérleti berendezések, alkalmazott kutatási és értékelési módszerek**

Az általam elvégzett kutató, tervező és fejlesztőmunka a hazai és nemzetközi szakirodalom tanulmányozását, az értekezésben szereplő kísérleti és vizsgálati módszerek kifejlesztését, laboratóriumi és üzemi kísérleti vizsgálatokat, mérés adatgyűjtést, a kapott eredmények kiértékelését, valamint a következtetések levonását foglalja magába.

Az értekezésemben foglalt tudományos eredményeim szisztematikus laboratóriumi és üzemi kísérleteken alapszanak, amelyeket a Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézetben és a Refra-System Kft. újrónafői telephelyén végeztem el. A kutatómunka során a szisztematikus elvégzett vizsgálatokat és azok eredményeit három fő fejezetben foglaltam össze. Ezek sorra: (1) Dugattyúsprés kísérleti eredmények; (2) Félüzemi méretű HPGR berendezés fejlesztése és mérési eredményei; (3) Horizontális és vertikális tengelyű röpitőtörők eredményei.

### **Kísérletek, vizsgálatok, modellanyagok:**

Az első vizsgálatom során szisztematikus felépített kísérleti és mérési rendszerrel végeztem el a kutatómunkámat egy dugattyúspréssel, melynek során megvizsgáltam a szemcseágyvastagság ( $h$ ) és a dugattyúnyomás ( $p$ ) változtatásának hatásait a keletkezett termékek diszperzitás tulajdonságaira korund esetén. A vizsgálatokhoz a feladási modellanyagot tudatosan választottam meg és készítettem elő 1-3 mm-es korundfrakcióba, egyszemcsetöréssel és síkszítással előállítva azt, melynek 10, 50 és 90 %-os szemcsemérete 1,195 mm, 1,76 mm és 2,69 mm-nek adódott. A méréseim során,  $h=5, 10, 15, 20$  és  $25$  mm szemcseágyvastagságokat és  $p=125, 175, 225$  és  $250$  MPa dugattyúnyomásokat használtam  $31,5$  mm/s nyomósebesség alkalmazása mellett.

A töröt szemcseméret és szemcsealak-eloszlásának meghatározására egy dinamikus képelemzési módszert alkalmazó Camsizer X2 berendezést alkalmaztam száraz diszpergálással. Előzetes vizsgálatokkal megállapítottam, hogy a szemcseszfericitás (SPHT) mérőszáma erősebb összefüggésben áll, az adott szűken osztályozott frakció halmazsűrűségével, mint a szemcseszélesség-szemcsehosszúság ( $b/l$ ) aránya. Ennek megfelelően a szemcsealak leírására az SPHT mérőszámot alkalmaztam, amit a következőképp számol a berendezés:

$$SPHT = \frac{4\pi \times A}{P^2}$$

ahol, SPHT: a vizsgált minta szfericitása,  $P$ : a szemcse kerülete és  $A$ : a szemcse vetületi területe. A tökéletes gömb szfericitása 1, minden más ettől eltérő szemcsealak eredménye  $SPHT < 1$  lesz.

A különböző beállításokkal kivitelezett, szemcseágyas töréssel előállított frakcionált termékek szemcsealak és halmazsűrűségváltozásának leírására újszerű, dinamikus mutatószámokat vezettem be. Az  $SPHT_{növ}$  és a  $\rho_{halm,növ}$  a szemcsealak és halmazsűrűségváltozás növekményét fejezik ki egyszemcsetöréshez képest, adott szemcseágyas aprítással előállított termékfrakció esetében. Az  $\eta$  érték, a törést és szemcse alakformálást jellemző hatékonysági mérőszám, mely információval szolgál a  $<1$  mm termékfrakciók tömegkihozataláról és annak összegzett szfericitás növekményéről. Ez megmutatja annak fontosságát, hogy nem elegendő, ha egy termék adott gyártási paraméterekkel létrehozva, megfelelő szemcsealakú és halmazsűrűségű szemcséket fog

tartalmazni, legalább ilyen fontos az is, hogy ezen szemcsék aránya is magas legyen a termékben. A töretfrakciók ( $<0,15$ ,  $0,15-0,3$ ,  $0,3-0,5$ ,  $0,5-1$  mm) szemcseméret-eloszlás, szfericitás és halmazsűrűségének az alkalmazott dugattyúnyomástól és szemcseágyvastagságtól való függését a fentebb bemutatott mérőszámok és a jólismert eljárástechnikai alapfüggvények alkalmazásával mutattam be az ábráimon keresztül.

Ezt követően a dugattyúspréssel elvégzett méréseim tapasztalatait és mérési eredményeit felhasználva, tudományos vizsgálatok lefolytatására alkalmas, félüzemi méretű, nagynyomású őrlőhengerpárt fejlesztettem ki, mellyel elvégezhető a  $<5$  mm korundszemcsék folyamatosüzemű kompaksiós zárt szemcseágyas aprítására. A berendezés alapját, egy nagynyomású hengeres kompaktáló adta. Kísérleti vizsgálatokkal feltártam azokat az eljárástechnikai tudományos összefüggéseket, amelyek a folyamatosüzemű, nagynyomású, zárt szemcseágyas aprítási technológiai paraméterei (a korábbi vizsgálatokból nyert optimális  $s$  – részméter = 5 mm,  $P_{spec}$  - fajlagos hengerpalástnyomás = 6,88; 12,19; 15,63 és a 20,31 MPa és  $V_{ker}$  - hengerpalást kerületi sebesség = 72, 108 és 143 mm/s) és a céltermék és frakcióinak kihozatala, valamint szemcsealak és halmazsűrűségváltozása között fennállnak. Ennek szemléltetésére bevezettem az  $\Omega$  mutatószámot, mely a törést és szemcse alakformálást jellemző hatékonysági mérőszám.

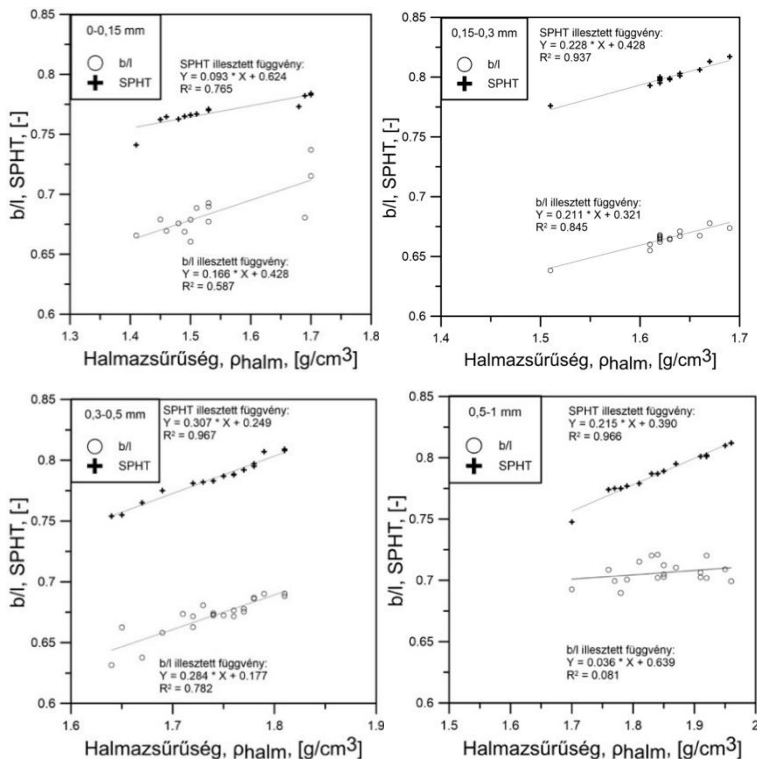
Végezetül megvizsgáltam két alapvető aprítási üzemparaméter hatását ( $V_{ker}$  - rotor kerületi sebesség = 37,7, 47,1, és 56,5 m/s és  $\dot{m}$  - feladási tömegáram = 3,25, 4,76 és 6,86 t/h) a tudatosan megválasztott és előkészített 1-3 mm-es mullit szemcsékre VSI (Vertical Shaft Impactor -Vertikális Tengelyű Röpitőtörő) és HSI (Horizontal Shaft Impactor – Horizontális Tengelyű Röpitőtörő) berendezésekben. A feladasként előkészített modellanyag egyszemcsetöréssel és síkszítalással került előkészítésre, melynek 10, 50 és 90 %-os szemcsemérete 1,14 mm, 1,78 mm és 2,79 mm.

A töretfrakciók ( $<0,15$ ,  $0,15-0,3$ ,  $0,3-0,5$ ,  $0,5-1$  mm) szemcseméret-eloszlás, szfericitás és halmazsűrűségének az alkalmazott üzemparaméterektől való függését ábrák segítségével mutattam be.

A laboratóriumi szitaelemzéseket Retsch AS 200 TAP berendezéssel végeztem el, melynek során a szitasor 280 fordulat/perc rázást és 150 ütést/perc szenvedett el. A különböző korund és mullit frakciók halmazsűrűségének megállapítására az MSZ 6506-84 szerinti szabványosított eljárást alkalmaztam. A szemcsealakváltozást Zeiss Axio Imager M2M berendezéssel készített képek segítségével szemléltettem.

## IV. Tudományos eredmények, tézisek

1. Dinamikus képelemzési módszerrel nyert elemzési adatokból meghatároztam a  $<0,15$ ;  $0,15-0,3$ ;  $0,3-0,5$  és a  $0,5-1$  mm korund frakciók átlagos szemcsealakleíró paramétereinek (SPHT,  $b/l$ ) és a halmazsűrűségeinek függvénykapcsolatát. Bizonyítottam, hogy a szemcseszfericitás (SPHT) az alkalmasabb szemcsealakleíró paraméter a szemcsealak-halmazsűrűség közötti összefüggés leírására a fentebb említett korundfrakciók esetén, melyet az 6. ábrán található vizsgálati eredmények támasztanak alá.



6.ábra A b/l és SPHT alakleíró paraméterek összefüggése a halmazsűrűséggel

## 2. A lassú kompressziós zárt szemcseágyas törés során végbemenő alakformálás vizsgálatára és leírására újszerű kísérleti és kiértékelési módszert dolgoztam ki.

Az alakformálás hatékonyságának leírására az alábbi újszerű mérőszámokat vezettem be:

$$SPHT_{n\acute{o}v} = \frac{SPHT_1 - SPHT_0}{SPHT_0} \times 100$$

Ahol,  $SPHT_{n\acute{o}v}$  adott frakció szfericitás növekményét mutatja meg, az  $SPHT_0$  az egyszemcsetöréssel előállított frakció szfericitása, míg a  $SPHT_1$  a zárt szemcseágyas aprítással előállított ugyanezen névleges szemcseméretű frakció szfericitása.

$$\eta = \frac{(\Sigma SPHT_{növ} \times K)}{100}$$

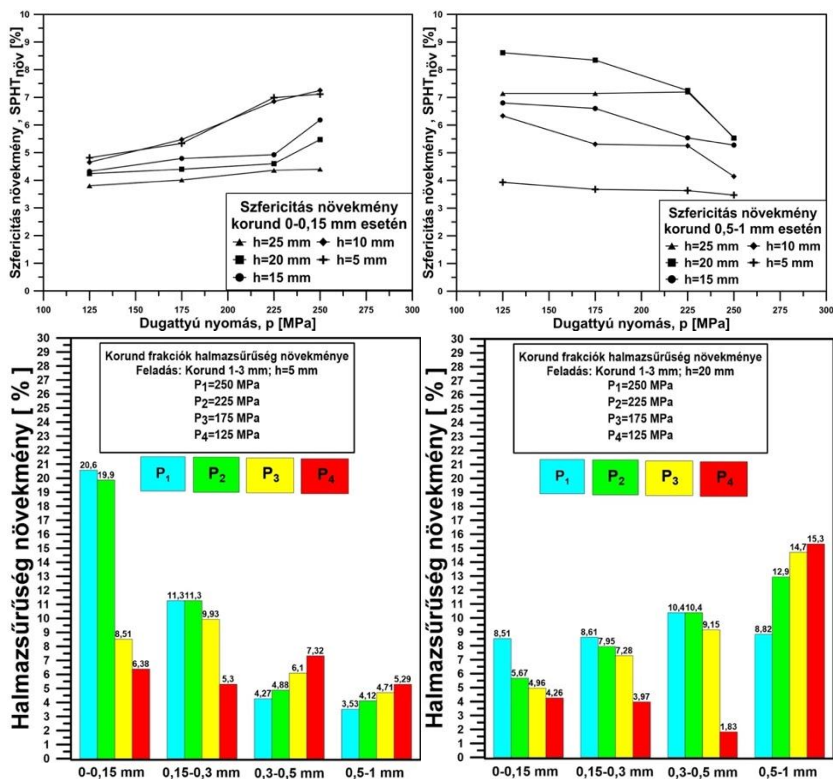
Ahol,  $\eta$  a törés és szemcsealakformálás hatékonyságát jelző mérőszám,  $\Sigma SPHT_{növ}$  a szemcsefrakciók szfericitás összege,  $K$  pedig a <1 mm termékfrakció tömegkihozatala.

$$\Omega = \frac{(SPHT_{növ} \times k)}{100}$$

Ahol,  $\Omega$  a törés és szemcsealakformálás hatékonyságát jelző mérőszám adott termékfrakció esetén,  $SPHT_{növ}$  az adott termékfrakció szfericitási mérőszáma,  $k$  pedig adott frakciók tömegkihozatala a <1 mm termékben.

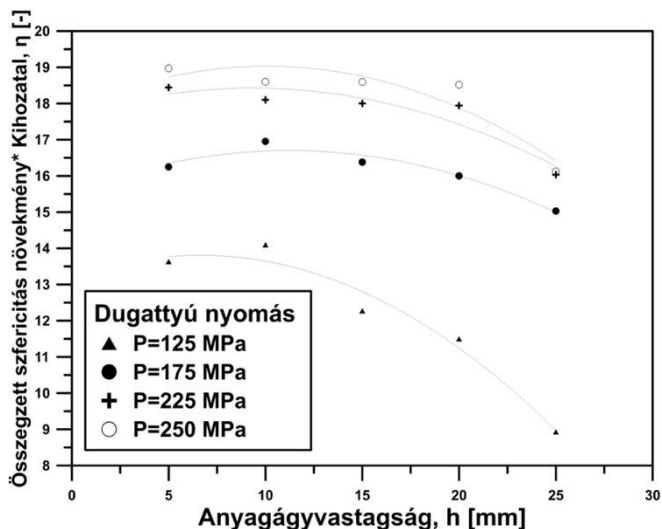
3. Statikus modellvizsgálatokkal bizonyítottam, hogy a lassú kompressziós zárt szemcseágyas törés szemcsealak-formálásra hasznosítható. A szemcsealak változása, a termékfrakciók halmazsűrűség növekedésére vezet, ezért a <1 mm korundszemcsék több terméktulajdonsága válik egyidejűleg tudatosan szabályozhatóvá (szemcseméret, szemcsealak, halmazsűrűség).
4. Statikus modellvizsgálatokkal bizonyítottam, hogy az alkalmazott dugattyúnyomás és szemcseágyvastagság változtatásával különböző méretfrakciójú, szűken osztályozott korundtermékek aprítás melletti hatékony alakformálása végezhető el.

a. A <0,3 mm korundtermékek esetén, az 5-10 mm és 225-250 MPa, a 0,3-0,5 mm termékek előállításánál a 20 mm és 175-250 MPa, míg a 0,5-1 mm-es termékek előállításánál a 20 mm-es szemcseágyvastagság és 125-175 MPa szemcseágynyomás alkalmazásával lehet a legnagyobb szfericitás és halmazsűrűség növekményt elérni (7.ábra).



7. ábra Az alkalmazott szemcseágyvastagság és a dugattyúnyomás hatása a 0-0,15 és 0,5-1 mm-es frakciók szféricitás növekményére és a dugattyúnyomás hatása a halmazsűrűség növekményre

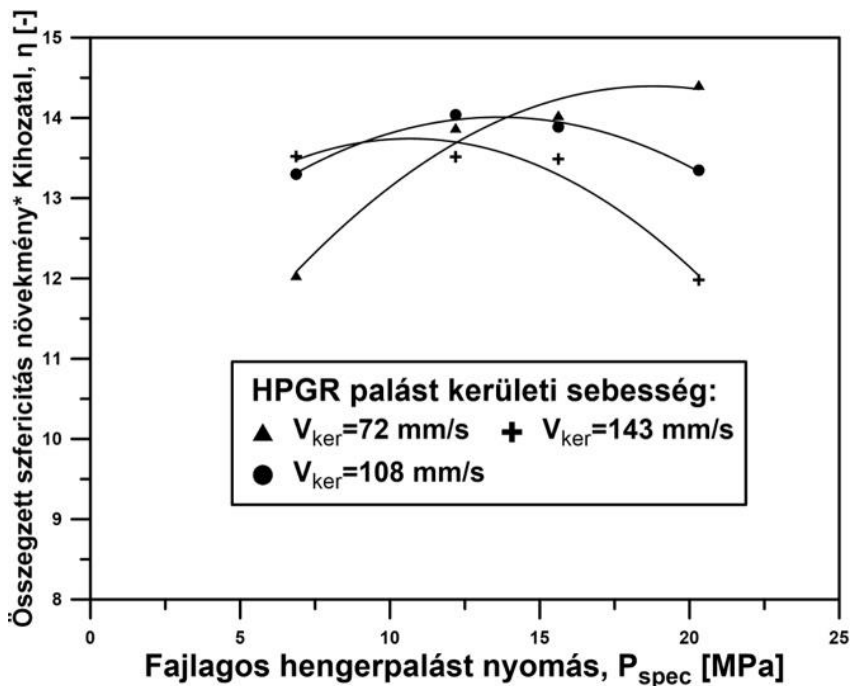
b. Továbbá, a 8. ábrán bemutatott  $\eta$  mérőszám segítségével bizonyítottam, hogy az egyszemcse és az ideális szemcseágyas aprítás ágyvastagsága (5-15 mm) között elérhető tranziens törési módszer a szemcseágynyomás növelésével minden esetben nagyobb mennyiségű és magasabb szfericitású <1 mm terméket hoz létre.



8. ábra A dugattyúnyomás és az ágyvastagság hatása az  $\eta$  mérőszámra

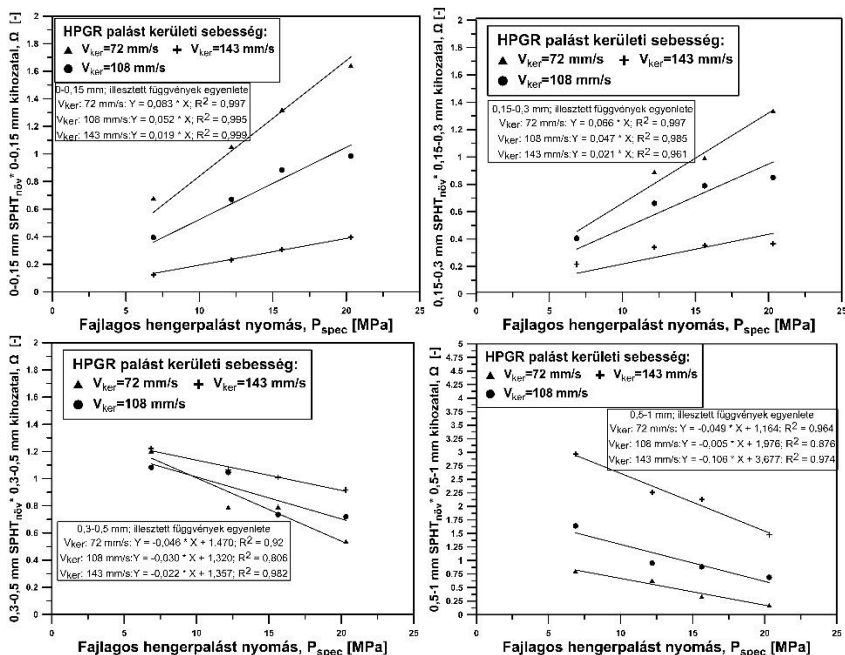
5. A statikus modellvizsgálatok eredményei alapján kifejlesztettem egy olyan folyamatos üzemű HPGR berendezést, amelyben tudatosan szabályozható az 1-3-mm-es korund szemcsék törése és egyidejű alakformálása.
6. A tudományos vizsgálatok lefolytatására alkalmas, félüzemi méretű HPGR berendezés esetén feltártam azokat az eljárástechnikai és tudományos összefüggéseket, amelyek a folyamatos üzemű, nagynyomású, zárt szemcseágyas aprítás technológiai paraméterei (a korábbi vizsgálatokból nyert optimális  $s$  – részméter,  $P_{\text{spec}}$  - fajlagos hengerpalástnyomás és  $V_{\text{ker}}$  - hengerpalást kerületi sebesség) és a céltermék és frakcióinak kihozatala, valamint a szemcsealak és a halmazsűrűség változása között fennállnak.

a. Megállapítottam, hogy a  $v_{\text{ker}}=72$  mm/s alkalmazása folyamatosan növekvő  $\eta$  értékeket eredményezett a fajlagos hengerpalást nyomás emelése mellett a  $P_{\text{spec}}=6,88\text{-}20,31$  MPa intervallumban, ezért a legalacsonyabb megvizsgált igénybevételi sebesség alkalmazása a legcélravezetőbb az  $\eta$  érték növelésén keresztül a termékszemcsék aprításával egyidejűleg kivitelezett szemcse-alakformálására.



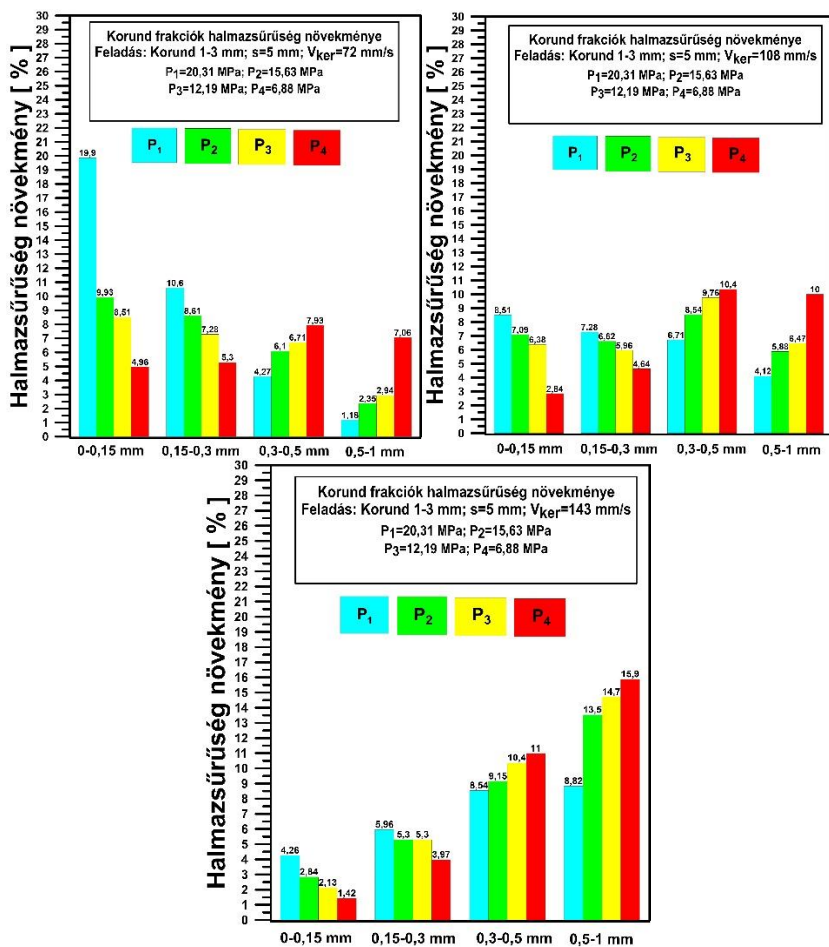
9. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a palást kerületi sebesség hatása az  $\eta$  mérőszámra

b. Az  $\Omega$  minőségi mutató segítségével (10. ábra), meghatároztam a  $<0,15$ ;  $0,15-0,3$ ;  $0,3-0,5$  és a  $0,5-1$  mm korund termékfrakciók optimális előállítási körülményeit a sajátfejlesztésű HPGR berendezésben, a megvizsgált intervallumokban.



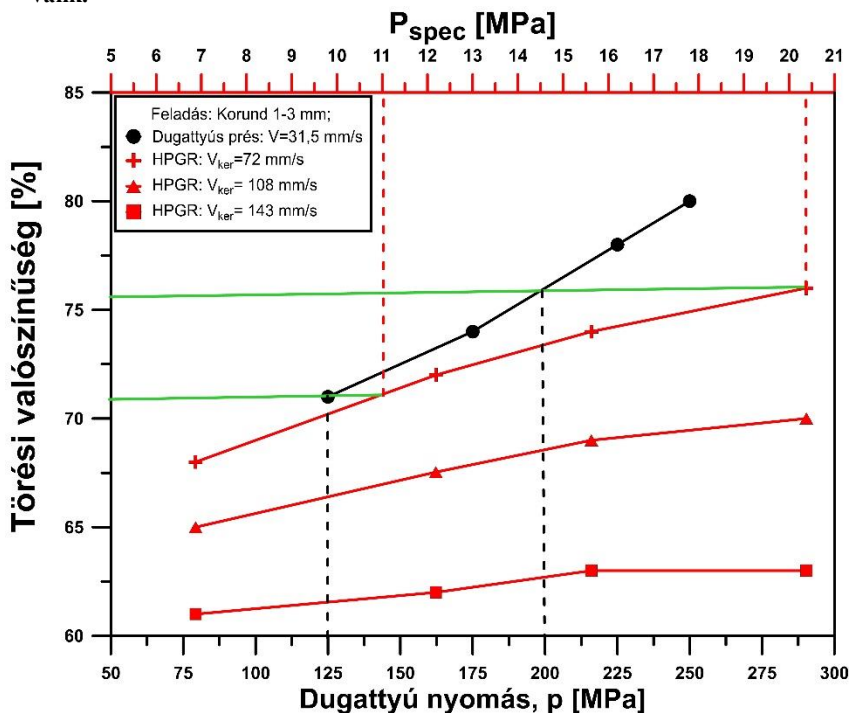
10. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a palást kerületi sebesség hatása az  $\Omega$  mérőszámra

c. Megállapítottam továbbá, hogy a <0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5 és a 0,5-1 mm korundtermékek halmazsűrűségének növelésére a sajátfejlesztésű HPGR berendezésben az alábbi beállítások alkalmasak, melyet a 11.ábra mutat be.



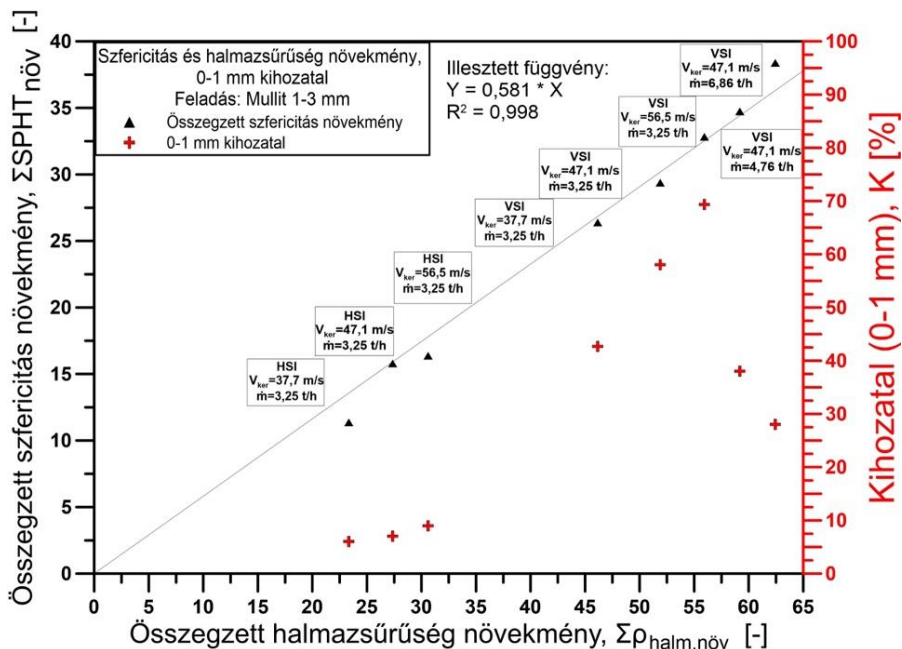
11. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás hatása 72, 108 és 143 mm/s hengerpalást kerületi sebesség alkalmazása esetén a termékfrakciók halmazsűrűség növekményére

7. Törési valószínűségeen alapuló számítási módszert dolgoztam ki a zárt szemcseágyas kompressziós kísérleti eredményeim alapján, melynek segítségével a statikus szemcseágy igénybevételénél alkalmazott nyomás és a nagynyomású őrlőhengerpárban kialakuló szemcseágy nyomás közötti összefüggés becslhetővé válik.



12. ábra A HPGR fajlagos hengerpalást nyomásának átszámítása a dugattyús prés nyomásértékeire a törési valószínűség segítségével

8. Bizonyítottam, hogy az 1-3-mm-es a mullit frakció rőpítőtörőben való aprítására és egyidejű alakformálására a függőleges tengelyű rőpítő törő (VSI) a magasabb termékkihozatal és összegzett szfericitás növekmény miatt alkalmasabb aprítógép, mint a vízszintes tengelyű rőpítő-törő (HSI), ami a berendezésben kialakuló nagyobb számú szemcse-szemcse ütközéssel magyarázható.



13. ábra Az összegzett szfericitás és halmazsűrűség növekmények összefüggése a <1 mm termékfrakciók kihozatalának figyelembevételével

## V. Szakirodalmi jegyzék

**Abouzied A. M., Fuerstenau D. W.** (2009): Grinding of mineral mixtures in high-pressure grinding rolls. *International Journal of Mineral Processing*, v. 93, p. 59-65. 10.1016/j.minpro.2009.05.008

**Alsop. P.A. és Post. J.W.** (1995): *The Cement Plant Operations Handbook*, Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

**Briggs. C. és Evertsson. M. C.** (1998): SHAPE POTENTIAL OF ROCK, *Minerals Engineering, Vol. II, No. 2, pp. 125-132*

**Cembureau.** (1997): *Best Available Techniques for the Cement Industry*, Brussels: Cembureau.

**Cooper. A. R. és Eaton. L. E.** (1962): Compaction Behavior of Several Ceramic Powders. *Journal of the American Ceramic Society*, 45(3), 97-101. doi:10.1111/j.1151-2916.1962.tb11092.x

**Daniel. M. J.** (2007): Energy efficient mineral liberation using HPGR technology. Doctoral dissertation, University of Queensland.

**Ellerbrock. H.-G.** (1994): Gutbett-Walzenmuhlen, Zement-Kalk-Gips 2 75–82.

**Gutsche. O. és Fuerstenau. D. W.** (1999): Fracture kinetics of particle bed comminution — ramifications for fines production and mill optimization, Powder Technology 105, 113–118.

**Kanda. Y., Takahasi. S. és Sakaguti. N.** (1990): A compressive crushing of powder bed- a consideration of size distribution of product and specific energy to produce fine particles. Powder Technology, 63 (1990), 221-227.

**Karimi. H. R. és Djokoto. S. S.** (2012): Instrumentation and modeling of high-pressure roller crusher for silicon carbide production. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 62(9- 12), 1107–1113. doi:10.1007/s00170-011-3871-8

**Kawatra S.K. and Eisele T.C.** (July 2005): “Optimization of Comminution Circuit Throughput and Product Size Distribution by Simulation and Control” Final Technical Report, Department of Chemical Engin. eering Michigan Technological University, DOE Award Number: DEFC26- 01NT41062, Via the internet, January 2023, <https://www.osti.gov/servlets/purl/887498>

**Kellerwessel. H.** (1993): High pressure particle bed comminution of mineral raw materials. Aufbereitungs-Technik 34 (5), 243–249.

**Kellerwessel. H.** (February 1996): High pressure particle bed comminution, state of the art, application, recent developments. Minerals Engineering Journal, 45–52.

**Kerber. A.** (1984): Einfluß der Beanspruchungsgeschwindigkeit, Profilierung und Rauhgigkeit auf die Einzelkorn-Druckzerkleinerung, dissertation, Universitat Karlsruhe.

**Kodali. P., Dhawan. N., Depci. T., Lin. C. és Miller. J.** (2011): Particle damage and exposure analysis in HPGR crushing of selected copper ores for column leaching. Minerals Engineering., 24, 1478–1487. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.07.010>

**Madlool. N.A., Saidur. R., Hossain. M.S. és Rahim. N.A.** (2011): A critical review on energy use and savings in the cement industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 2042–2060.

**Marchal. G.** (1997): Industrial Experience with Clinker Grinding in the Horomill Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey.

**Mütze. T. és Husemann. K.** (2008): Compressive stress: Effect of stress velocity on confined particle bed comminution, Chemical Engineering Research and Design 8 6 (2 0 0 8) 379–383

**Mütze. T.** (2016): Modelling the stress behaviour in particle bed comminution, Volume 156, 10 november 2016, Pages 14-23.

**Napier-Munn** T. J. (2015): Is progress in energy-efficient comminution doomed? *Minerals Engineering*, v. 73, p. 1-6.

**Patzelt**. N. (1992): High pressure grinding rolls, a survey of experience. *IEEE Cement Industry Technical Conference, Dallas/Texas 10 (14)*, 180

**Pedrosa**. F. J. B., **Bergerman** M. G., **Segura-Salazar**, J. és **Junior** H. D. (2019): HPGR as alternative to fused alumina comminution route: an assessment of circuit simplification potential, *REM, International Engineering Journal*, Ouro Preto, 72(3), 543-551, <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672018720193>

**Pourghahramani**. P. és **Forssberg**. E. (2007): The characterization of structural changes in hematite ground in a confined particle bed using Rietveld analysis, *Int. J. Miner. Process.* 83 (2007) 47–59.

**Reichardt**. Y. és **Schönert**. K. (2003): Interpartical Breakage on Fine Hard Materials by Single and Multiple Compression. *Chemical Engineering & Technology*, 26(2), 191–197. doi:10.1002/ceat.200390028

**Schönert**. K. (1966): Einzeckorn-Druckzerkleinerung und Zerkleinerungskinetik Untersuchungen an Kalkstern-, Quarz- und Zementklinkerkornern des Großenbereiches 0,1-3 mm, *Diss, TH Karlsruhe*

**Schönert**. K. (1977): A method for fine and very fine comminution of brittle material behavior materials; Patent number: DE2708053A1

**Schönert**. K. (1979): Energetische aspekte des Zerkleinerns spröder Stoffe. *Zement-Kalk-Gips*, v. 32. p. 1-9.

**Schönert**. K. (1982): Method of fine and very fine comminution of materials having brittle behavior; Patent number: US4357287A

**Schönert**. K. (1988): A First Survey of Grinding with High-Compression Roller Mills, *International Journal of Mineral Processing*, 22, 401-412.

**Schönert**. K. (1991): The characteristic of Comminution with High Pressure Roller Mills, *KONA* No.9, 149-158.

**Schönert**. K. (1996): The influence of particle bed configurations and confinements on particle breakage, *Int. J. Miner. Process.* 44-45 (1996) I – 16.

**Schwechten**. D. és **Schönert**. K. (1984): Gutbett-Zerkleinerung mit grossen Pressungen von mineralischen Rohstoffen. In: *Fortschritte in Theorie und Praxis der Aufbereitungstechnik*, Freiberg Preprints, pp. 116-120.

**Sesemann**. Y., **Broeckmann**. C. és **Höfner**, A. (2013) A new laboratory test for the estimation of wear in high pressure grinding rolls. *Wear*, 302(1-2), 1088–1097. doi:10.1016/j.wear.2012.10.022

**Tomas**. J. (2014): *Folien\_MVT\_2neu Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie Zerkleinerung*

**Tromans D. és Meech J.A.** (2002): A Fundamental Analysis of Fracture Mechanics of Minerals during Comminution. Research being conducted at The Centre for Environmental Research in Minerals, Metals and Materials (CERM3), UBC. Via the internet, January 2023. <http://www.mining.ubc.ca/cerm3/energy%20efficiency.html>

**Van der Meer. F.P. és Maphosa. W.** (2012): High pressure grinding moving ahead in copper, iron, and gold processing, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Volume 112, 1.

**Von Seebach H. M., Neumann. E. és Lohnherr. L.** (1996): State-of-the-art of energy-efficient grinding systems. Zement-Kalk-Gips 49(2):61–67.

**Wüstner. H.** (1986): Energy-saving with the roller press comminution process. World Cement, 94–96.

## VI. Az értekezés témakörében készült publikációk jegyzéke

### *Nemzetközi folyóiratban megjelent cikkek:*

1. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2023) : Effect of material bed compression on white fused corundum product particle shape and bulk density. Open Ceramics 16 Paper: 100489 8 p. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100489>

### *Nemzetközi konferencia kiadványokban megjelent publikációk:*

2. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2023) : Effect of the impact breakage type on the properties of White Fused Mullite particles. In: PARTICLE TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE PRODUCTS - BOOK OF ABSTRACTS. (2023) p. 711, 26-28 Sept. Nuremberg, Germany.
3. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2024): The effect of non-ideal particle bed breakage on the particle shape of white fused corundum. In: Fajtli J.. Book of Extended Abstracts of the 18th European Symposium on Comminution & Classification: ESCC 2024. (2024) ISBN:9786156018250 pp. 94-97. 27-29 June 2022, Hungary, Miskolc.

### *Hazai folyóiratban megjelent cikkek:*

4. **Rácz. Á., Tamás. L.** (2019): Development of a laboratory scale continuous dry stirred media mill. ÉPÍTŐANYAG: JOURNAL OF SILICATE BASED AND COMPOSITE MATERIALS 0013-970X 2064-4477 71 (3) pp. 92-96. [10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.17](https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2019.17)
5. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2021): Comparison of particle size and shape distribution of corundum produced by industrial ball mill and material bed compression. MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 2062-9737 2786-1465 11 (5) pp. 59-67 2021. [10.35925/j.multi.2021.5.6](https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.5.6)

6. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2022): Material bed compression experiments and the examination of the bulk density of the product. GEOSCIENCES AND ENGINEERING: A PUBLICATION OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC 2063-6997 10 (15) pp. 110-124 2022 [10.33030/geosciences.2022.15.110](https://doi.org/10.33030/geosciences.2022.15.110)

***Hazai konferencia kiadványokban megjelent publikációk:***

7. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2022): COMPARISON OF SINGLE PARTICLE BREAKAGE BY COMPRESSION LOADING AND A BREAKAGE BY MATERIAL BED COMPRESSION LOADING WITH THE EXAMINATION OF THE DISPERSITY PROPERTIES OF THE PRODUCTS, Molnár Dániel. Tavasz Szél 2022 / Spring Wind 2022 Tanulmánykötet I. (2022) ISBN:9786156457134 pp. 220-234

***Konferencia előadások:***

8. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2021): Anyaggyősszenyomási kísérletek és a termékfrakciók halmazsőrűségének vizsgálatai. Doktoranduszok Fóruma 2021.11.18. Miskolc.
9. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2021) : Comparison of particle size and shape distribution of corundum produced by industrial ball mill and material bed compression. MicroScience-MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference. Miskolc
10. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2022): Comparison of single particle breakage by compression loading and a breakage by material bed compression loading with the examination of the dispersity properties of the products. Spring Wind Conference 06.05.2022. Pécs.
11. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2023): Effect of impact breakage type on the properties of white fused mullite particles. 26-28 Sept. 2023. PARTICLE TECHNOLOGY, Nuremberg, Germany.
12. **Tamás. L. és Rácz. Á.** (2024): The effect of non-ideal particle bed breakage on the particle shape of white fused corundum. 18th European Symposium on Comminution & Classification: ESCC 2024. 27-29 June 2022, Hungary, Miskolc.