

**Finom szemcsés tűzállóipari alapanyagok diszperzitási tulajdonságainak
szabályozása és szemcsetervezése őrlési műveletekkel**

Doktori (PhD) értekezés

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, az MTA levelező tagja

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. Áttekintés a lassú kompressziós szemcseágyas aprítás és annak alkalmazása területén a HPGR berendezésekben	3
2.2. Az egyszemcsetörés folyamata, leírása, kutatási eredményei	6
2.2.2. Az alapvető szemcsetörési mechanizmusok	8
2.2.3. A törési paraméterek hatása a törési folyamatra.....	9
2.3. A szemcseágyas aprítás kutatási eredményei	14
2.3.1. Fenomenológiai vizsgálatokkal elért eredmények	14
2.3.2. A zárt szemcseágyas aprítás kutatási eredményei modellvizsgálatokkal..	18
2.3.3. A zárt szemcseágyas aprítást befolyásoló tényezők és hatásaik.....	21
2.4. Megállapítások, következtetések és a tudományos hiányterület megfogalmazása a szakirodalmi kutatás alapján.....	32
3. A kutatómunka célkitűzései, vizsgálati és értékelési módszerek	34
3.1. A kutatómunka célkitűzései.....	34
3.2. Kísérleti berendezések	36
3.3. A mérésekhez használt anyagok	37
3.4. A kiértékelési módszerek.....	41
4. Dugattyúsprés kísérleti eredmények.....	41
4.1. Kísérleti és kiértékelési módszerek.....	42
4.2. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a töret szemcseméret-eloszlására	46
4.3. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása az aprítási fokra.....	50
4.4. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a termékkihozatalra	52
4.5. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a termék szemcse-szfericitásra	53
4.6. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a termék halmazsűrűségére.....	56
4.7. A zárt szemcseágyas törési mód hatékonyságának bemutatása a szfericitás növekmény és kihozatal mérőszámainak segítségével	60
4.8. A statikus szemcseágy összenyomási eredmények átfogó értékelése	61
5. Félüzemi méretű HPGR berendezés fejlesztése és mérési eredményeinek bemutatása	62
5.1. Kísérleti és kiértékelési módszerek.....	63
5.2. Berendezésfejlesztés	68
5.3. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a töret szemcseméret-eloszlására	74
5.4. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a termékkihozatalra	75

5.5. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a termékfrakciók szfericitására ...	76
5.6. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a termékfrakciók halmazsűrűségére	81
5.7. A zárt szemcseágyas törési mód hatékonyságának bemutatása a szfericitás növekmény és kihozatal mérőszámainak segítségével HPGR termékek esetén	84
5.8. A zárt szemcseágyas törési mód hatékonyságának bemutatása a szfericitás növekmény és a frakciókihozatal mérőszámainak segítségével HPGR termékek esetén	85
5.9. A dinamikus szemcseágy összenyomási eredmények átfogó értékelése	88
6. Horizontális és vertikális tengelyű röpítőtörők mérési eredményeinek bemutatása	90
6.1. Kísérleti és kiértékelési módszerek	91
6.2. A rotor kerületi sebesség hatása HSI és VSI berendezésekben előállított mullit termékek szemcseméret-eloszlására és a feladási tömegáram hatása VSI berendezésben előállított mullit termékek szemcseméret-eloszlására	93
6.3. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása az aprítási fokra HSI és VSI berendezésekben	96
6.4. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termékkihozatalra HSI és VSI berendezésekben	97
6.5. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termék szemcse-szfericitásra HSI és VSI berendezésekben	98
6.6. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termék halmazsűrűségére HSI és VSI berendezésekben	100
6.7. A HSI és VSI berendezések termékre gyakorolt hatásainak bemutatása a szfericitás és halmazsűrűség növekmények, illetve a termék kihozatal mérőszámainak segítségével	103
6.8. A röpítőtörős kísérleti eredmények átfogó értékelése	104
7. Összefoglalás	105
Summary	108
Köszönetnyilvánítás	111

1. Bevezetés

Alapvető emberi törekvésünk a fejlődés és fejlesztés során, hogy azt a lehető leghatékonyabban éadjuk el. A hatékonyság viszont az adott körülmények függvényében változatosan definiálható. A termelő ipar számára az alapanyagok előkészítése során kritikus fontosságú, hogy az a lehető legkisebb környezeti terhelés mellett kerüljön a kívánt állapotba. Ennek egyik fontos alappillére az a szemlélet, miszerint a szakembereknek törekedniük kell arra, hogy folyamatos kutatásaik és fejlesztéseik révén a már létező technológiai folyamatok és az új, innovatív gyártási metódusok energetikailag hatékonyabbak legyenek elődjeiknél. Bár a tudomány és a technológia folyamatosan fejlődik, az olyan globális krízishelyzetek, mint a 2022-ben történt energiaárrobbanás, további relevanciát kölcsönöztek ennek a folyamatnak, mely komoly kihívás elé állította az egész világot, különösképpen Európa iparát a megnövekedett gyártási önköltségek következtében. Mind az állami, mind a gazdasági szereplők rákényszerültek az energiafelhasználásuk átgondolására és racionalizálására. Különösen igaz ez az olyan iparágak esetében, melyek a (EII-s- Energy Intensive Industries) Energiaintenzív Iparhoz tartoznak, mivel ezen esetekben a termék-előállítás önköltségének jelentős hányadát teszi ki az energia ára. Számos esetben azonban a változatos technológiai folyamatokkal, nagy energiaintenzitás mellett előállított alapanyagok további mechanikai eljárás-technikai előkészítésre szorulnak annak érdekében, hogy a felhasználási terület által megkívánt terméktulajdonságokkal is rendelkezzenek. Tekintettel arra, hogy a mechanikai eljárás-technika 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 (Abouzieed 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.

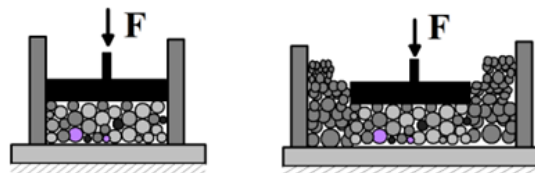
A tudományos értekezésem témájának fókuszában a mesterségesen előállított, magas alumínium-oxid tartalmú, különleges mechanikai tulajdonságokkal rendelkező tűzállóipari alapanyagok aprítási műveletekkel végzett szemcsetervezése áll. Ezen anyagok aprítása, keménységük (Mohs), korund: 9, mullit: 6-7 és abrazív tulajdonságuk miatt rendkívül nehéz feladat. A legnagyobb gyártási volumennel ebben az anyagcsoportban 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, orvostechológia és a különböző kopásálló felületek gyártásával foglalkozó lamináltipar, melyek különösen szigorú kritériumrendszernek megfelelő korundfrakciókat használnak fel a termelési folyamataikban.

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. Már a kutatásaim kezdeti szakaszában a figyelmem a zárt szemcse-anyagágyas (későbbiekben zárt szemcseágyas) aprítás felé fordult, amely igénybevételi mód biztosíthatja a kellő szemcseméretcsökkentési hatékonyságot és a szükséges szemcsetulajdonságokat is, miközben ezt az aprítási módot nem alkalmazzák ezen anyagokra Pedrosa és társai (2019) szerint. A tudományos kutatásom során a Refra-System Kft. saját technológiával olvasztott alapanyagaival dolgoztam, ahol a mindennapokban fejlesztőmérnöki tevékenységgel segítettem és jelenleg is segítem a vállalat munkáját.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Áttekintés a lassú kompressziós szemcseágyas aprítás és annak alkalmazása területén a HPGR berendezésekben

Az aprítási folyamatba befektetett energiahasznosulás szempontjából Schönert (1979) szerint a leghatékonyabb nyomás igénybevételén alapuló törési módszer az, ha a nyomás okozta terhelés egy szemcsét ér. Energetikai szempontból ezt követi a zárt szemcseágyat érő, végül pedig a nem zárt szemcseágyat érő kompressziós törés során létrejövő szemcseméretcsökkenés. Az 1. ábrán a szemcsék alkotta szemcseágy, valamint a zárt és a nyitott térben végzett szemcseágy összenyomás elvi elrendezése látható.



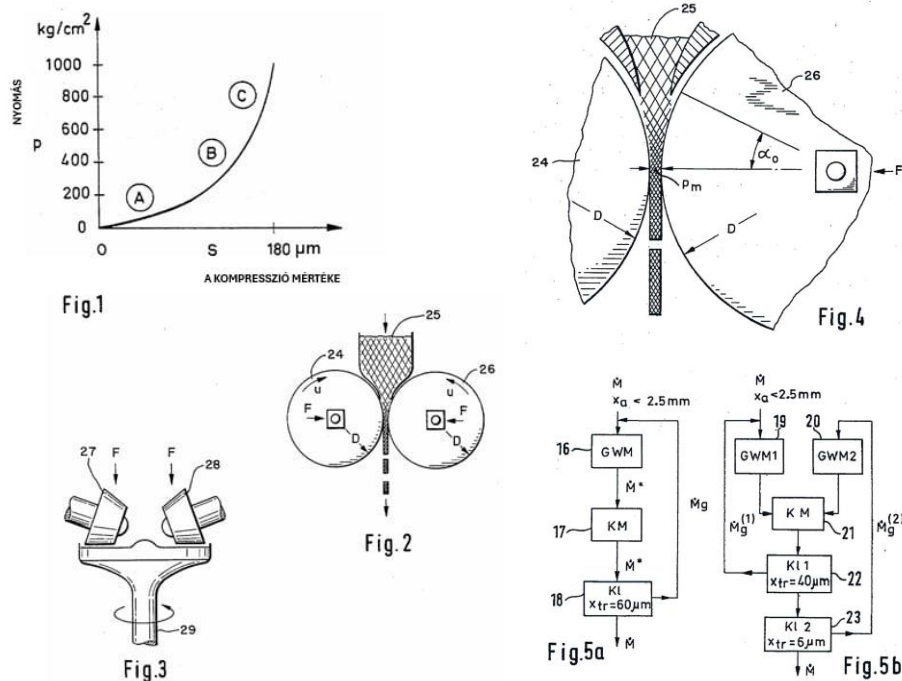
1. Ábra Szemcseágy összenyomás zárt és nyitott térben

Forrás: Folien_MVT_2neu Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie
Zerkleinerung Prof. Dr. J. Tomas 15.03.2014

Az egy szemcsét érő kompressziós törési mechanizmus jellemzően hengeres-, kúpos-, kör- és pofástörőkben valósítható meg, de ehhez a feladási anyag szemcseméretének és az adott berendezés üzemparamétereinek is megfelelőnek kell lennie. Könnyen belátható, ha az előbbieken megemlített berendezések üzemeltetésének adott pillanatában az igénybe vett szemcsénél jelentősen nagyobb részméret- szemcseméret viszonzyszám áll fent, akkor oda több szemcse kerülhet be, így nem egyszemcsétörési folyamat jön létre. A hengeres -, kúpos- és pofástörőkben való, egyszemcse aprítási vizsgálatok eredményeit Gutsche, és társai (2004), Kaya és társai (2002) és Bengtsson (2021) tette közzé. A zárt szemcseágyas törést egy eddig hazánkban jellemzően kevésbé ismert, ipari szinten nem elterjedt berendezésben, a nagynyomású őrlőhengerpárban (HPGR - High pressure grinding rolls) lehet folyamatos üzemben kivitelezni. A nem zárt agyagágyas törési technológia pedig a hazánkban is jól ismert gyűrűsmalmokban valósítható meg folyamatos üzemben. Míg a törők, valamint a gyűrűsmalmok kiterjedt alkalmazásra tettek szert a szemcseméretcsökkentés széles területein, addig a nagynyomású őrlőhengerpár mindössze néhány évtizeddel ezelőtt kezdett ipari szinten is elterjedni a világon.

Az 1900-as évek vége felé a kutatók a konvencionális aprítási és őrlési folyamatok tanulmányozásával és az ezek során lejátszódó alapjelenségek tanulmányozásával kezdtek el foglalkozni, hogy jobb energetikai hatékonyságot érjenek el, melynek

következtében az ipari szereplők termelési költséget csökkenthettek vagy termelékenységet növelhettek adott fajlagos költségek mellett. Ennek érdekében végzett 1980-ig Professzor Klaus Schönert német kutató, olyan alapkutatásokat, ahol dugattyús présben vizsgálta meg a zárt szemcseágyas törési módszer ideális feltételeit és a különböző mérési paraméterek hatását a keletkezett szemcsehalmaz diszperzitási tulajdonságaira (Schönert, 1979) és (Schönert és Flügel, 1980). Ezek az alapkutatások és mérések eredményei vezettek végül oda, hogy 1977-ben Németországban (Schönert, 1977), majd 1982-ben (Schönert, 1982) az Amerikai Egyesült Államokban is szabadalmaztatta a nagynyomású zárt szemcseágyas aprítási módszerét.



2. Ábra 1. Szemcseágy kompakciós diagram, 2-3. a szemcseágyas aprítás gyakorlati megvalósítása, 4. a szemcseágyas kompresszió nagynyomású örlőhengerpárban, 5. jellemző termékkihozatal ábra HPGR-rel (a) és nélküle (b)

Forrás: Method of fine and very fine comminution of materials having brittle behavior
US4357287A (1982)

1984-ben a HPGR technológia még nem talált ipari alkalmazási területre annak ellenére sem, hogy Schönert és Knobloch (1984) javaslata szerint ez az alternatív szemcseméretcsökkentő eljárás számos előnnyel bírt a korabeli, és még mai napig is népszerű és elterjedt konvencionális aprítási és őrlési technológiákkal szemben. Állításuk szerint ez az aprítási folyamat jó energiahatékonyságú, miközben az alacsony fajlagos berendezéskopás mellett segít elkerülni a jólismert túlőrlés jelenségét is. A nagy fajlagos

feldolgozóképeséget igénylő cementgyártás, mely különösen érzékeny a szemcseméretcsökkentés területén is az energiahatékonyságra, vált az első ipari alkalmazási területévé az új HPGR technológiának 1985-ben (Kellerwessel, 1990) és (Fiege, 1993).

Az 1900-as évek végén számos szerző számolt be a HPGR berendezések előnyös tulajdonságairól a cementipar területén. Wüstner (1986) szerint a cementörlés 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 a 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, 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 bizonyítékául szolgál, hogy Daniel (2007) -es tanulmánya szerint, a világon nagyjából már 400 nagykapacitású HPGR berendezés üzemelt a klinkerörlés területén. Mindezek ellenére, az elsődleges ipari alkalmazások a HPGR berendezéseket illetően főleg az előaprítás területére koncentráltak, a későbbiekben mégis teret nyert magának a technológia a hibrid-örlés 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, amiket a bányászat már hosszú ideje keresett (Kodali és társai, 2011).

A bányáiparban való alkalmazhatóság előtt azonban még egy komoly problémára, nevezetesen a hengerpalástok felszínén keletkező egyenetlen kopásra kellett megtalálni a megoldást. Tovább nehezítette a helyzetet, hogy a bányászott nyersanyagok jelentős része abrazív tulajdonsággal rendelkezik. Annak érdekében, hogy ezt az abrazív hatást és az ebből következő hengerpalást kopást el lehessen kerülni, a kutatók fókuszába került a hengerpárok geometriájának és anyagának vizsgálata. A kutatások eredményeképpen a hengerpalástok optimális geometriája mellett, azok palástjára nagy kopásállóságú wolfram acél ötvözetű csapokat telepítettek, a feladott anyagtulajdonságok függvényében. Az

ideális távolságban elhelyezett csapok a feladott anyagból egy stabil szemcseágyat képezve meg tudják védeni a palástokat a kopástól, növelve azok élettartamát (Nagata és társai, 2020). A japán kutatók szerint az aktív aprítási zóna térfogata szintén megnövelhető, ha a csapok kisméretűek. Következésképpen, nagyobb nyomásintenzitás érhető el, mely jobb aprítási hatékonyságot eredményez, viszont a nagyobb erőhatások következtében erőteljesebb kopás fog jelentkezni a hengerpalástokon és a csapokon. A fejlődő anyagtudomány és anyagmegmunkálási folyamatok szintén hozzájárultak ahhoz, hogy egy olyan autogén aprítási folyamatot lehessen létrehozni, ahol az anyag-anyagon történő aprítása valósul meg, minimalizálva ezzel az eddig komoly problémát jelentő inhomogén kopást. A számos alapkutatás és berendezés fejlesztés eredményeképpen, hiába nem lettek minden részletre kiterjedően tisztázva a törési mechanizmus és technológia alkalmazása során lejátszódó folyamatok, egy gyémántbányában megtörtént a HPGR alkalmazása, melyen azonban ekkor még komoly kopás jelentkezett (Dicke, 2008). Az első igazán sikeres ércaprítási alkalmazás a chilei Los Colorados bányában történt meg 1998-ban. Akkoriban az őrlemény fajlagos felületének növelésére mindösszesen 14 darab nagynyomású őrlőhengerpár üzemelt a világ különböző bányáiban, illetve 3 darab a különböző ércek durvaaprítására (Van der MEER, 2012). Számos szerző megvizsgálta a HPGR berendezések alkalmazhatóságát és hatékonyságát különböző ércek esetén (Austin és társai, 1993), (Guevara és Menacho, 1993), (Morley, 2006), (Torres és Casali, 2009), (Michaelis, 2009), (Saramak, 2011), (Kodali és társai, 2011), (Zhu De-qing és társai, 2014), (Numbi és Xia, 2015), (Powell és társai, 2017), (Campos és társai, 2019), (Thomazini és társai, 2020), (Li és társai, 2022), (Santosh és társai, 2022) és (Chen és Yin, 2022). Plath (2005) szerint, 2005-ben már 29 gyémánt, 21 vasérc és 2 arany-réz bánya használt nagynyomású őrlőhengerpárt a bányáiban. 2013-ban Sesemann (2013) szerint pedig 130 HPGR berendezés üzemelt a világ számos érc és ásványianyag előkészítő üzemeiben.

Összegezve tehát, bár a zárt szemcseágyas aprítással kapcsolatos alapkutatások és tudományos közlemények napjainkban már háttérbe szorultak és kevés kutatót foglalkoztatnak, ezzel párhuzamosan a hangsúly átkerült a HPGR berendezések aprítási és kopási folyamatait leíró és modellező tudományos kutatásokra, melyekre nagy igény mutatkozik az ilyen berendezéseket üzemeltető bányavállalatok részéről.

2.2. Az egyszemcsetörés folyamata, leírása, kutatási eredményei

A szemcsés anyagok törése számos, jelenleg is kevésbé ismert mikrofolyamat eredményeképpen jön létre. Ennek fő oka, hogy ezeket a jelenségeket számos paraméter együttesen befolyásolja, és együttes hatásuk következtében fognak komplex hatást

gyakorolni a keletkezett tört szemcsék tulajdonságaira. Az egyszemcsetörés területén elvégzett szisztematikus vizsgálataival, melynek során (Schönert, 1966) kutatta a különböző anyagú szemcsék, törését és azok energetikai szükségleteit, az egyszemcsetörés szemcsemérettől való függését, az eltérő energiaszintek melletti egyszemcsetörési valószínűséget, valamint a termékszemcsék méreteloszlását, és fajlagos felületét, Schönert professzor lefektette az egyszemcsetörés tudományos leírásának alapjait. Schönert 1966-ban doktori értekezésében (Einzelkorn-Druckzerkleinerung und Zerkleinerungskinetik: Untersuchungen an Kalkstein-, Quarz-, und Zementklinkerkörnern des Größenbereiches 0,1 bis 3 mm) 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 törés, mint folyamat eredményeképpen kapott töret, alapvetően annak kémiai és diszperzitási tulajdonságaival jellemezhető. Az anyag diszperzitását meghatározza annak szemcseméret eloszlása, szemcsealak és morfológiája, illetve a határfelületi tulajdonságai. Ezen anyagsajátosságokat, melyek a kiindulási anyagot és/vagy a terméket együttesen jellemzik, tulajdonságfüggvényeknek nevezzük (Rumpf, 1967). Terméktervezésnek nevezi a szakirodalom azt a folyamatot, melynek során a tulajdonságfüggvények tudatos módosításával elérhetővé válik a kívánt termék tulajdonságfüggvények sora. A termék-előállítás során az eljárás függvény kapcsolja össze az adott eljárás paramétereit a termék tulajdonságfüggvényekkel (Krekel és Polke, 1992). Aprítás során definiálható egy malom függvény is, mely tartalmazza, az összes üzemeltetési paramétert, a berendezésben kialakuló igénybevétel típusát és a malom belső kialakítását. Ezen paramétereket együttesen az anyagi tulajdonsággal, az igénybevételi energia, az igénybevételi szám, a törési valószínűség és a törési függvény írja le, amik együttesen definiálják az eljárásfüggvényt (Peukert, 2004).

A szemcsetörés során lezajló mikrofolyamatok együttes hatása és mértéke képezi az alapját annak a makroszkopikus szinten lejátszódó és értelmezhető folyamatnak, melyet a mechanikai eljárás technika aprításnak nevez. Ahhoz, hogy az aprítás során végbemenő mikrofolyamatokat definiálni és vizsgálni lehessen, fontos tisztában lenni a törési alapjelenségekkel és az azt befolyásoló alapparaméterekkel (a törést kiváltó igénybevétel fajtája és mechanizmusa, ahogy a töretszemcse képződik; szemcsetörés-szemcseméret viszonya; a szemcsetöréshez szükséges energia; a szemcsetörés valószínűsége

különböző energiaszinteken; a töret szemcseméret eloszlása és az újonnan létrejött szabad szemcsefelület) melyeket Schönert az 1966 doktori disszertációjában alaposan megvizsgált. A fejezetben a szemcsés anyagokat alkotó szemcse, és az azt felépítő anyag aspektusából kerülnek bemutatásra a legfontosabb paraméterek. Szintén bemutatásra kerül még az energetikai megfontoláson alapuló szemcsetörési folyamat karakterizálás, és az alapvető szemcsetörési folyamatok is, valamint azok hatása a törési folyamatra.

2.2.2. Az alapvető szemcsetörési mechanizmusok

A törés során a szemcsére közvetített energia következtében a megfelelő kritériumrendszer teljesülése esetén bekövetkezik a szemcse tönkremenetele, a szemcse törést szenved. Makroszkopikus méretskálán szemlélve a folyamatot különböző hatások és eredmények figyelhetők meg a folyamat során. Jelen fejezetben a különböző szemcsetörési mechanizmusokat fogom bemutatni, melynek során különböző mértékű szemcseméretcsökkenés következik be a terhelt szemcsén. Minden szemcsetörési folyamat típus esetében elmondható, hogy a szemcsét ért igénybevétel hatására annak kohéziója csökken. Az alapvető szemcsetörési mechanizmusok Unland (2007) szerint a következők.

Szemcseszilárdság csökkenése: A folyamat során a szemcse többszöri igénybevételt szenved el, mely során a terhelés alacsony szinten marad, nem jelentkezik szemcsetönkremenetel és törés. A szemcsét ért terhelés hatására annak kohéziója és mechanikai szilárdsága csökken, alakja és szemcsemérete közel változatlan marad.

Szemcserepedezettség növekedés: Abban az esetben létrejövő jelenség, ha a szemcsében a terhelés hatására megindulnak a repedések, de a szükséges energia nem áll rendelkezésre, hogy azok a teljes szemcsekeresztmetszeten végig fussanak. A szemcse megtartja kiindulási alakját és méretét a folyamat végén.

Szemcsefelületi koptatás: Jellemzően a szemcsére átadott igénybevételi energia olyan alacsony, hogy a szemcsefelületén lévő egyenletlenségek dezintegrálásával rendkívül finom szemcsefragmentumok jönnek létre, illetve minimálisan csökken az anyaszemcse mérete.

Szemcsefelületi törés: Egy adott szemcse felülete jellemzően felületi érdességgel rendelkezik. Abban az esetben, ha a szemcse felületi érdessége csökken, a szemcse kontúrvonala kevésbé lesz érdes, a szemcse felületéről apró fragmentumok válnak le a törési folyamat során. Nagyszámú igénybevétel és alacsony igénybevételi intenzitás

jellemzi a folyamatot, melynek következtében egy nagyobb szemcse mellett sok, az anyaszemcsétől kisebb szemcsefragmentum alkotja a terméket.

Szemcsetörés: A kiindulási szemcsében erőteljes repedések futnak végig a folyamat hatására, melynek következtében az nagyobb darabokra esik, széthasad.

Dezintegráció: A teljes szemcse, vagy szemcsehalmaz dezintegrálódásával végződő folyamat. Az igénybevétel olyan mértékű, mely jóval meghaladja a szemcse törési szilárdságát. Eredményeképpen széles szemcseméret eloszlású töret keletkezik, jellemzően nagyszámú, és a kiindulási szemcsemérethez képest kis méretű szemcsékből álló termék jön létre.

2.2.3. A törési paraméterek hatása a törési folyamatra

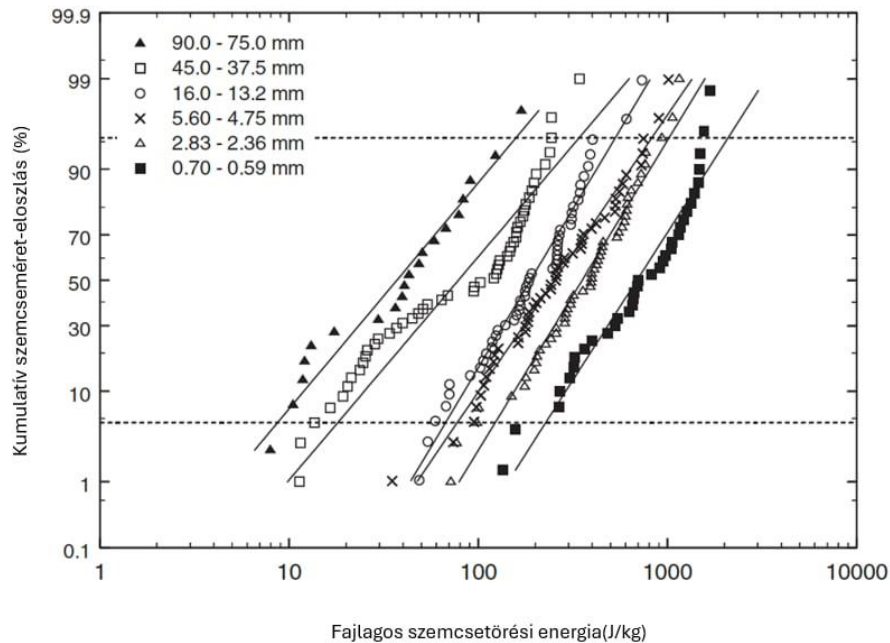
Fontos szót ejteni arról, hogy az alapvető szemcsetörési paraméterek miként tudják befolyásolni a törés folyamatát, ezzel pedig a termék tulajdonságfüggvényeit. Nem szabad azonban megfeledkezni róla, ahogy arról már korábban is szó volt, hogy a törési folyamat nagyon összetett, és a törésnek kitett szemcséket és tulajdonságaikat komplex egészként kezelve érthető csak meg a szemcsetörés folyamata. A következőkben bemutatásra kerül az igénybevételnek kitett szemcse néhány paraméterének, és az igénybevétel fajtáinak hatása a törési folyamatra és a termékre.

A szemcseméret hatása

A szemcseméret és annak eloszlása rendkívül fontos alapparaméter a szemcsetörési folyamatban. Számos termékfüggvényre, többek között a szemcsetörési energiaára, a szemcseszilárdságra, és a szemcseméret eloszlás függvényére is hatással van. Meg kell azonban említeni, hogy bizonyos esetekben, úgy, mint a szemcserugalmasság, a szemcseméret hatása elhanyagolhatóvá válik (Tavares, 2007).

A szemcseméret csökkenésével a szemcseszilárdsági mérőszámok javuló tendenciát mutatnak, mely jelenség főleg a rideg és törékeny anyagokból felépülő szemcsék esetében figyelhető meg. A jelenség oka az, hogy a szemcseszerkezeti hibák, pórusok és egyéb szemcseszilárdságot csökkentő tényezők statisztikai valószínűséggel jellemezve kisebb eséllyel fordulnak elő a kisebb szemcseméretű szemcsék esetén. A szerkezeti inhomogenitások lokális feszültségnövekedést idézhetnek elő, melynek következtében rugalmatlan deformációk és repedések jöhetnek létre (Schönert, 1991). A szerkezeti hiba mérete és a szemcse szilárdsága fordítottan arányos mennyiségek. A szerkezeti hibák nagyságának előfordulási valószínűsége együtt csökken a szemcsemérettel, ezért a kisebb szemcseméretű szemcsék jobb szilárdsági mérőszámokat mutatnak. A különböző mérései

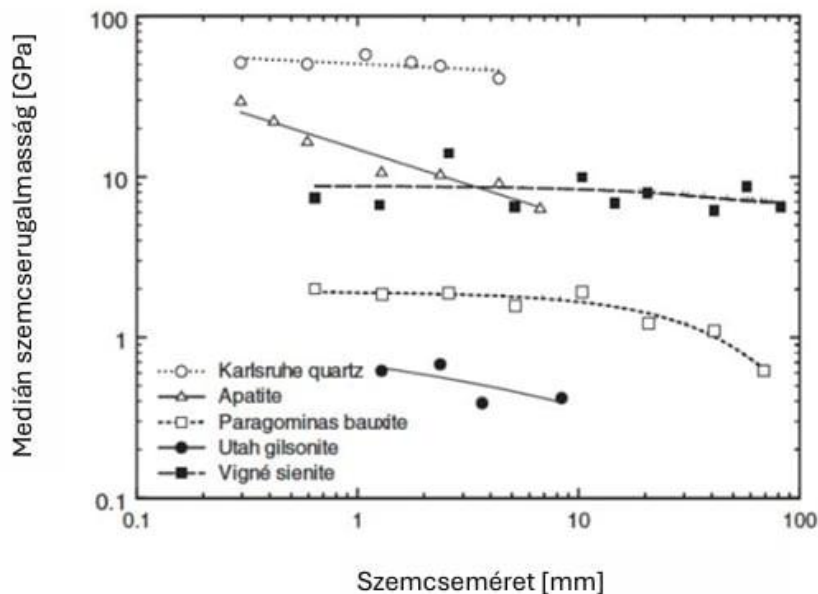
metodika szerint elvégzett egyszemcse törési vizsgálatok is azt mutatták ki, hogy a fajlagos szemcsetörési energia függ a vizsgált szemcseméret nagyságától, mely jól látható a 3. ábrán.



3.ábra. Egyes szemcsék törési valószínűség-eloszlása a szemcseméret függvényében

Forrás: L.M. Tavares (2007): Breakage of Single Particles: Quasi-Static, Chapter 1, Handbook of Powder Technology, Volume 12, 33-51.

Eltérő mérettartományokban vizsgálódva, de több szerző is hasonló következtetésre jutott a 0,3-15 mm és a 2-90 mm tartományban (Tavares és King, 1998, Frandrich és társai, 1998). Szélesebb mérettartományban, a néhány μm -tól közel fél méteres szemcséken át végzett kutatások is ezt az eredmény erősítették meg (Schönert, 1991, Yashima és társai, 1979, Yashima és társai, 1987, Unland és Sczelina, 2004). A szemcsetörési energiától eltérő módon, ahogyan azt a 4.ábra is szemlélteti, a szemcserugalmasság esetében nincs számottevő kapcsolat a szemcsemérettel összefüggésben (Tavares és King, 1998).



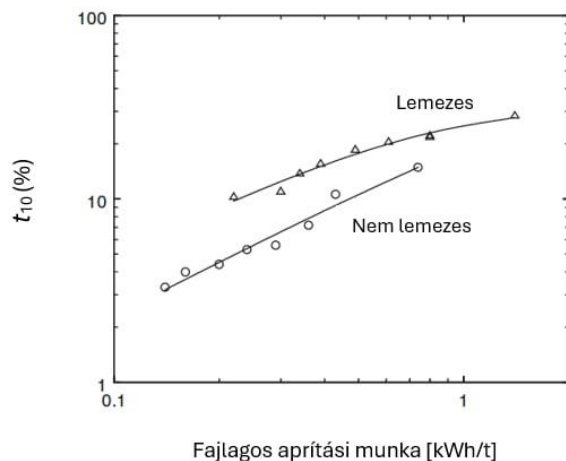
4.ábra. Különböző anyagú szemcsék rugalmassága

Forrás: L.M. Tavares (2007): Breakage of Single Particles: Quasi-Static, Chapter 1, Handbook of Powder Technology, Volume 12, 33-51.

A szemcsealak hatása

Ahogyan a szemcseméretnek, úgy a szemcsék alakjának is számottevő hatása van a törés során, hiszen a szemcsék alakja közvetlenül befolyásolja a bennük kialakuló feszültségeloszlást. Mindennek ellenére, a szemcsealak hatásának vizsgálatára a szemcsetörés és az aprítás területén nincs számottevő és szisztematikusan kivitelezett mérésen alapuló nemzetközi publikáció és kiterjedt szakirodalom. Ez legfőképpen annak tulajdonítható, hogy nincs nemzetközileg elismert metodika a szemcsealak törés során betöltött szerepére (Unland, 2007). Rumpf (1973) és Schubert (1987) azonban arra a következtetésre jutottak, hogy a törés közbeni energiahasznosulás mértéke változóan alakul a szemcsealak függvényében. Míg az azonos átmérőjű üvegszemcsék törési energiaszükséglete egyenlőnek adódott, addig a szabálytalan szemcsealakú, de hasonló szemcseméretű üvegszemcsék lassú kompressziós törési energiaszükséglete nagymértékben változó értékeket mutatott. A csökkenő befektetett energiahasznosulás magasabb aprítási energiaszinten a növekvő súrlódási energiaveszteségnek lett tulajdonítva, melynek a szemcsék szabálytalan alakjából adódó megnövekedett kontakt felület volt az oka (Rumpf, 1973). Üveggömbök és üveghengerek kompressziós vizsgálatával is hasonló következtetést sikerült levonni, mégpedig azt, hogy a lokális feszültségkoncentráció és az ebből eredő szemcsetörési energiaszint széles körben változott az alaktényezők függvényében. Továbbá megállapításra került az is, hogy az

igénybevétel nagysága helyett, fontosabb paraméter a szemcsére átadott energiahatékonyság megoldása, és a benne már tárolódott energia mennyisége (Kenny és Piret, 1961). Egyszemcse törés során (Napier-Munn és társai, 1996) kimutatták, hogy a szemcsealak közvetlenül befolyásolja a termék szemcseméret-eloszlását, úgy, hogy a lemezes és túszerű szemcsék finomabb töretet eredményeztek azonos fajlagos aprítási munka felhasználásával, melyet a 5. ábra szemléltet.



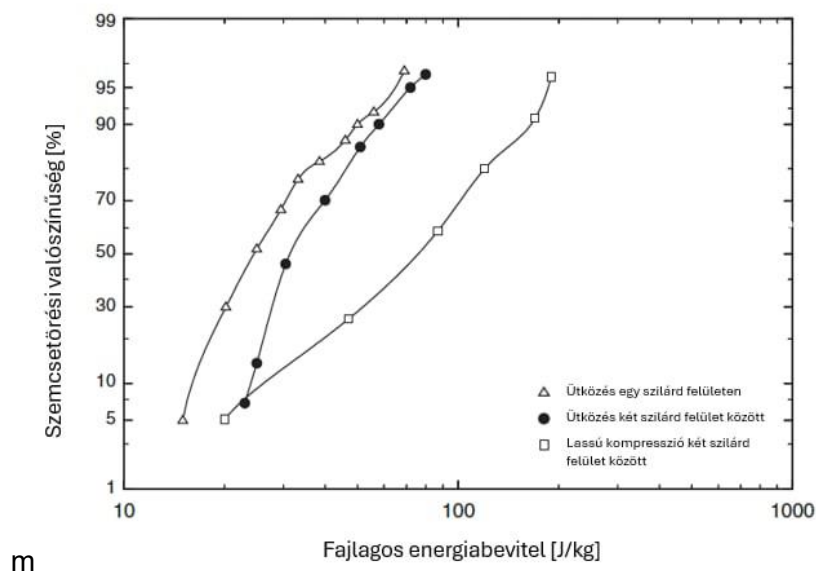
5.ábra. A lemezes és a nem-lemezes szemcsealak hatása a töret finomságára különböző fajlagos aprítási energiaszinteken

Forrás: T.J. Napier-Munn, S. Morrell, R.D. Morrison és T. Kojovic. (1996): Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, University of Queensland, Brisbane.

Az igénybevételi típus hatása

A szakirodalomban fellelhető publikációk között jónéháynak a kutatási témája az igénybevétel típusának a szemcsetörési mechanizmusban betöltött szerepe és annak hatása a keletkezett töretszemcsékre. Számos szerző megvizsgálta az ütközés különböző fajtáit, illetve a lassú nyomással történő szemcsetörés hatásait (Bond, 1946, Schönert 1966, Bergstrom és társai, 1961, Arbiter és társai, 1969, Schubert, 1987, Baumgardt és társai, 1975, Schönert, 1996, Genc és társai, 2004, Márkus és Rácz, 2022). A nagyszámú tudományos kutatás és közlemény ellenére az elért eredmények összehasonlíthatósága nehézségekbe ütközik, a vizsgálati berendezés és a mérési metodikában található eltérések miatt. Mindezek ellenére az alábbi következtetéseket vonták le a következő szerzők. Az eltört szemcsék szemcseméret-eloszlás függvénye az igénybevételi típustól azonos törési energiaszintek esetén nem függ számottevően (Bergstrom és társai, 1961,

Arbiter és társai, 1969, Baumgardt és társai, 1975), viszont a szemcsék törési valószínűsége igen (Schubert, 1987). Megvizsgálva a különböző igénybevételeket, a legnagyobb törési valószínűség az egy szemcsét ért ütközés során adódott. Ezt követte az egy szemcsét ért, két felület között létrejövő ütségi igénybevétel, majd a lassú kompressziós igénybevétel legalacsonyabb törési valószínűsége azonos energiaszintek mellett Schubert (1987) szerint, melyet a 6. ábra szemléltet. Schubert (1987) megfogalmazásában az adott anyagú és méretű szemcsék az igénybevételi esemény hatására törést szenvednek el, melyet törési valószínűségnek nevezett.



6. ábra. 12,5 mm-es égetett agyagpelletek törési valószínűsége különböző fajlagos energiaszinteken az eltérő igénybevételi módok hatására

Forrás: H. Schubert (1987): Aufbereit.-Tech. 5

A gömb alakú üvegszemcséken végzett kísérletek is hasonló eredményt mutattak a törési valószínűséget illetően Baumgardt és társai, (1975) szerint, míg a homokon, cementen és gömb alakú szemcséken végzett kísérletek során éppen az ellenkező eredmény adódott (Arbiter és társai, 1969). Schönert (1991) a törésbe befektetett energiahasznosulás szempontjából hatékonyabbnak találta a lassú kompressziós igénybevételt, mint az ütközéssel járó igénybevételt. Jól látható, hogy a mérési módszerek és berendezések eltéréséből adódóan a szerzők egymásnak ellentmondásos eredményekre jutottak.

Az igénybevételi intenzitás hatása

Az egyszemcsét ért igénybevétel intenzitásának hatása a legszéleskörűbben megvizsgált terület, mivel közvetlen következménye van a törés során keletkezett utódszemcsék szemcseméreteloszlására. Az igénybevétel intenzitásának definiálása és megadása a

szakirodalomban leggyakrabban annak sebességének vagy az igénybevételi erőnek megjelölésével, illetve az ebből származtatott mérőszámokon keresztül történik meg. Számos szerző anyagminőségtől függetlenül arra a következtetésre jutott, hogy az igénybevétel sebességének növelésével, a szemcsetörési szilárdság is növekszik (Kobayashi, 1970), (Perkins és szerzőtársai, 1970). Egyszeri ütközéses igénybevétel esetén, a szemcsetörési minimum energián felül a szemcsével közölt többletenergia az utódszemcsék mozgási energiáját is fedezi, mely utólagos szemcse aprózódást is előidézhet. Kutatók megfigyelték továbbá, hogy az igénybevételi intenzitás növekedésével az ütközéses igénybevételek során, illetve a lassú kompressziós igénybevétel esetén is a törésre fordítódott energiahasznosulás csökkenő tendenciát mutat (Rumpf, 1973), (Schubert, 1987).

2.3. A szemcseágyas aprítás kutatási eredményei

A fejezetben bemutatom a fenomenológiai kísérleti és vizsgálati eredményeket, illetve számba veszem a különböző számítógépes modellezési technikákkal foglalkozó publikációkat is. Továbbá bemutatom a zárt szemcseágyas aprítást befolyásoló paramétereket és azok hatásait is a törési folyamatra és eredményére.

2.3.1. Fenomenológiai vizsgálatokkal elért eredmények

A szemcseágyas aprítás, mint minden törési folyamat eredményeképpen létrejövő komplex törési mechanizmus megértéséhez is elengedhetetlenül fontos tisztázni az alapparaméterek hatását és betöltött szerepét. Jelen esetben az alap kutatások elvégzése különösen indokolt a nagyszámú szemcse együttes viselkedésének megértéséhez. Ezen a tudományterületen alkotott maradandót Professzor Klaus Schönert, akinek kutatásai és eredményei mindmáig meghatározó szerepet töltenek be a szemcsetörés és az aprítás megértésében és leírásában. Bár korábban a 2.1. fejezetben már megemlítettem néhány információt Schönert munkáival kapcsolatosan melyek összekapcsolták a szemcseágyas aprítás jelenségét az ipari HPGR berendezések elterjedésének történelmi áttekintésével, az ezen a területen elvégzett főbb kutatómunkákat jelen fejezetben közlöm. Klaus Schönert, Rumpf Professzor 1977-ben történő nyugdíjba vonulása után, a Karlsruhei Egyetemen kutatóival együtt kezdte el vizsgálni a zárt szemcseágyas aprítást dugattyúsprésszerű berendezésben. A Schönert által használt dugattyúsprésszerű berendezés és metodika, mind a mai napig standard eljárás a szemcseágyösszenyomással történő igénybevétel vizsgálatára szemcsés anyagalmazatok esetén. 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 energiahatékonyságú szemcseméretcsökkentést tesz lehetővé. 1984-ben egy laborméretű, 200 mm hengerátmérőjű, 0,1-3 m/s kerületi sebességgel üzemelő HPGR berendezést épített kutatótársával (Schwechten és Schönert, 1984). Az első ipari alkalmazásra 1985-ig kellett várni, melynek során 4 db berendezés készült el a cementipar számára, golyósmalmi őrlés hatékonyságnövelésének céljából, előaprításra (Schönert, 1988). Alapvető berendezéstervezési és méretezési módszert mutatott be a folyamatosüzemű nagynyomású szemcseágyas aprítás gyakorlati megvalósítására. Továbbá számos különböző anyagú és szemcseméretű feladással igazolta az energiahatékonyabb aprítási módszer létjogosultságát az akkortájt leginkább használatos golyósmalmokkal szemben. Az effektív szemcseágyas aprítás minimum kritériumaként, a szemcseágyban ébredő 50 MPa nyomást határozta meg, 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. Homogénean 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 a szemcseágy átmérője legalább háromszor akkora, mint annak magassága. Professzor Klaus Schönert munkája nyomán számos neves kutató vizsgálódott a szemcseágyas aprítás területén, jelentős mennyiségű és minőségű kutatási eredményt produkálva már az 1990-as évektől kezdődően az évezredfordulóig. Az élelmiszer és gyógyszeriparban használatos szűken osztályozott és osztályozatlan szukróz frakciókon végeztek szemcseágy kompációs kísérleteket dugattyúsprésben (Butler és társai, 1990). Kutatásuk fókuszában a két különböző szemcseméreteloszlású, de hasonló 0,325 mm átlagos szemcsemérettel jellemezhető szukrózfrakció szemcseágyas aprítása állt, melynek során megállapították, hogy a két anyag hasonló kompációs diagrammal jellemezhető a szemcseágyas igénybevétel során. Ugyanebben az évben publikálták munkájukat Kanda és társai (1990) kvarcsemmék dugattyúsprésses aprításában. A japán kutatók úgy találták,

hogy az igénybevételnek kitett szemcseágyvastagság csökkentésével finomabb töret érhető el. Megállapították, hogy hasonló eredményre vezet a magasabb szemcseágynyomás is adott szemcseágyvastagságok esetén, tehát növekszik a szemcsék törési valószínűsége. A későbbiekben Kanda és társai (1996) a szemcseágyban elhelyezkedő szemcsék méretének hatásait vizsgálták a törési folyamat során dugattyúprésses kísérleteikkel. A szemcseágyban létrejött nyomás, a szemcsekeménység, a feladási szemcseméret, az energiaabszorpció és az energiahasznosulást kutatták Fuerstenau és társai (1996) nyolc különböző érc és ásványmintán, dugattyúprésses kísérleteik során. A kúpostörőkben lejátszódó folyamatok jobb megértése érdekében végzett dugattyúsprésszel szemcseágy aprítási kísérleteket (Evertsson és Bearman, 1997). Vasércen és ólom-cink ércen végzett szemcseágy összenyomással történő aprítási vizsgálatokat Fandrich és társai (1997), míg Apling és Bwalya (1997) a feltártsági fok növelése és a flotálhatóság javítása témájában közölt eredményeket. A szemcseágyas aprítás kinetikáját vizsgálta meg dugattyúsprésben Gutsche és Fuerstenau (1999) annak érdekében, hogy megértsék, a feladáshoz adagolt finom dolomit hogyan befolyásolja az aprítási hatékonyságot. Kutatásuk során sikeresen stabilizálták a szemcseágyban elhelyezkedő durva szemcséket finomabb szemcsékkel körülvéve, melynek eredményeképpen az őrlési kinetika befolyásolhatóvá vált. Szintén dugattyúprésses kísérleteik során, négy eltérő szemcseméretű mészkőmintán végeztek szemcseágyösszenyomási vizsgálatokat Oettel és társai (2001), a hexánsav aprítási hatékonyságra gyakorolt hatásának megértése érdekében. Kísérleteiket a későbbiekben úgy egészítették ki, hogy a szemcseágyban lejátszódó törési és anyagtranszport folyamatok kamerával is rögzíthetőek legyenek (Oettel és Husemann, 2004). Csőke és társai (2004) mérésekkel igazolták a diaszpóros bauxit nagynyomású előaprításával elérhető Bond-munkaindex csökkenését. Hematit mintákon végzett szemcseágyösszenyomás vizsgálatokat dugattyúsprésben Pourghahramani és Forssberg (2007), az aprítási hatékonyság értékelése, és az anyagban létrejövő strukturális változások, legfőképpen az amorfizáció mértékének mérése érdekében. Mészkő és kvarcmintákon elvégzett szemcseágyas aprítási kísérleteket folytatott le Mütze és Husemann (2008) a kompakció sebességének hatását vizsgálva az aprítási hatékonyságra. A feladási szemcseméret hatását a szemcseágyas aprításban kvarc és kalcit esetében Hosten és Cimilli (2009) vizsgálta meg. Különböző ásványtani összetételű és struktúrájú szulfidos ércek szemcseágy aprításos feltárásának hatékonyságával kapcsolatosan tették közzé kutatási eredményeiket Vizcarra és társai (2010). Doktori értekezésében Rosario (2010) körfolyamatos őrlési technológiában vizsgálta meg a HPGR

berendezés alkalmazhatóságát, melyhez többek között dugattyúsprés berendezést is használt. Szakdolgozatában Van Schoor (2012) arra a kérdésre kereste a választ, hogy alkalmazható-e a dugattyúsprésben kivitelezett szemcseágyas aprítási módszer, a HPGR berendezésekben lezajló jelenségek reprezentálására apatit és cink-ólom érc esetén, melynek eredményeképp meghatározta azok szemcseágyas aprítási munkaindexét. A szemcseágyas aprítás területén végzett kutatásokat az igénybevétel sebességének vizsgálatával Ozcan és Benzer (2013), megvizsgálva annak hatását a feltártsági fok változására. Diplomamunkája során (Wang, 2013) dugattyúspréses kísérletek segítségével vizsgálta meg a nagyszámban elterjedt fél- és teljesen autogén-golyósmalom őrlőfolyamatok kiválthatóságát, HPGR- golyósmalom és HPGR- keverőmalom őrlőfolyamatokra. Mütze (2015) nagy hangsúlyt fektetett kutatásai során az aprítás energetikai aspektusára, azon belül is az energiaveszteségek számszerűsítésére. A kutató a szemcseágyban elhelyezkedő szemcsék törése során lezajló mikrofolyamatok közül elhanyagolhatónak találta, a szemcseágy tömörödése során eltávozó gázhalmazállapotú anyag aprítást hátráltató hatását a szemcsék közt fellépő súrlódási energiaveszteséghez képest (Mütze, 2015). Megállapította továbbá, hogy a szemcsék szemcseágyban történő kompaktciója tisztán elasztikus és plasztikus alakváltozási részekre bontható, ahol az elasztikus deformáció a szemcseágy elaszticitásával jellemezhető, mely eltér a szemcsét felépítő anyag rugalmassági modulusától (Mütze, 2016). Kétkomponensű ércek anyaágyas aprítását dugattyúsprésben vizsgálta meg (Liu és Powell, 2016) annak érdekében, hogy ezáltal kiszámíthatóvá váljon a többkomponensű ércek ilyen módon történő aprítása is. Kvarcsemmek szemcseágyas aprítási kísérleteit folytatták le Abouzeid és társai (2017) a szemcseágynyomás, szemcseágyvastagság és a kompaktció aprítási hatékonyságra gyakorolt hatásainak vizsgálatával. A szemcseágyas aprítási folyamatot rendkívül jól megfigyelhetővé tevő kísérletsorozatot folytattak le Jiang és szerzőtársai (2018), melynek során plexiüvegből készült, transzparens téglében aprítottak le szintererelt alumínium-oxid és kaolin-agyag keverékű kerámiagolyókat. A szerzők megjegyezték továbbá, hogy bár jelentős szakirodalom érhető el az aprítás ezen területén, a szemcseágyas aprítást folyamatában bemutató, és makroszkopikus szinten tárgyaló kutatások száma nem számottevő. A kínai szerzők szerint szintén nagyobb figyelmet kellene fordítani a törési folyamat eredményeképpen létrejött szemcsék morfológiájának vizsgálatára. Méretükből fakadóan egyszemcse törési mérésekkel nehezen vizsgálható 150 μm -tól kisebb szemcseméretű vasércpelletek szemcseágyas aprítási vizsgálatait végezték el Campos és társai (2021) dugattyúsprés berendezésben. Jiang és társai (2021) a töret szemcseméret-eloszlásának előrejelzésére végeztek el szemcseágy aprítási kísérleteket

dugattyúsprésben, melynek során az egyszemcse törést jellemző függvényeket korrigálták saját mérési eredményeikkel, kiterjesztve azokat szemcseágyaprítási alkalmazásra is. Lieberwirth és Kühnel (2021) a szemcseágyas aprítás során jelentkező szelektív aprítás jelenségének mélyebb megértése érdekében végeztek dugattyúspréses méréseket. A szemcseágyas aprítás ipari méretű megvalósításához használt HPGR berendezések üzemi paraméterei közül a résméret vizsgálatával kapcsolatosan végeztek dugattyúsprés kísérleteket (Pamparana és Klein, 2021). A későbbiekben hasonló kísérletsorozatot folytatva, Pamparana és társai (2022) a HPGR berendezések kapacitásának meghatározását kutatták, kihasználva a dugattyúspréssel történő aprítás minimális mintaanyag igényét egy HPGR berendezéshez képest. Kumar és szerzőtársai (2023) a HPGR tesztek nagy mintaigényén alapuló megfontolásból, zártciklusú dugattyúspréses vizsgálati módszert fejlesztettek ki. A mezőgazdasági termények szállítás és feldolgozás közben jelentkező, aprózódásával kapcsolatos folyamatok megértése érdekében rizsszemek szemcseágyas aprítását vizsgálták meg Shen és szerzőtársai (2023).

A szemcseágyas aprítás vizsgálata dugattyúspréses kísérletekkel az elmúlt több mint 4 évtizedben számos szerző figyelmét vonzotta, 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 a jelen fejezetben 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 szemcseágyaprítási kutatásai során (Cooper és Eaton, 1962, Reichardt és Schönert, 2003, Karimi és Djokoto, 2012, Pedrosa és társai, 2019). Szintén fontos megemlíteni, hogy a szemcseágyas aprítással létrehozott töret diszperzitási tulajdonságainak vizsgálata közül a szemcsealak és az ebből adódó további következmények, mint a halmazsűrűség és folyási tulajdonságok sem álltak a kutatók fókuszában az elmúlt több mint négy évtizedben.

2.3.2. A zárt szemcseágyas aprítás kutatási eredményei modellvizsgálatokkal

Az elmúlt több mint négy évtized fenomenológiai vizsgálatokon alapuló kutatásai mellett a tudomány és technológia fejlődése lehetőséget biztosított a kutatótársadalom számára, hogy a szemcseágyas aprítást változatos modellezési technikákkal is vizsgálni kezdje. A számítógépes modellezésnek köszönhetően, vizuális betekintést nyerhetünk a szemcseágyban lezajló mikro és makrofolyamatokba is a törési mechanizmus során, amire

eddig néhány tudományos közleményt leszámítva nem volt példa (Oettel és Husemann, 2004), (Jiang és szerzőtársai, 2018).

Tsoungui és társai (1999) egyedi szemcsék tetszőleges erőhatásnak kitett tönkremeneteli elméletét kidolgozva, majd azt kétdimenziós számítógépes szimulációba programozva folytattak le szemcseágyaprítási modellvizsgálatokat gömbgeometriájú szemcséken. Numerikus szimuláción alapuló megközelítésben vizsgálták a szemcsék közötti kölcsönhatásokat szemcseágyaprítás során Kou és társai (2001), melyhez kétdimenziós RFPA (Rock Failure Process Analysis) típusú közettönkremeneteli analíziskódot alkalmaztak. A kutatók úgy találták, hogy a módszerük a diszkrét elemes módszertől és a kontinuum mechanikai módszertől eltérően, pontosabban használható az idealizált szemcsealakoktól eltérő esetekben a szemcseágyas aprítás modellezésére. Liu és társai (2005) szintén numerikus szimuláción alapuló modellezéseket végeztek kétdimenziós R-T (Rock and Tool) analízis kóddal. A HPGR berendezések ipari alkalmazásának folyamatos terjedésével nagy figyelem fordítódott az aktív örlőzónában jelentkező igénybevételek jobb megértésére, modellezésére. Ebben a témában publikálták kutatásaikat Djordjevic és Morrison (2006), melyben egy 80 mm átmérőjű zárt szemcseágyat vizsgáltak meg 4-4,5 mm szemcse méretű szemcsékkel feltöltve, különböző nyomásviszonyok között, két szemcseágyvastagság mellett, 3 dimenziós PFC3D (Particle Flow Code) kódot használva. A diszkrét elemes modellezésükben a korábban bemutatott fenomenológiai alapokon nyugvó szakirodalommal szemben ellentmondásos eredményeket kaptak, mert a szemcseágyban a nyomófelületektől távolodva a szemcsék törési valószínűsége nőtt, annak ellenére, hogy a vertikális nyomásértékek a szemcseágyban elhelyezkedő bármely szemcsére hasonló értékűnek adódtak, ezért nem tulajdonítottak ipari jelentőséget megalkotott modelljüknek a szerzők. Szintén diszkrét elemes módszert alkalmazva modellezték a szemcseágyas aprítást dugattyúsprésben Khanal és társai (2007) az igénybevételi sebesség, a nyomófelületek törésre gyakorolt hatása és a szemcseágy vastagság hatásait vizsgálva. BPM (Bonded Particle Model) modellezést alkalmaztak Ali és Bradshaw (2011) kétfázisú érces szemcseágy aprítási vizsgálatára, melynek során a mikrohullámmal történő besugárzás hatását vizsgálták meg a törési kinetikára. A mikrohullámok csak az ércben lévő ásványokban abszorbeálódtak, a befoglaló mátrixban nem, melynek előnyös hatása mutatkozott az ércfeltárássra. FE/DE (Finite Element/ Discrete Element) módszerek kombinált alkalmazásával folytattak le szemcseágy aprítási modellvizsgálatokat Ma és társai (2014) szabálytalan geometriájú szemcsék alkotta szemcseágyban. A módszernek köszönhetően a szabálytalan szemcsealakokkal rendelkező szemcsék is vizsgálhatóvá válnak, illetve az egyes szemcsékben létrejövő

mikrofolyamatok is modellezhetőek a szemcseágyban, úgy, hogy a szemcsék közötti kontaktfelületek rideg és plasztikus tulajdonságúak is lehetnek a törési folyamat során. Hurley és társai (2014) GEM (Granular Element Method) segítségével végeztek modellezési vizsgálatokat szemcsék szemcseágyas aprításával annak érdekében, hogy az opak szemcsékben kialakuló igénybevételi erőket tudják szimulálni. Yang és Cheng (2015) a szemcseágyban a terhelés hatására kialakuló, a szemcsék közötti erőhatások és a szemcsék kontaktpontjainak térbeli eloszlásának vizsgálatával folytattak le véges elem modellvizsgálatokat. Újszerű megközelítésben alkalmaztak Esnault és társai (2015) PBM (Population Balance Model) módszert szemcseágy aprítási törési mechanizmus modellezésére dugattyúsprésben. PRM (Particle Replacement Model) segítségével végeztek szemcseágy aprítási szimulációkat Barrios és szerzőtársai (2020) melyet EDEM szoftverbe implementáltak, ezzel jó közelítéssel tudták modellezni a dugattyúspréssel elért eredményeiket. Véges elem módszert alkalmazva mikromechanikai modellezést hajtottak végre Jiang és szerzőtársai (2021), melynek során meghatározták a szemcseágyban lévő, terhelésnek kitett szemcsék normalizált és kumulált normál irányú feszültségeloszlásait a kontaktpontokban. Az elmúlt néhány évben különösen nagy figyelem fordult a HPGR berendezések modellezésére, így a mesterséges intelligencia eszközét felhasználva, Chelgani és társai (2021) a HPGR berendezések üzemviszonyait modellezték. Az axiális nyomáseloszlást, az anyagfolyási folyamatokat és a törési kinetikát vizsgálták meg diszkrét elemes modellezéssel Cleary és Sinnott (2021) HPGR berendezésben. 18 korábbi félüzemi méretű HPGR-en végzett kutatás eredményeit és az ebből alkotott modelleket felhasználva, egyesített modellt hoztak létre Thivierge és társai (2022), mely figyelembe veszi a HPGR hengerpalástok közötti résméretet, a tömegáramot, a hajtómotorok teljesítményfelvételét, valamint a palástok különböző részein megjelenő nyomóerőből adódó inhomogenitást, mely befolyásolja a termék finomságát. DEM-MBD-PRM (Discrete Element Method - Multibody Dynamics – Particle Replacement Model) egyesített szimulációjával vizsgálták meg a kutatók a HPGR berendezés modellezésének lehetőségeit. (Rodriguez és társai, 2022 február), (Rodriguez és társai, 2022 március). A kutatók erős kapcsolatot találtak a mért- és a modellezett adatok között a HPGR berendezés teljesítményigénye és a kapacitása terén. A szerzők a szimulációk segítségével kimutatták, hogy a feladási szemcseméret inhomogenitásának következményeként jelentkező párhuzamostól eltérő hengerpalástviszonyok differenciált palásttámasztóerővel elháríthatóak, ezzel a palástokon jelentkező inhomogén nyomáseloszlás is csökkenthető. Zou és társai (2023) a HPGR berendezések hengerpalástjainak kopását vizsgálták meg diszkrét elemes modellezéssel. Módosított Torres és Casali online modell és valós idejű információk feldolgozásának

segítségével, Campos és társai (2023), modellezték az üzemi méretű HPGR berendezések teljesítményfelvételét, kapacitását és a töret minőségét vasérc koncentrátum mintanyagon.

Jól látható, hogy bár a szemcseágyas aprítás területén elvégzett modellvizsgálatok és fejlesztések jóval rövidebb ideje vannak jelen a tudomány ezen területén, mint a fenomenológiai alapú vizsgálatok, ennek ellenére igen kiterjedt szakirodalmuk jött létre. Ennek két fő oka a tudomány és technológia rohamos ütemű fejlődése a modellezésben, illetve a HPGR berendezések egyre növekvő száma az aprítás területén, aminek köszönhetően számottevő igény mutatkozik az ilyen gépekben lezajló folyamatok pontosabb megértésére, mellyel hatékonyabb aprítási folyamatok alakíthatóak ki, ezzel csökkentve a termelési költségeket az igen energiaigényes aprítás területén.

2.3.3. A zárt szemcseágyas aprítást befolyásoló tényezők és hatásai

A szemcseágy bemutatása

A szemcsék térbeli elhelyezkedése, szemcseszám és körülzárttság szempontjából négy eltérő osztályba sorolhatóak. Az első esetben egyedi szemcsék vannak igénybevételnek kitéve, ezt egyszemcsetörésnek nevezzük, melynek részletes szakirodalmi összefoglalóját a 2.3- 2.3.3 fejezetekben közöltem. A második esetben a szemcsék már nem egyesével külön-külön vannak igénybevételnek kitéve, hanem egymás mellett helyezkednek el. Fontos megemlíteni, hogy ebben az esetben még nincs egymáson nyugvó anyagréteg, tehát nincs rétegzett, térbeli átfedés a szemcsék között. A harmadik lehetőség során a szemcsék tömege úgynevezett nem ideális szemcseágyat alkot, a szemcsék vagy túl lazán, vagy túlságosan betömörödve foglalnak helyet egymáshoz képest, illetve nem megfelelő a szemcserétegek száma, a vizsgálóberendezés geometriai méretei és a feladott anyag maximális szemcseméretének egymáshoz viszonyított értéke. Az utolsó, negyedik eset a tökéletes és ideális szemcseágy esete valamilyen geometriai alakzatba zártan, melyet általában a berendezés biztosít (Reichardt és Schönert, 2003).

Az egy szemcsét érő egytengelyű kompressziós igénybevétel hatására létrejövő szemcsetörés során nincs semmilyen kölcsönhatás más anyagszemcsékkel, csak és kizárólag az igénybevételt biztosító szilárd felületekkel. Abban az esetben, ha szemcsék már egy rétegben helyezkednek el, fontos a szemcsék átmérőjének uniformitása. A szemcseréteg meghatározására és besorolására, Schönert (1996) bevezette a következő szemcseméreten és a szemcsét terhelő felületen alapuló egyenletét.

$$\delta = \frac{\pi \cdot x^2}{6 \cdot A} \quad (2.3.3.1.)$$

Az (2.3.3.1) egyenletben x a szemcseméretet, az A pedig szemcsére ható munkafelületet jelenti. δ értéke függ a szemcsealaktól, melyre kísérletekkel Schönert (1996) $\delta=0,3-0,5$ értékeket kapott. A szemcseágy kifejezés minden olyan esetben használatos, ahol a szemcsék térbeli elrendeződésének következtében szemcse-szemcse kölcsönhatás kialakulhat. Egy másik elnevezése ennek az esetnek, az úgynevezett többrétegből felépült szemcseágy. A rétegek száma meghatározható az egy réteget alkotó szemcsék tömegéből és a teljes szemcseágy tömegéből. Fontos megemlíteni, hogy ebben az esetben is beszélhetünk mono és multidiszperz szemcseágyakról. A szemcseágy további három alcsoportra bontható a szemcseméret függvényében. Beszélhetünk monodiszperz szemcseágyról (több rétegben is), polidiszperz szemcseágyról és olyan különleges polidiszperz szemcseágyról, ahol a halmazt alkotó szemcsék jellemző mérete jelentősen kisebb, mint a szemcseágy vastagsága. A szemcsék igénybevételét biztosító felület alak szerint lehet sík, hengeres vagy gömb alakú, illetve ezek kombinációja, mely reprezentálni tudja az igénybevétel típusát. A törési mechanizmusok vizsgálatához előnyös az egymással párhuzamos, síkfelületek választása. Érdekes szót ejteni még a felületek felszínéről is, melyek simák, érdesek és hullámosak is lehetnek. Ennek leginkább akkor van jelentősége, ha gömbfelületek közé zárt szemcseágy vizsgálata történik, mivel az anyag súrlódási együtthatója és a szemcsék mozgása ezáltal befolyással bír a törési mechanizmusra. A szemcseágy ugyanakkor vizsgálható nem zárt állapotban, mely eset nem lesz külön részletezve és bemutatva, nem képezi a kutatómunkám tárgyát. A zárt szemcseágy esetében a berendezés geometriai kialakítása nem engedi meg a szemcsék oldalirányú elmozdulását számottevő mértékben. Végül pedig az ideális szemcseágy és annak kritériumrendszere kerül bemutatásra. Fontos, hogy a szemcseágy sztochasztikusan homogén szerkezetű legyen (1), illetve, bármilyen kompakció fennállása esetén az szintén homogén eloszlású legyen (2). Ismertnek kell lennie a szemcseágyat alkotó szemcsék tömegének és térfogatának is (3). Valamint az elhanyagolható falhatás érvényesülésének elérése is szükséges feltétel (4). A (2-3) kritérium teljesüléséhez, két egymással párhuzamos munkafelület szükséges. Reichardt és Schönert (2003) kísérleti eredményei azt mutatták henger geometriájú szemcseágy esetén, hogy a (4) feltétel teljesüléséhez a maximális szemcseméret hatszorosánál nagyobb kell legyen a teljes szemcseágy vastagsága, és a szemcseágy átmérője minimum háromszorosa kell legyen a szemcseágy vastagságának. Ellenkező esetben, az egyszemcse és a szemcseágyas aprítás átmeneti, tranziens törési mechanizmusa valósul meg.

A szemcseágyvastagság hatása

Mielőtt a szemcseágyvastagság törésre gyakorolt hatásait bemutatnám, fontos szót ejteni a Schönert (1996) által definiált tökéletes szemcseágyról és ennek szerepéről a szemcseágyas aprítási kísérletekben. A dugattyúsprésben kivitelezett szemcseágyas aprítási kísérleteik során a 2.3.1. Fenomenológiai vizsgálatokkal elért eredmények című fejezetben bemutatott tudományos közlemények mindegyikében figyelembe vették ezt a feltételt, ezért most kettő olyan közleményt fogok ismertetni, akik ennek szándékosan nem tettek eleget és vizsgálták is ennek következményeit, mielőtt rátérnék a szemcseágyvastagság hatásának bemutatására. Kalala és társai (2011) 20 mm-es maximális szemcseméretű platina tartalmú ércet vizsgáltak meg 100 mm-es átmérőjű dugattyúsprésben 31 és 125 MPa szemcseágynyomás mellett. A 20 mm-es maximális szemcsemérethez Schönert (1996) szerint, minimum a maximális szemcseméret hatszorosát meghaladó szemcseágyvastagság szükséges az ideális szemcseágy létrehozásához, mely ebben az esetben 120 mm szemcseágyvastagságot jelentene. Kalala és társai (2011) azonban a 30-60 és a 120 mm-es szemcseágyvastagságot is megvizsgálták dugattyúsprés berendezésükben 31 és 125 MPa szemcseágy nyomások alkalmazása mellett. Mérési eredményeik az mutatták meg, hogy adott szemcseágynyomást alkalmazva, a vékonyabb szemcseágy vezetett jobb aprítási fokhoz, illetve a fajlagos aprítási munkaigény is alacsonyabbnak bizonyult a vékonyabb szemcseágyak esetén. Eredményeik fényében vitatni kezdték, a Schönert (1996) által javasolt maximális szemcsemérethez kötött követelmények szükségességének meglétét szemcseágyas aprítási vizsgálatokhoz, dugattyúsprés berendezésekben. A következő kísérletükben, 12 mm-es maximális szemcseméretű vasérc mintákat, 50-75 és 100 mm-es átmérőjű dugattyúkkal terheltek meg, melyhez a korábbi eredményeikből kiindulva a maximális szemcsemérethez képest csak másfélszeres, tehát 18 mm-es szemcseágyvastagságot alkalmaztak. Ezen mérési paraméterek mellett csak a 75 és a 100 mm-es átmérő tesz eleget a Schönert (1996) által javasolt minimum háromszoros szemcseágyvastagságot meghaladó dugattyúátmérőnek és az ebből következő szemcseágytömegnek. Kalala és társai (2011) úgy találták, hogy mindhárom dugattyúátmérő adott nyomásértékek alkalmazása esetén hasonló töretet eredményezett és a fajlagos aprítási munkaigények is teljesen hasonlóan adódtak, tehát bár fontos támpont a Schönert (1996) által javasolt maximális szemcsemérethez kötött kritériumrendszer, de az ettől való eltérés nem okoz számottevő problémát a mérések során. Bulled és Husein (2008) méréseik során 70 és 100 mm-es átmérőjű dugattyúsprésben terheltek meg 19 mm-es maximális szemcseméretű ércszemcséket 70-

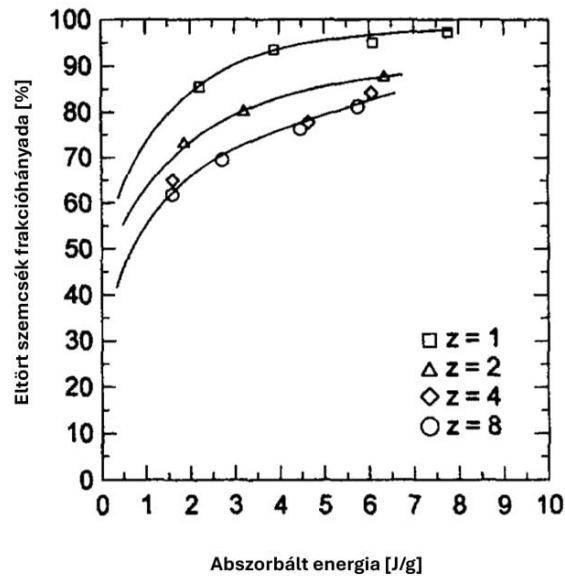
150 mm-es szemcseágyvastagságot alkalmazva. A kutatók úgy találták, hogy a HPI (Nagynyomású Örölhetőségi index) értékeket nem befolyásolta számottevően az ideális szemcseágytól jóval vékonyabb szemcseágyvastagság alkalmazása a kísérletek során, mert az ideális szemcseágyvastagság esetén, azonos szemcseágynyomások mellett, $HPI=14,2$ a nem ideális szemcseágyak esetén $HPI=14,3$ és $13,9$ értékek adódnak. A HPI számítása teljesen analóg a Bond-munkaindex számításával, a mérése során viszont 1600 gramm 3,36 mm-től durvább frakciót szükséges letörni majd a töretből kiszitálni a 3,36 mm-től finomabb frakciót. A következő mérés feladását a megmaradt 3,36 mm-től nagyobb szemcseméretű frakció és az eredeti feladás, kevert, 1600 grammos mintája adja. Ezt a procedúrát addig kell ismételni, míg a keletkezett 3,36 mm alatti frakcióhányad tömege állandóvá válik, így pedig mind a feladás, mind a termék 80 %-os szemcsemérete is ismert lesz a számításhoz. A vizsgált mintaanyag nagynyomású örölhetőségét jellemző HPI mérőszám minimális eltérése, az ideális és nem ideális szemcseágyak vizsgálata, megerősíti Kalala és társai (2011) korábbi kutatási eredményeit miszerint a Schönert (1996) által javasolt kritériumoktól való eltekintés nem okoz számottevő eltéréseket a szemcseágyas aprítás dugattyúprésses kivitelezésében.

Miután bemutatásra kerültek a különböző kutatók által megvizsgált, az adott maximális szemcsemérethez tartozó ideális szemcseágyvastagságtól alacsonyabb szemcseágyvastagságú kísérleti eredmények, azon kutatók kísérleti eredményeit mutatom be, akik figyelembe vették Schönert (1996) erre irányuló ajánlásait. A Schönert (1996) által megfogalmazott energiaabszorpció jelenségéről is fontos szót ejteni ebben a fejezetben, mivel közvetlen összefüggésben áll az alkalmazott szemcseágyvastagsággal, mely a szerző által legfontosabbnak ítélt mérőszám a szemcseágyas aprítás hatékonyságának jellemzésére, amit a kompakciódiagramm görbe alatti területeként definiált és az alábbi egyenlettel számított.

$$E_m = \frac{A}{M} \int_0^{S_{max}} P dS \quad 2.3.3.2.$$

Ahol: E_m : a szemcseágy által abszorbeált energia, A: nyomófelületi keresztmetszet, M: igénybevett anyagtömeg, P: nyomás, S: nyomófelület elmozdulás.

Az 1-2-4 és 8 rétegben, dugattyúsprésben elhelyezett és leaprított 3,2-4 mm-es kvarcfrakció energiaabszorpció diagrammja a törést szenvedett szemcsék frakcióhányadának függvényében a 7. ábrán látható.

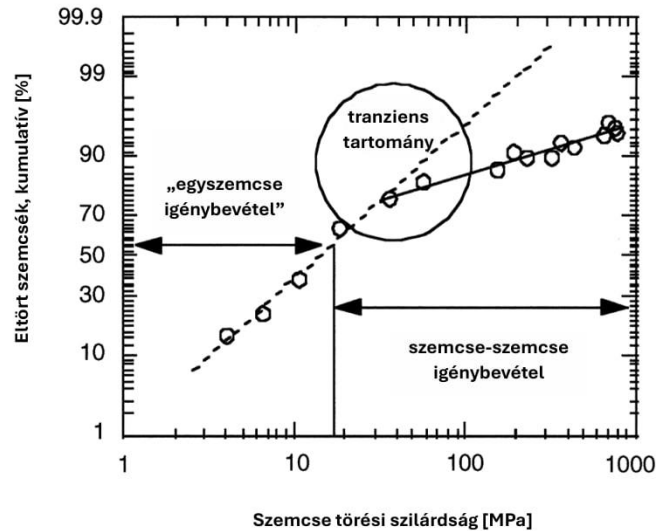


7. ábra. 3,2-4 mm-es kvarcsemmek eltört frakciójának az energiaabszorpció függvényében

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

A 7. ábrán jól látható, hogy a 4 és 8 szemcsevastagságú szemcseágy esetén a megvizsgált 0-8 J/g energiaabszorpció tartományban nincs számottevő különbség az igénybe vett szemcsék eltört frakciójában. Abban az esetben viszont, ha a szemcseágyvastagság 2 majd 1 szemcsére csökken, a vizsgált energiaabszorpció intervallum teljes egészén növekszik az eltört szemcsék frakciójának hányada, energetikailag jóval előnyösebb törési mechanizmust eredményezve, mely az egyszemcsét ért igénybevétel esetén a leghatékonyabb. Ennek az okai a következők: (1) a szemcseágyvastagság növelése a szemcse szám és ezáltal a kontaktpontok számának növekedésével emelkedett súrlódási veszteséget eredményez, (2) az elasztikus és plasztikus deformációk száma a megnövekedett kontaktpontok miatt szintén magasabb összenergia-igényű folyamatot eredményez, (3) a szemcsékben létrejött mikrorepedések létrejövetele is további energiát igényel. Schönert (1996) továbbá azt is kimutatta, hogy bár a dugattyúsprés falazata és a szemcsék között fellépő súrlódás jelentősen befolyásolja a nyomáeloszlást a szemcseágyban, ennek ellenére a nyomáeloszlás aprításra gyakorolt hatása nem jelentős. Ugyancsak kvarcsemmek dugattyúspréses vizsgálata során Gutsche és Fuerstenau (1999) is megállapította, hogy az egyszemcsétörés jóval energiahatékonyabb módszer az aprítás kivitelezésére. Vizsgálataik során 2,38-1,68 mm-es frakciójú kvarcsemmeken folytattak le anyag és szemcse törési kísérleteket,

melynek eredményeit a 8. ábra szemlélteti. Érdekes megfigyelni a szerzők által megjelölt tranziens zónát, mely mindkét mérési sor illesztett függvénygörbéjén helyet foglal.



8. ábra. Kvarcsemmek törési szilárdságeloszlása egyszemcse és szemcseágyas törési folyamatok során

Forrás: O. Gutsche. és D.W. Fuerstenau (1999): Fracture kinetics of particle bed comminution — ramifications for fines production and mill optimization, Powder Technology 105, 114.

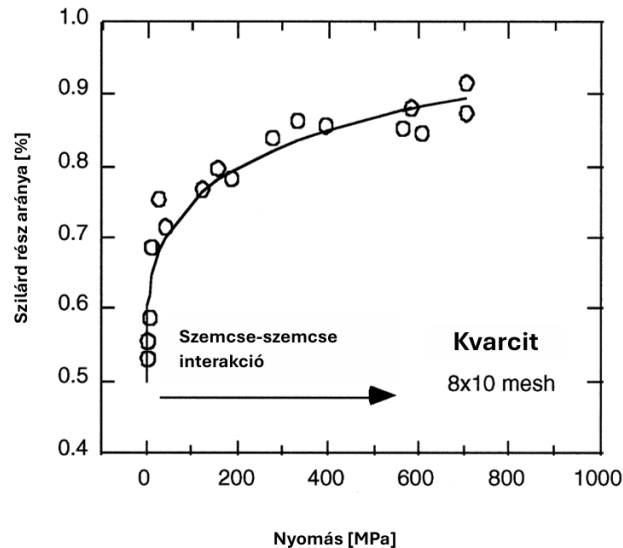
Djordjevic és Morrison (2006) diszkrét elemes módszerrel szimulálva, 1225 és 2450 szemcseszámmal rendelkező, 4-4,5 mm szemcseméretű szemcsék alkotta szemcseágyas törési modellvizsgálataik során megállapította, hogy az alkalmazott dugattyúnyomás mindössze négyszeres értéke jelentkezik a szemcsék kontaktpontjai között a vastagabb szemcseágy esetén, míg az 1225 szemcsét tartalmazó szemcseágyban ez az érték 24-szeres. 500, 1000 és 2000 kN erővel megterhelve végzett szemcseágy aprítási kísérleteik során 10,7 és 6 mm vastag szemcseágyakat vizsgált meg Pourghahramani és Forssberg (2007), melynek során a szerzők megállapították, hogy a vastagabb szemcseágy alacsonyabb energiaabszorpciót, ezáltal kevésbé hatékony aprítási folyamatot fog eredményezni. Ennek következtében a töréssel létrejött fajlagos felületnövekedés is alacsonyabb, valamint a hematit szemcsék amorfizációja is kevésbé hatékonyan valósul meg. Látható, hogy számos kutató az elvégzett munkája során alapvetően egyező eredményekre jutott a szemcseágyvastagság hatását illetően, melyből az egyik legfontosabb levonható következtetés az, hogy az aprítás energetikai hatékonysága és a szemcseágyvastagság fordítottan arányosak egymással. A kutatási területem szempontjából rendkívül fontos átgondolni továbbá a szemcseágyvastagsággal

kapcsolatban álló következő összefüggéseket: Schönert (1996) szerint a szemcseágyvastagság növelésével a megemelkedett szemcse kontaktpontok és az ott kialakuló igénybevételipontok sűrűdéses törési energiavesztést hoznak létre. Azonban ezen kontaktpontok növekedése kedvező hatással bír a kubikus szemcsealakú és alacsony szemcseszélesség-szemcsehosszság arányú töret kialakulására. Briggs és Evertsson (1998) szerint ezért célszerű a kúpostörő berendezésekben tömött adagolást alkalmazni, hogy a törés során szemcseágy jöjjön létre, mely kedvez a blokkos, kubikus szemcsealak létrejöttének a töretben. A fejezet végén szeretnék bemutatni egy kutatási eredményt, mely a szemcseágyvastagság hatását vizsgálva dugattyús présben kivitelezett szemcseágyas törési módszerrel segített megalkotni egy, a HPGR berendezések üzemi résméretét és kapacitását leírni képes modellt. Pamparana és Klein (2021) a HPGR berendezések üzemi résméretének meghatározását kutatták dugattyúsprésses kísérleteikből kifejlesztett modelljük segítségével, melynek során 0,4%-os hibával tudták meghatározni a berendezés adott üzemviszonyai között kialakuló résméretet. Mivel a résméret és a kerületi sebesség, adott geometriával rendelkező HPGR-ek esetén meghatározza a kapacitást is, ezért ennek számítása is lehetségessé vált. Így a különböző szemcseágyvastagsággal, vas és rézércen elvégzett dugattyúsprésses mérési eredményeik vezettek ezen modell létrejöttéhez.

A szemcseágynyomás hatása

Az igénybevételnek kitett szemcseágyvastagság mellett, a következő fontos alapparaméter a szemcseágynyomás, mely a szemcseágyban elhelyezkedő szemcséket megterheli. A szemcseágynyomás mértéke közvetlen hatással van a szemcsékben kialakuló nyomás eloszlására, ezáltal pedig arra, hogy milyen törési mechanizmust fognak elszenvedni, ahogy ezt a 2.2.2. fejezetben korábban bemutatam. Dugattyúsprésses kísérleteik során Kanda és társai (1990) megállapították, hogy a szűken osztályozott, 1,19 - 1,41 mm-es szemcseméretű kvarcsemmek szemcseágyas aprítása során, a magasabb alkalmazott szemcseágynyomás nagyobb törési valószínűséget fog eredményezni, illetve csökkenti a keletkezett termék medián szemcseméretét is. Gutsche és Fuerstenau (1999) méréseik során arra lettek figyelmesek, hogy a szemcseágynyomás növelésével a szemcseágyban lévő 1,68 – 2,38 mm-es szemcseméretű kvarcit szemcsék először tömörödnek, 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 a szemcseágyban lévő hézagokat, így a szemcseágy tömörödik, melyet a 9.ábra szemléltet. Érdekes megfigyelni a görbe karakterisztikájának változását az 50-100 MPa nyomástartománytól, ahol a szemcseágy

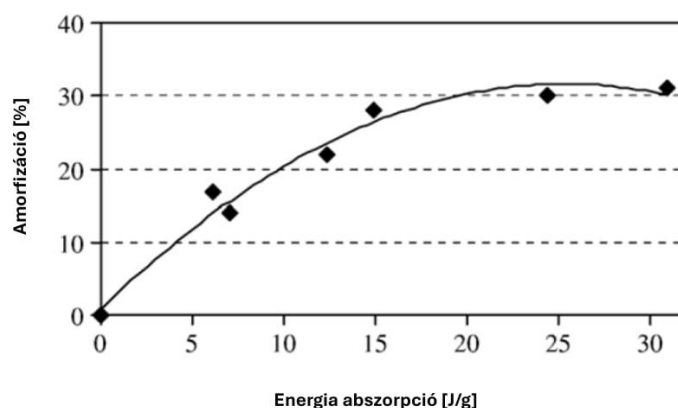
tömörödésének tendenciája jóval alacsonyabb mértékűvé válik, megkezdődik az effektív aprítás és szemcseméretcsökkenés folyamata, melyhez már kisebb ütemű szemcseágytömörödés társul.



9. ábra. A szemcseágy tömörödés változása az alkalmazott nyomás függvényében

Forrás: O. Gutsche. és D.W. Fuerstenau (1999): Fracture kinetics of particle bed comminution — ramifications for fines production and mill optimization, Powder Technology 105, 115.

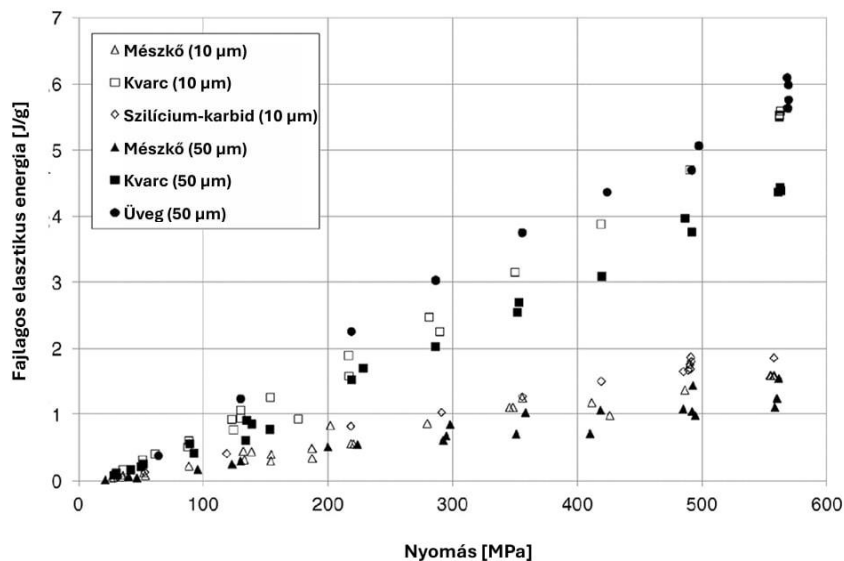
Pourghahramani és Forssberg (2007) kutatási eredményei megmutatták, hogy a szemcseágynyomás növelésével emelkedik a szemcseágyban abszorbeált energia is, mely magasabb amorfizációhoz vezet a hematit szemcsék esetén, amit a 10.ábra szemléltet.



10. ábra. Hematit amorfizáció az energiaabszorpció függvényében

Forrás: 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.

Mütze (2016) szemcseágy aprítási közleménye finomszemcsés 10 és 50 μm -es szemcseméretű mészkő, kvarc és szilícium-karbid mintákon megmutatta, hogy a növekvő szemcseágy nyomással együtt növekszik a szemcsékben tárolódó elasztikus energia is, amit a 11. ábra szemléltet. Látható, hogy 35 MPa nyomás alkalmazása felett minden vizsgált mintában elasztikus energia kezd felhalmozódni, mely olyan törési energiavesztéshez vezet, ami csökkenti az aprítási folyamat energiahatékonyságát.



11.ábra: A fajlagos elasztikus energia változása az alkalmazott nyomás függvényében mészkő, kvarc, szilícium-karbid és üveg minták esetén

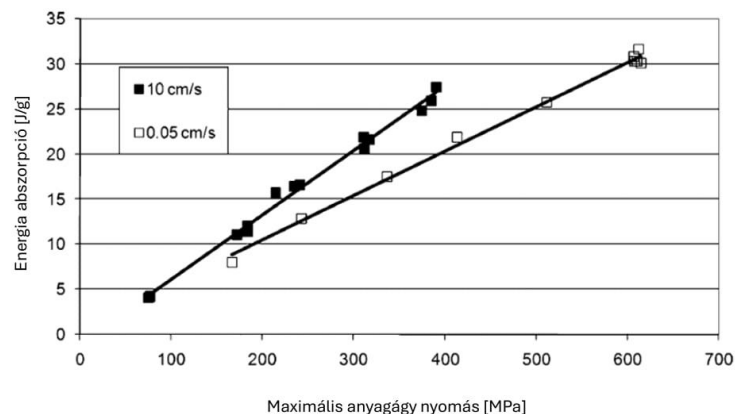
Forrás: Mütze.T. (2016): Modelling the stress behaviour in particle bed comminution, Volume 156, 10 november 2016, Pages 14-23.

Összegezve tehát a fejezetben tárgyaltakat, ahogy Schönert (1982) szabadalmában említi, a minimum 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 is.

A szemcseágynyomás sebességének a hatása

Az egyszemcsetörési kísérletek és az erről szóló szakirodalom széles körben tárgyalja az igénybevételt biztosító nyomás sebességének a hatását a szemcsetörésre. Ezzel szemben a szemcseágyas aprítás területén jóval kevesebb ilyen irányú tudományos publikáció érhető el. Kerber (1984) kutatási eredményei megmutatták, hogy az alacsonyabb nyomási sebesség alkalmazása a szemcseágy tömörítésére elegendő időt biztosít a kisebb

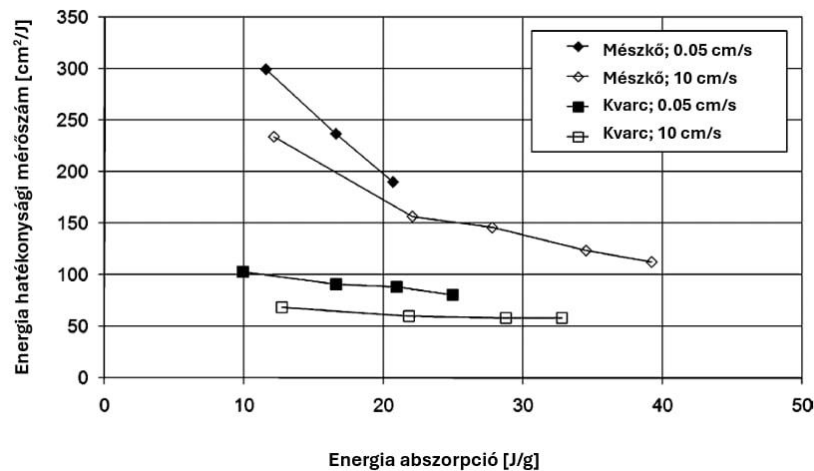
szemcsék és a törés folyamán létrejött fragmentumok számára, hogy a lehető legjobban kitöltsék a rendelkezésre álló teret, kompaktabb szemcseágyat eredményezve. A kutató szintén megállapította, hogy a nagyobb nyomósebesség emelkedett súrlódási veszteséget eredményez a szemcsék kontaktpontjaiban. Müller (1989) azonban csak az alacsonyabb keménységű mészkő esetén jutott hasonló eredményre, a keményebb kvarcsemmek esetén a megnövelt nyomósebesség nem vezetett kevésbé hatékony aprításhoz. A kutató ezt a jelenséget a nem megfelelően magas értékűnek választott, 60 cm/s nyomósebességgel magyarázta, mely nem tudta kellőképpen befolyásolni a fragmentumok térbeli elrendeződését és eloszlását, ezzel pedig megnövelni a súrlódási veszteségeket, ami csökkent aprítási hatékonysághoz vezetne. Szűken osztályozott, 10-15 μm -es szemcsefrakciójú mészkőmintákon végzett dugattyúspréses, szemcseágyaprítási kísérleteket Mütze és Husemann (2008). A 0,05 cm/s és a 10 cm/s nyomósebességek jelentősen eltérő energiaabszorpciós értékeket mutattak a különböző nyomásértékek mellett, amit a 12. 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.



12. ábra. Energiaabszorpció a szemcseágynyomás függvényében különböző nyomósebességek esetén

Forrás: Mütze. T. és Husemann. K. (2008): Compressive stress: Effect of stress velocity on confined particle bed comminution, Chemical Engineering Research and Design 86 (2008) 380

A törés energiahatékonysága a nyomási sebesség növekedésével csökkenő tendenciát mutat. A folyamatot jól szemlélteti a 13. ábra.



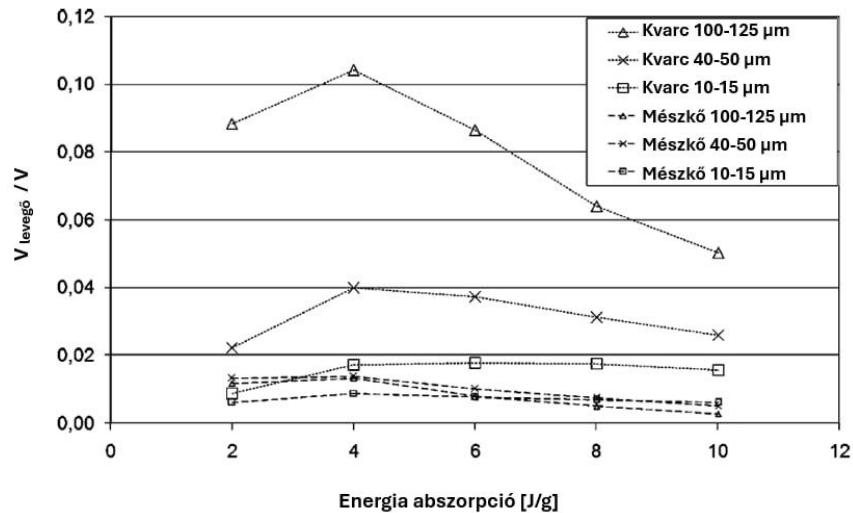
13. ábra. A törés energiahatékonysága az energiaabszorpció függvényében mészkő és kvarc esetén

Forrás: Mütze. T. és Husemann. K. (2008): Compressive stress: Effect of stress velocity on confined particle bed comminution, Chemical Engineering Research and Design 86 (2008) 381

A 13. ábrán látható, hogy a kevésbé kemény mészkő és a jóval keményebb 10-15 μm -es kvarc szemcsefrakciók is hatékonyabban apríthatók le alacsonyabb nyomósebességek alkalmazásával, mert az egy egységnyi abszorbeált energiára jutó felületnövekedés nagyobb.

Érdemes még szót ejteni a szemcseágy összenyomás során jelentkező anyagkompakcióról, melynek során a szemcsék közötti hézagokat kitöltő gáznemű anyag mely jellemzően levegő, elhagyja a szemcseágyat, melynek matematikai összefüggéseit Tarján Iván professzor és szerzőtársai (1999) közzölték. A szemcseágynyomás sebességének függvényében két alapvető eshetőség lehetséges. Az első esetben a szemcsék közötti hézagokból a gázhalmazállapotú anyag a tömörödés közben teljes mértékben el tud távozni. A második esetben a nyomósebesség olyan nagy, hogy a szemcsék közötti hézagokban csapdába esik a gázhalmazállapotú anyag, mely szintén kompressziós energiát vesz fel, hátráltatja az aprítást. Természetesen a két eset átmenete is megvalósulhat, a két határeset bemutatása a szemléltetést szolgálja. A 14. ábrán látható, hogy a különböző szemcseméretű mészkő és kvarcszemcse frakciók, eltérő energiaabszorpciós szintek mellett, milyen gázáramlási sebesség - nyomósebesség hányadossal jellemezhetők. Minél nagyobb a gázáramlási sebesség – nyomósebesség hányadosának értéke, annál kisebb a valószínűsége, hogy a szemcseágyban

gázhalmazállapotú anyag esik csapdába, ezzel csökkentve az aprítás energiahatékonyságát.



14.ábra. A levegőáramlás-nyomássebesség hányadosa az energiaabszorpció függvényében különböző szemcseméretű mészkő és kvarc esetén

Forrás: Mütze. T. és Husemann. K. (2008): Compressive stress: Effect of stress velocity on confined particle bed comminution, Chemical Engineering Research and Design 86 (2008) 382

Látható tehát, hogy az energetikailag hatékony szemcseágy aprítási szemcseméretcsökkentés esetén kiemelten fontos az igénybevétel sebességét is az optimális szinten tartani, hiába vezet a nagyobb igénybevételi sebesség magasabb energiaabszorpcióhoz (12.ábra). Ezzel csökkenthető a szemcse kontaktpontok között kialakuló súrlódási veszteség, illetve szemcsék között csapdába eső gázhalmazállapotú anyagon sem kell kompressziós munkát végezni.

2.4. Megállapítások, következtetések és a tudományos hiányterület megfogalmazása a szakirodalmi kutatás alapján

Az elvégzett szakirodalmi kutatómunka alapján az alábbi megállapításokra jutottam:

- A mechanikai eljárás technika egyik alaplétele az aprítás, mely rendkívül energiaigényes ám nem energiahatékony folyamat. A kompressziós igénybevételen alapuló törési mechanizmust számos aprító – őrlőberendezés hasznosítja, melyek közül az energetikailag leghatékonyabb az egyszemcsetörés, amit a zárt szemcseágyas törés végül a nem zárt szemcseágyas törés követ. Az ezen törési módokat alkalmazó berendezések optimális üzemeltetése kulcsfontosságú feladat, ezért rendkívül kiterjedt szakirodalom áll rendelkezésre ezen a tudományterületen.

- A zárt szemcseágyas aprítás eszköze a gyűrűsmalmok mellett az úgynevezett nagynyomású őrlőhengerpár (HPGR - High pressure grinding rolls), mely nagy kapacitása és a nem zárt szemcseágyas aprítástól jóval alacsonyabb fajlagos őrlési munkaszükséglete következtében napjainkban is folyamatos térhódítást nyert a bányaiipar és az ásványfeldolgozóipar területén. Ennek következtében bár a zárt szemcseágyas törés alapjelenségeit vizsgáló kutatások és publikációk már háttérbe szorultak, a HPGR modellezés vizsgálatához továbbra is szorosan kapcsolódnak a dugattyús présben elvégzett szemcseágy aprítási mérések.
- A zárt szemcseágyas aprítást HPGR és dugattyúsprés berendezésekben vizsgálva a szakirodalom a HPGR három fő üzemparaméterének vizsgálatára koncentrál. Ezek a hengerek kerületi sebessége, az üzemi résméret és fajlagos hengerpalást nyomás. Fontos látni, hogy ezen üzemparaméterek a dugattyúsprés esetén analóg módon vizsgálhatók a nyomósebesség, szemcseágy vastagság és a dugattyúnyomás hatásainak tanulmányozásával. A szakirodalom ezen túlmenően tárgyalja a különböző szemcsés anyagok kompaktációs hajlamát, az energiaabszorpció jelenségét, a töretben kialakuló mikrorepedéseket, a feladás szemcseméretét és szemcsealakját, a feladás nedvességtartalmát, a berendezések kopási mechanizmusait, a különböző őrlésségítő anyagokat és módszereket, illetve a felsoroltak összetett hatásait az aprításra.

Következtetések és a hiányterületek megfogalmazása a szakirodalmi kutatás alapján

- Elenyésző számú tudományos közlemény foglalkozik az olyan rendkívül nagy mechanikai szilárdsággal rendelkező és különösen abrazív anyagok lassú kompressziós szemcseágyas aprításával, mint a szilícium-karbid vagy a korund. Cooper és Eaton (1962) az olvasztott fehér korund alapanyagának, a nagy tisztaságú timföldnek a dugattyúspréses kompaktálási és aprítási lehetőségeit vizsgálta. Reichardt és Schönert (2003) az egyszeri és a többszörösen megterhelt szemcseágyban leaprített cirkon-szilikát, szilícium-karbid és korund szemcsék dugattyús préses aprítását vizsgálta meg. Karimi és Djokoto (2012) HPGR berendezéssel mérte meg a szilícium-karbid szemcsék apríthatóságának lehetőségeit. Pedrosa és társai (2019) tabulár timföld és olvasztott korund aprítótechnológia egyszerűsítése érdekében végzett el HPGR méréseket, melynek eredményeképpen a szerzők szerint 13 hengerestörő váltható ki a rendszerből egy HPGR üzembehelyezésével. A szerzők továbbá megjegyzik, hogy nincs tudomásuk arról, hogy bárhol a világon HPGR törőberendezést alkalmaznának korundtörésre 2019-ben. 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

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 szemcsemeret-eloszlás és fajlagos felület vizsgálatával tárgyalja. A feladott anyag szemcsealakjának az őrlésre gyakorolt hatását számos esetben vizsgálták, azonban az előállított őrlemény szemcsék alakját elenyésző számú publikáció vizsgálja, miközben a vizsgálati anyagok egyik esetben sem tűzállóanyagipari alapanyag volt.

- 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.

- Bár a szakirodalomi összefoglalóból egyértelműen kiderül, hogy az energetikailag leghatékonyabb kompressziós igénybevételen alapuló törési mód az egyszemcse törés, melyet a zárt szemcseágyas törés követ, mégis csak kettő tudományos publikáció vizsgálta meg az adott berendezésgeometriához tartozó ideális szemcseágytól alacsonyabb szemcseszámot tartalmazó törési folyamat hatását a keletkezett termékek minőségére (Bulled és Husein, 2008, Kalala és társai, 2011). Ebből következik, hogy 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.

3. A kutatómunka célkitűzései, vizsgálati és értékelési módszerek

3.1. A kutatómunka célkitűzései

A kutatómunkám első részében arra törekedtem, hogy az elmúlt néhány évtized során megszületett innovatív aprítási módszerekkel, különös tekintettel a kompressziós igénybevételen alapuló, egyszemcse és szemcseágyas töréssel kapcsolatos tudományos közleményeket megismerjem. A 2. fejezet és alfejezeteiben a lehető legnagyobb körültekintéssel igyekeztem bemutatni azokat a közleményeket, melyek tartalmazzák a jelenleg elérhető kollektív tudást ezen a tudományterületen. A megszerzett szakirodalmi tudást felhasználva kialakítottam azt a szisztematikusan felépített laboratóriumi, félüzemi és üzemi méretű gépeken elvégzett kísérleti és kiértékelési rendszert, melyek segítségével a következő célkitűzéseket megvalósítottam.

Az 1. fejezetben említés szintjén már szó esett a tudományos munkám egyik alapanyagáról az olvasztott fehér korundról (továbbiakban korund) és az alkalmazásterületeiről. A munkám relevanciáját az adja, és alapjául az a hosszú ideje fennálló tény szolgál, hogy a csiszolópapírgyártás és legfőképpen a lamináltipar folyamatos hiánypiaccaal szembesül a számukra alapanyagként szolgáló, meghatározott tulajdonságfüggvényekkel rendelkező 0-1 mm-es korundfrakciók esetén. Mivel az európai gyártók ezen termékek esetén nem tudnak érdemben versenyezni az olyan gyártókkal, ahol a korundelőállítás rendkívül magas energiaköltsége jóval kedvezőbb, mint az EU-ban és hazánkban, mind tudományos, mind ipari szempontból is különösen fontos lenne a számukra megfelelő korundtermékek energiahatékony előállítása, ezzel csökkentve azok előállítási költségeit, mely versenykéesebb termékeket eredményezne.

A magas alumínium-oxid tartalmú olvasztott alapanyagokból előállított termékek szűken frakcionált ömlesztett anyagok, melyeknek minőségét a kémiai és ásványtani tulajdonságokon túl a termékek halmazsűrűsége határozza meg. A szűk méretfrakciók miatt a halmazsűrűséget a diszperzitás tulajdonságok közül főként a szemcsealak és felületi érdesség befolyásolja, melyet az aprítási folyamattal szabályozhatunk.

Mindezek alapján a tudományos célkitűzéseim, melyekkel az ipari célokat is szeretném megvalósítani az alábbiak:

1. A különböző szemcseméretű magas alumínium-oxid tartalmú olvasztott termékek, szemcsealak és szemcsefrakció-halmazsűrűségének tudatos eljárástechnikai szabályozása és annak tudományos megalapozása, különös tekintettel a 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.
3. A fentiekhez szükséges, az alkalmazásterületek által elvárt diszperzitási 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. Ennek érdekében a több évtizednyi, ezen az aprítási területen létrejött szakirodalmat és a saját alapkutatási eredményeimet felhasználva igyekeztem elérni a célokat. A berendezésfejlesztés eredményeképpen egy olyan nagynyomású őrlőhengerpár

megalkotása volt a célom, mellyel effektíven aprítható a korund, viszont egy olyan átmeneti szemcsetörési módszerrel, mely egyszerre biztosítja az egyszemcsetörésből, vagy alacsony szemcserétegszámból eredő hatékony szemcseméret csökkentést, de még rendelkezik a szemcseágyas lassú kompressziós törési módhoz köthető kedvező szemcsediszperzitási tulajdonságokkal.

A doktori kutatómunkám célja tehát a fentiekkel összhangban a magas alumínium-oxid tartalmú olvasztott termékek esetén az aprítási igénybevételi környezet szemcsealakra és halmazsűrűsége gyakorolt hatásának vizsgálata, és a folyamatos üzemű zárt szemcseágyas aprítási mód tudományos megalapozása ezekre a kivételesen szűk szemcsEFRakciót képviselő termékekre. Ehhez az alapvizsgálatokon túlmenően egy berendezésfejlesztés is történt, amivel ezek a termékek gyárthatóvá válnak, melyről jelenleg sincs elérhető tudományos feljegyzés, hogy bárki alkalmazná ezt az aprítási technológiát a világon erre a célra.

A korábbi szakirodalmi megállapításokból levont következtetésem és a tudományos célkitűzéseimmel összhangban az alábbi munkahipotéziseket állítottam fel:

1. A kompressziós zárt szemcseágyas törés, a folyamatban jelentkező szemcsemozgás, a szemcsék közötti súrlódás és a nagy kontaktszámmal végbemenő nyomás igénybevétele együttesen szemcse-alakformálásra hasznosítható. Az alakváltozás hasznos szemcse-halmazsűrűség növekedésre vezet.
2. A statikus zárt szemcseágyas modellvizsgálati eredményeket felhasználva, kialakítható egy olyan folyamatos üzemű berendezés, melyben a rideg, nagyszilárdságú és rendkívül koptató korundszemcsék aprítás közbeni tudatos alakformálás is elvégezhető egyidejűleg.
3. Az ütés-ütközés igénybevételével megvalósítható a mullit-szemcsék aprítás közbeni egyidejű alakformálása röpítőtörő berendezésben.

3.2. Kísérleti berendezések

A kutatómunkám elvégzéséhez az alábbiakban felsorolt berendezéseket használtam, melyeket a mellékletben részletesen bemutatok:

- Saját fejlesztésű korundaprításra optimalizált nagynyomású őrlőhengerpár (Dinamikus zárt szemcseágyas aprítási kísérletek)
- Vertikálistengelyű röpítőtörő (Barmac 2400 DUOpactor) (Ütés-ütközéses aprítási kísérletek)
- Horizontális tengelyű röpítőtörő (AJG RTE - 40/25) (Ütés-ütközéses aprítási kísérletek)
- Üzemi hengerestörő és pofástörők (Minta előkészítés)
- Laboratóriumi dugattyúsprés (Statikus zárt szemcseágyas aprítási kísérletek)
- Zeiss M2M optikai mikroszkóp
- Retsch AS 200 TAP laboratóriumi szitaberendezés
- RETSCH CAMSIZER X2 dinamikus képelemző
- MSZ 6506-84 szerinti halmazsűrűségmérő berendezés

3.3. A mérésekhez használt anyagok

A kutatómunkám során két féle anyaggal, az olvasztott fehér korunddal és az olvasztott fehér mullittal dolgoztam, melyet a Refra-System Kft. szalonnai telephelyén elektromos ívkemencében állítottunk elő.

Olvasztott fehér korund

A magas minőségű, 98 tömegszázalék feletti Al_2O_3 tartalmú timföldből olvasztott alumínium-oxid termékek, a szilícium és bórkarbidok mellett az olvasztott fehér korund az az anyag, mely meghatározó szerepet tölt be az abrazív és tűzállóanyag termékek családjában. A nagy kémiai tisztasága és előnyös mechanikai tulajdonságai teszik az olvasztott fehér korundot kiemelkedő technikai alapanyaggá számos ipari felhasználási területen. A tisztánlátás végett fontosnak tartom tisztázni a nevezéktani kérdéseket, melyet mind a hazai, mind a nemzetközi szakirodalom számos esetben helytelenül használ. A doktori disszertációm során az olvasztott fehér korundot és ennek rövidebb változatát a korundot használtam a mintaanyagom megjelölésére, viszont hazánkban elterjedt a műkorund, a nemeskorund és a mesterséges korund, valamint a fehérkorund kifejezés is ugyanerre az anyagra. A nemzetközi angol nyelvű szakirodalom a White Fused Alumina (WFA), Electro Corundum, Corundum, Artificial Corundum szakkifejezéseket használja az anyag megnevezésére. Szakirodalmi kutatómunkám során számos esetben tapasztaltam, hogy a szintereléssel és olvasztással előállított korundot egymásnak megfeleltetett módon egy anyagként kezelik, mely valójában két teljesen különböző anyag, két eltérő módszerrel előállítva.

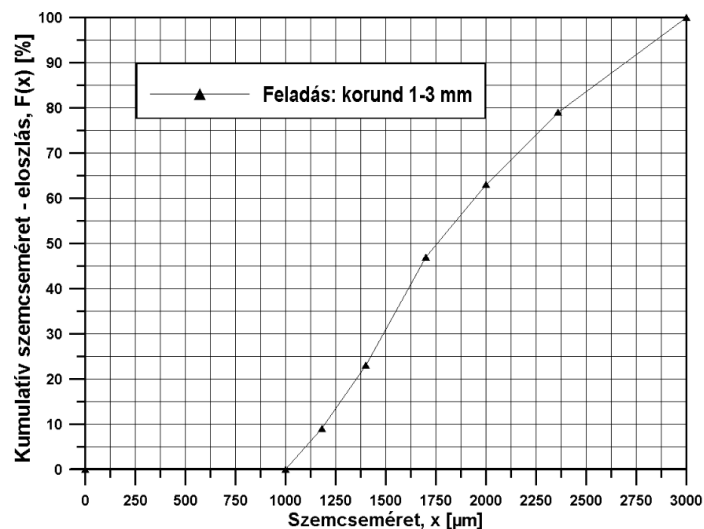
A kutatásaimhoz szükséges korund és mullit előállításához az 1. táblázatban bemutatott kémiai és fizikai jellemzőkkel rendelkező tűzállóanyag minőségű timföldet használtam fel. Az előállításához a Refra-System Kft. elektromos billenő ívkemencéjét használtuk fel az olvasztókkal, melynek során 2000 °C hőmérséklet feletti hőtartományban történt meg a feladott timföld beolvasztása 1,25 MWh/t fajlagos olvasztási munkaigénnyel. A saját szemcsés anyagával kibélelt öntőedényekbe ezután 300 kg tömegű olvadékot csapoltunk le minden egyes öntés során és a hűtési mechanizmusnak köszönhetően 24 óra elteltével a tömbök 50 °C hőmérséklet alá hűltek le, ezáltal rideggé és durva előtörésre alkalmassá váltak.

	Garantált minimum érték [%]	Garantált maximum érték [%]	5 mérés átlagértéke [%]
Al ₂ O ₃	98,8-99	min 98,7	98,89
SiO ₂	0,005-0,010	max 0,015	0,007
Fe ₂ O ₃	0,008-0,012	max 0,018	0,01
Na ₂ O _{total}	0,25-0,4	max 0,45	0,18
CaO	0,018-0,025	max 0,03	0,013
P ₂ O ₅	0,0002-0,0005	max 0,0009	0,0005
TiO ₂	0,002-0,0027	max 0,003	0,0013
ZnO	0,017-0,025	max 0,028	0,014
Izzítási veszteség (300 °C-1000 °C)	0,6	1	0,88
+ 45 µm (nedves szitálás)	85	100	86,6
-20 µm (nedves szitálás)	0	2,5	2,5

1. táblázat A tűzállóanyag minőségű timföld kémiai összetétele XRF spektrométerrel meghatározva és a timföld fizikai jellemzői (Független labormérés)

A dugattyúspréses feladására használt 1-3 mm-es korundfrakciót 3 lépéses aprítással állítottam elő 2 pofástörővel, illetve egy hengerestörővel, nyitott folyamatos aprítással. Az így kapott 0-3 mm-es frakciót Retsch AS 200 TAP laboratóriumi szitaberendezés segítségével osztályoztam el 0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5; 0,5-1 mm és a már említett feladást képező 1-3 mm frakciókba. A laboratóriumi szitával végzett osztályozás során, minden esetben az adott frakciókat tömegállandóságig szitáltam. Az ilyen módon előállított 0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5; 0,5-1 mm-es frakciók képezték a későbbi összehasonlító mérések során használt bázisértékeket.

A HPGR feladáshoz használt 1-3 mm korundfrakció szintén 3 lépéses aprítással lett előállítva 2 pofástörővel, illetve egy hengerestörővel, nyitott folyamatos aprítással, viszont lineáris síkszítán történt meg az 1-3 mm-es frakció előállítása többszöri kontrollszitálással míg az meg nem egyezett a laboratóriumi szitás osztályzással nyert 1-3 mm frakcióval. Mivel mindkét termék azonos módszerű törésből azonos beállításokkal készült, az előállított 1-3 mm frakció is teljes mértékben azonosnak adódott. A feladasként használt 1-3 mm-es korundfrakció kémiai elemzését a 2. táblázat tartalmazza, míg a szemcseméret eloszlása a 15. ábrán látható. A kémiai elemzések a timföld és a korund 1-3 mm frakció esetén is laboratóriumi ARL 9900 XRF spektrométerrel történtek, egy független laboratóriumban a MSZ-EN - ISO 12677:2012 szabvány szerinti eljárással. Az 1-3 mm korundfrakció halmazsűrűsége $1,83 \text{ g/cm}^3$, mely a MSZ 6506-84 szerint meghatározott eljárással lett meghatározva.



15. ábra Az aprítási kísérletek során feladasként felhasznált korundfrakció szemcseméret eloszlása

Vegyület megnevezése	Mértékegység	Korund 1-3 mm
Al ₂ O ₃	m/m%	99,81
Fe ₂ O ₃	m/m%	0,02
MgO	m/m%	<0,008
SiO ₂	m/m%	0,015
CaO	m/m%	0,015
TiO ₂	m/m%	<0,005
ZnO	m/m%	0,0051
Na ₂ O	m/m%	0,13

2. táblázat Az aprítási kísérletek során feladásként felhasznált korundfrakció XRF spektrométerrel meghatározott kémiai összetétele

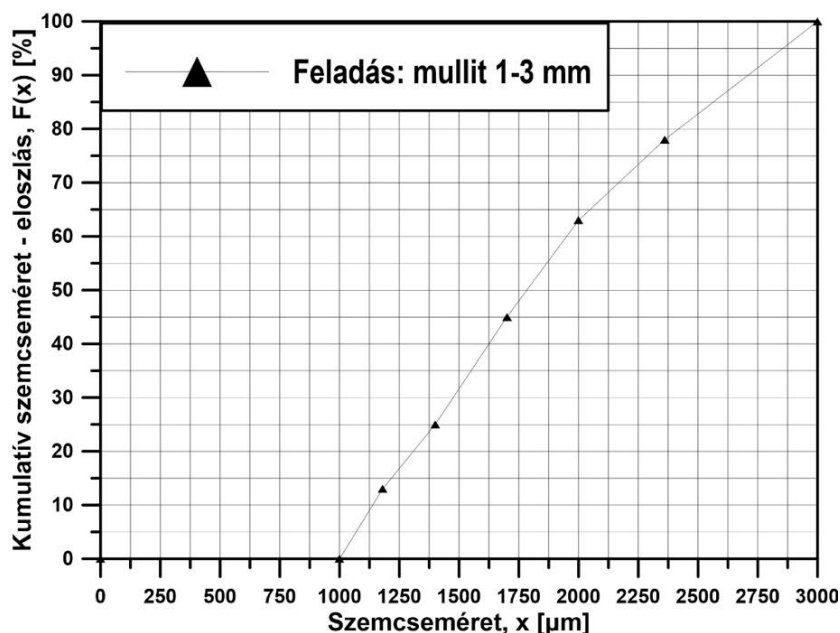
Olvasztott fehér mullit

A röpítő törővel kivitelezett aprítási kísérleteim során 56,5 m/s ütközési sebességeket is alkalmaztam, ehhez célszerűbb volt egy kevésbé abrazív, mechanikailag kevésbé ellenálló, de ridegen törő mesterséges alapanyagot használnom, ezért esett a választásom a Refra-System Kft.-nél előállított olvasztott fehér mullitra. A mullit gyártás is elektromos billenő ívkemencében történt meg 1850 °C hőmérsékleten 1,2 MWh/t fajlagos olvasztási munka alkalmazása mellett, az 1. táblázatban bemutatott minőségű timföld és nagy tisztaságú kvarchomok felhasználásával. Az olvasztási és mechanikai előkészítési metódus további paraméterei teljes egészében megegyeztek a korund esetében bemutatottal, tehát a bázis frakciók Retsch AS 200 TAP, míg a röpítőtörők feladását lineáris síkszítával osztályoztam el, minden esetben tömegállandóságig folytatva a folyamatot az adott szitamaradványok esetén. Az aprítási kísérletek során használt 1-3 mm-es mullit frakció szemcseméret-eloszlásfüggvényét a 16. ábra, a kémiai összetételét a 3. táblázat tartalmazza.

Vegyület megnevezése	Mértékegység	Mullit 1-3 mm
Al ₂ O ₃	m/m%	76,19
Fe ₂ O ₃	m/m%	0,048
MgO	m/m%	0,003
SiO ₂	m/m%	23,56
CaO	m/m%	0,008

TiO ₂	m/m%	<0,007
ZnO	m/m%	0,008
Na ₂ O	m/m%	0,06

3. táblázat Az aprítási kísérletek során feladásként felhasznált mullit frakciók XRF spektrométerrel meghatározott kémiai összetétele



16. ábra Az aprítási kísérletek során feladásként felhasznált mullit szemcseméret-eloszlása

3.4. A kiértékelési módszerek

A doktori disszertációmban foglalt tudományos eredményeim olyan szisztematikusan felépített és kivitelezett mérési és kiértékelési módszereken alapszanak, melyeket a Refra-System Kft. termelő üzemeiben és a Miskolci Egyetem különböző laboratóriumi egységeiben végeztem el. Az elvégzett kísérletrendszerből nyert adatok feldolgozása és kiértékelése matematikai statisztikai módszerek, valamint mérőszámok és leíró paraméterek képzése útján történt meg. A kiértékelési módszerek változatos mivolta, könnyebb követhetősége és átláthatósága érdekében, minden egyes eredményeket közlő fejezet elején röviden bemutatom a kiértékelés menetét és módszereit.

4. Dugattyúsprés kísérleti eredmények

A 2.3. fejezetben és alfejezeteiben közölt szakirodalmi információk alapján látható, hogy a dugattyúsprés berendezés kiválóan alkalmas a zárt szemcseágyas aprítás modellezésére, kontrollált üzemviszonyok (szemcseágyvastagság, szemcseágynyomás, préselési sebesség) alkalmazása mellett. Ennek köszönhetően mind a mai napig elterjedt módszer

ennek a törési mechanizmusnak a vizsgálatára, de szintén használatos mérési módszer a nagynyomású őrlőhengerpárok méretezésénél és fejlesztésénél is. A szisztematikusan felépített kísérleti és mérési rendszerrel elvégzett kutatásom során megvizsgáltam a szemcseágyvastagság és a szemcseágynyomás változásának hatásait a keletkezett termékek diszperzitás tulajdonságaira korund esetén.

4.1. Kísérleti és kiértékelési módszerek

A kis igénybevételi sebességű, kompresszió alapuló szemcseágyas törési mechanizmus vizsgálatai alatt az I.M. fejezetben bemutatott laboratóriumi dugattyúsprés berendezést alkalmaztam, amihez 1-3 mm-es korundfrakciót használtam feladási modellanyagként. A feladási modellanyag a törési vizsgálatokhoz a 3.3. fejezetben bemutatott módszer szerint került előkészítésre és a 10, 50 és 90 %-os szemcsemérete 1,195 mm, 1,76 mm és 2,69 mm-nek adódott. A mintaelőkészítés alkalmával, a nyitott folyamatos aprítás közben létrejött, 0-1 mm-es szemcsemérettartományba letört, lemezes és tűszerű szemcsék kis halmazsűrűségű frakciókat eredményeztek, mivel főleg egyszemcse-töréssel jöttek létre, valamint a szemcse-szfericitásuk is kisebb lett (4.táblázat). Ezen anyagfrakciók és a szfericitási ($SPHT_0$) valamint halmazsűrűségi értékeik (ρ_{halm0}) szolgáltak bázisértéknek a későbbi összehasonlító vizsgálataim és kiértékelési metódusaim során. A szemcsealak vizsgálathoz az I.M. fejezetben bemutatott Camsizer X2 berendezést használtam, az ott közölt beállításokkal.

X[μ m].	Szfericitás SPHT ₀ [-]	Halmazsűrűség ρ_{halm0} [g/cm ³]
0-150	0,731	1,41
150-300	0,741	1,51
300-500	0,750	1,64
500-1000	0,748	1,70

4. táblázat Az egyszemcsetöréssel előállított frakciók SPHT₀ és ρ_{halm0} értékei

A mérésekből származó adatok kiértékelésekor az alábbi függvénykapcsolatokat vizsgáltam meg:

- $F(x) = f(x)$
- $X_{10}/X_{10}, X_{50}/X_{50}, X_{90}/X_{90} = f(p, h)$
- $K = f(p, h)$
- $SPHT_{növ} = f(p \text{ és } h)$

$$- \rho_{\text{halm,növ}} = f(p \text{ és } h)$$

$$- \eta = f(p \text{ és } h)$$

ahol:

$F(x)$: szemcseméret-eloszlás [%]

X és x : Feladási és termék szemcseméretek [μm és mm]

X_{10}/X_{10} , X_{50}/X_{50} , X_{90}/X_{90} : Aprítási fok 10, 50, 90%-os szemcseméreten [-]

K : 0-1 mm termékek tömegkihozatala [%]

p : Alkalmazott dugattyúnyomás [MPa]

h : Alkalmazott szemcseágyvastagság [mm]

$SPHT_{\text{növ}}$: Adott termékfrakció átlagos szfericitás növekménye [%]

$\rho_{\text{halm,növ}}$: Adott termékfrakció halmazsűrűség növekménye [%]

η : Törést és szemcse alakformálást jellemző hatékonysági mérőszám [-]

A szemcsealak leíró paraméterek sokaságából a szfericitás (SPHT) és a szemcse szélesség-hosszúság arányát (b/l) kifejező mérőszámokat vizsgálatnak vetettem alá, hogy megbizonyosodjak róla, melyik áll szorosabb összefüggésben a halmazsűrűségi értékekkel a vizsgált termékfrakciókban. A választásom azért esett erre a két paraméterre, mert jól vizsgálható velük a blokkos, kubikus és gömbszerű szemcsealak, illetve ezzel párhuzamosan a lemezes és tűszerű szemcsealakokkal rendelkező szemcse is, emellett Al-Rousan és társai (2007) is a szemcse szfericitást (SPHT) és a szemcse hosszúság-szélesség (b/l) arányát ajánlják a szemcsealak vizsgálatára az általuk tanulmányozott 14 szemcsealakleíró paraméter közül.

A szemcsetérfogati szfericitás (SPHT) számítása az alábbi képlet szerint történik:

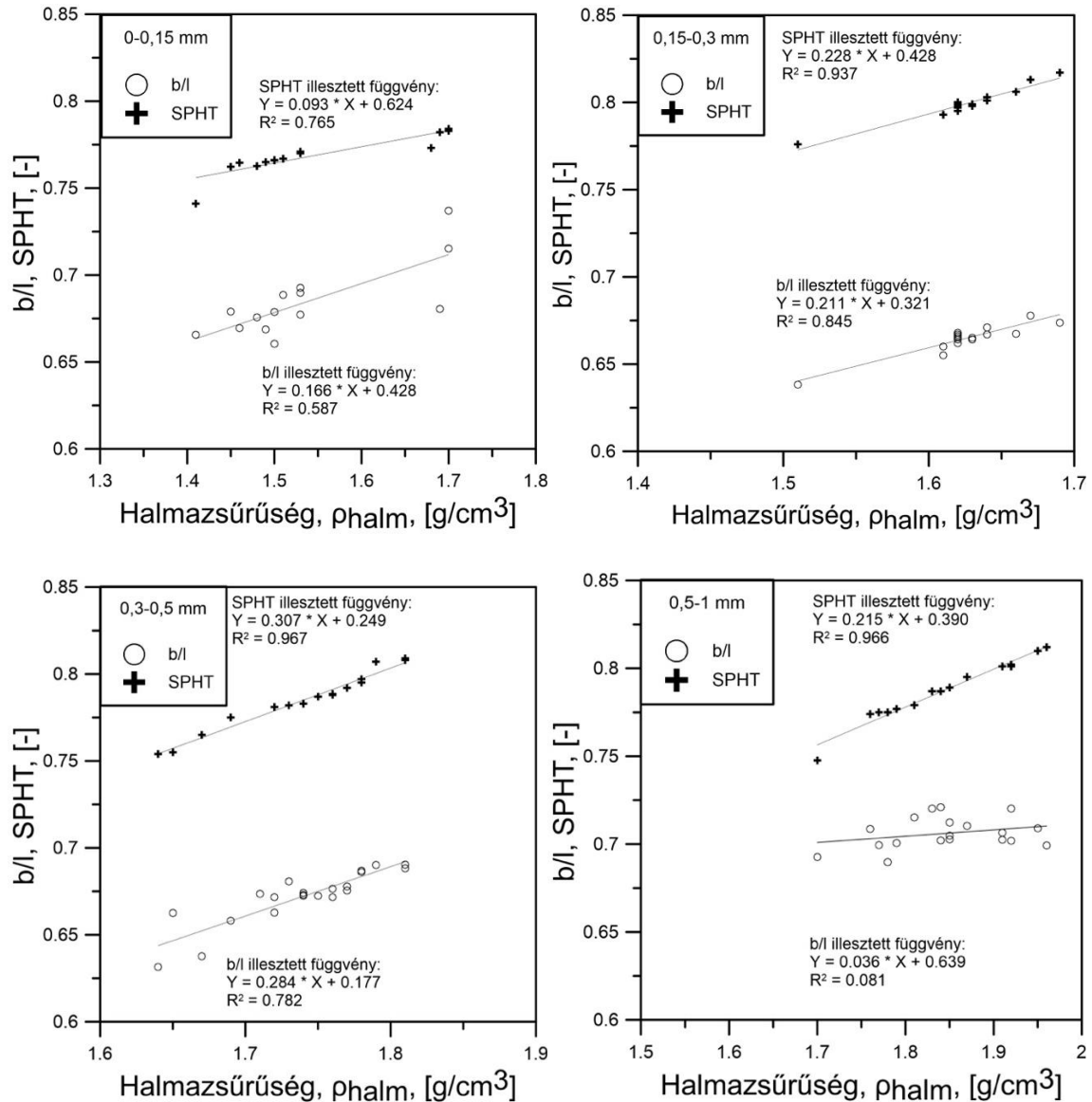
$$SPHT = \frac{4\pi \times A}{P^2} \quad 4.1.1.$$

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 szemcsetérfogati szemcseszélesség-hosszúság aránya (b/l) a következők szerint számítandó:

$$\frac{b}{l} = \frac{X_{c \min}}{X_{Fe \max}} \quad 4.1.2.$$

Ahol $X_{c \min}$ – minimális szemcsehúr, $X_{Fe \max}$ – maximális Feret átmérő. A 17. ábrán látható, hogy a különböző törési módok és az azokhoz tartozó eltérő törési paraméterek, hogyan befolyásolják az egyes szűken osztályozott frakciók b/l és SPHT mérőszámainak kapcsolatát azok halmazsűrűségeivel. Látható, hogy mindkét alakleíró paraméter esetén a

magasabb halmazsűrűséghez nagyobb b/l és SPHT érték kapcsolódik, viszont az illesztett függvény erősebb kapcsolatot mutat mind a négy megvizsgált frakció esetén a szemcsék szfericitása és azok halmazsűrűsége között. A dolgozatom hátralevő részében ezért a szemcse szfericitás használatát részesítettem előnyben.



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

A képzett mérőszámok közül a szfericitás növekmény megmutatja, hogy az egyszemcsetöréssel előállított frakciók szemcse szfericitása (SPHT_0) mennyivel növelhető meg abban az esetben, ha a törés zárt anyaágyas aprítással történik meg, 1-3 mm-es korund feladásból.

A növekmények jelölése mind a $\text{SPHT}_{\text{növ}}$, mind a $\rho_{\text{halm,növ}}$ esetében azt jelöli, hogy a SPHT_0 és $\rho_{\text{halm}0}$ egyszemcsetöréssel előállított bázisértékei, milyen mértékben növekedtek meg

SPHT₁ és ρ_{halm1} értékekre a dugattyúsprésben létrehozott zárt szemcseágyas aprítással, 1-3 mm-es korund feladása esetén.

A további vizsgálatok tárgyát képező 0-0,15, 0,15-0,3, 0,3-0,5 és 0,5-1 mm-es termékfrakciókat, a 0-1 mm-es termékszemcsékből osztályoztam ki, a 3.3. fejezetben bemutatott módszerrel analóg módon. A szfericitás növekmény az adott frakció szfericitásának emelkedését mutatja meg. Számítása a következő szerint történik:

$$SPHT_{\text{növ}} = \frac{SPHT_1 - SPHT_0}{SPHT_0} \times 100 \quad 4.1.3.$$

ahol, SPHT₀ az egyszemcsetöréssel előállított frakció szfericitása, míg a SPHT₁ a zárt szemcseágyas aprítással előállított ugyanezen névleges szemcseméretű frakció szfericitása. A halmazsűrűség növekmény számítása teljesen analóg módon képezve:

$$\rho_{\text{halm, növ}} = \frac{\rho_{\text{halm1}} - \rho_{\text{halm0}}}{\rho_{\text{halm0}}} \times 100 \quad 4.1.4.$$

, ahol ρ_{halm0} az egyszemcse-töréssel előállított frakció halmazsűrűsége, ρ_{halm1} a zárt szemcseágyas aprítással előállított ugyanezen névleges szemcseméret-frakció halmazsűrűsége. Az η hatékonysági mutató nem csak a törés szemcsealakformáló hatását, de az előállított termékek mennyiségét is figyelembe veszi, ezzel jobban leképezve a törési folyamat hatékonyságát.

$$\eta = \frac{(\sum SPHT_{\text{növ}} \times K)}{100} \quad 4.1.5.$$

ahol η a törés és szemcsealakformálás hatékonyságát jelző mérőszám, ΣSPHT_{növ} a szemcsefrakciók szfericitás összege, K pedig a <1 mm termékfrakció tömegkihozatala.

A szemcseágyaprítási kísérletek lefolytatásakor megvizsgáltam a 125, 175, 225 és a 250 MPa szemcseágynyomások hatásait 5, 10, 15, 20 és 25 mm szemcseágyvastagság mellett a keletkezett töretek diszperzitás jellemzőire. Az alkalmazott igénybevételi sebesség, azaz a dugattyú nyomósebessége minden esetben 31,5 mm/s volt. Az érték megválasztásakor két fő elv mentén haladva hoztam meg a döntésem. Elsőként szem előtt kellett tartanom, hogy az eredmények fényében, a doktori kutatásom egyik fő célkitűzése a zárt szemcseágyas aprítás folyamatos üzemben való kivitelezése korund esetén, megfelelő volumenben legyen megvalósítható, tehát minimum 71 kg/h feldolgozóképesességgel rendelkezzen, ezzel ipari méretben is alkalmazhatóvá váljon, mert két műszakban, évi 220 munkanappal számolva is képes lehet a 250 t/év kapacitásra.

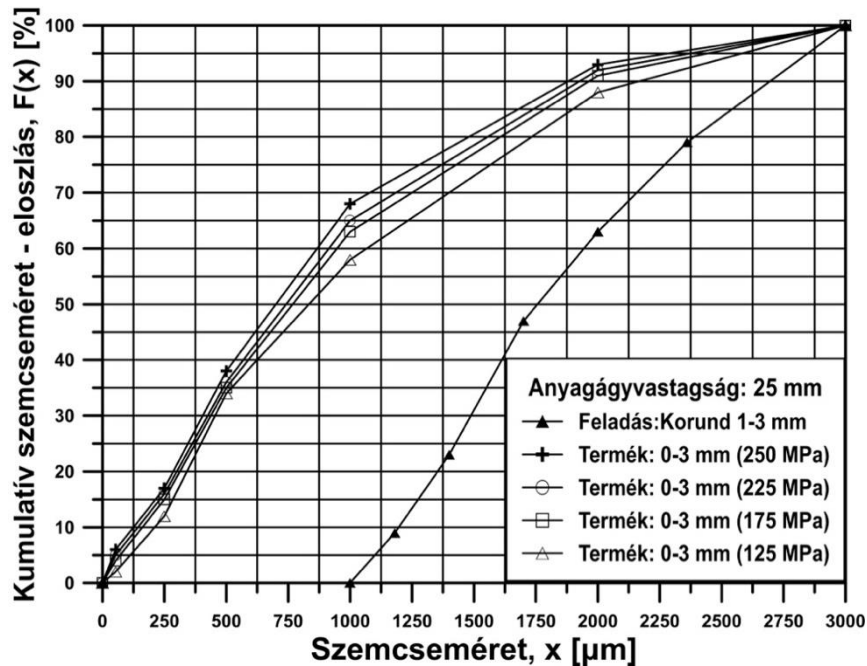
A dugattyú nyomósebesség megválasztásánál a másik faktor, amelyet figyelembe vettem, hogy Professzor Klaus Schönert 2003-as társszerzős publikációjában 55-700 mm/s nyomósebességet alkalmazott az olyan koptató és rendkívüli mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyagok aprítása esetén, mint a kvarc, cirkónium-szilikát, olvasztott korund és szilícium-karbid (Reichardt és Schönert, 2003). Figyelembe vettem ugyanakkor Mütze (2008) kísérleti eredményeit is, mely a rideg és koptató kvarc törésére 0,5 és a 100 mm/s nyomósebesség közül a lassabbat találta energetikailag hatékonyabbnak. Mivel a laboratóriumi dugattyúsprés maximális nyomósebessége 31,5 mm/s, ezért ezt választottam a kísérletekhez használt állandó paraméternek. Ez az érték még közel esik Reichardt és Schönert (2003) ajánlásához a nagyszilárdságú anyagok aprítására, valamint figyelembe veszi Mütze (2008) eredményeit, miszerint célszerűbb a lassúbb nyomósebességet választani.

A mérések alatt minden esetben egy igénybevétel (dugattyú nyomás) érte a szemcseágyakat, tehát nem folytattam le vizsgálatokat a többszöri dugattyúspréssel történő nyomás megvizsgálására egyazon mintán, ezzel reprezentálva a nagynyomású örlőhengerpárokban létrejövő igénybevételi környezetet, nyitott folyamat esetén. A dugattyúsprés berendezésre feladott 1-3 mm-es korundfrakció 1,83 g/cm³-es halmazsűrűsége és a 25 mm-es hüvelyátmérő, mely a szemcseágy átmérőjét adja determinálta, hogy a legkisebb, azaz az 5 mm-es vizsgált szemcseágyvastagság esetében 4,5 g feladott mintaanyag elhelyezése vált szükségesé a hüvelyben. Jól látható, hogy ahhoz, hogy a megfelelő mennyiségű töret rendelkezésemre álljon az I.M fejezetben bemutatott MSZ 6506-84 szerinti szabványos mérés kivitelezésére, több száz szemcseágyösszenyomást kellett elvégezni egy-egy beállítás mellett, melynek következtében robosztus mérési ismétlésszámmal jellemezhető vizsgálatból származó mintaanyagra tettem szert a további eredmények kiértékeléséhez.

4.2. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a töret szemcseméret-eloszlására

A 18. ábra bemutatja, hogy a legnagyobb általam megvizsgált szemcseágyvastagság (25 mm) mellett, a 125-250 MPa dugattyúnyomás intervallumban, hogy alakultak a termékek szemcseméret-eloszlásai. Látható, hogy a nagyobb alkalmazott dugattyúnyomás finomabb töretet eredményezett a 25 mm-es szemcseágyvastagság alkalmazása esetén. A 125 MPa dugattyúnyomás mellett létrejött termék 10, 50 és 90 %-os szemcseméretátmérője 200, 830 és 2180 µm-nek adódott, ezzel a legdurvább töretet eredményezve. A mérési sorozatban változatlanul hagyott szemcseágyvastagság mellett a 175 MPa-ra emelt dugattyúnyomás 10, 50 és 90 %-os szemcseméretátmérője 155, 770 és 1960 µm lett. Tovább emelve az

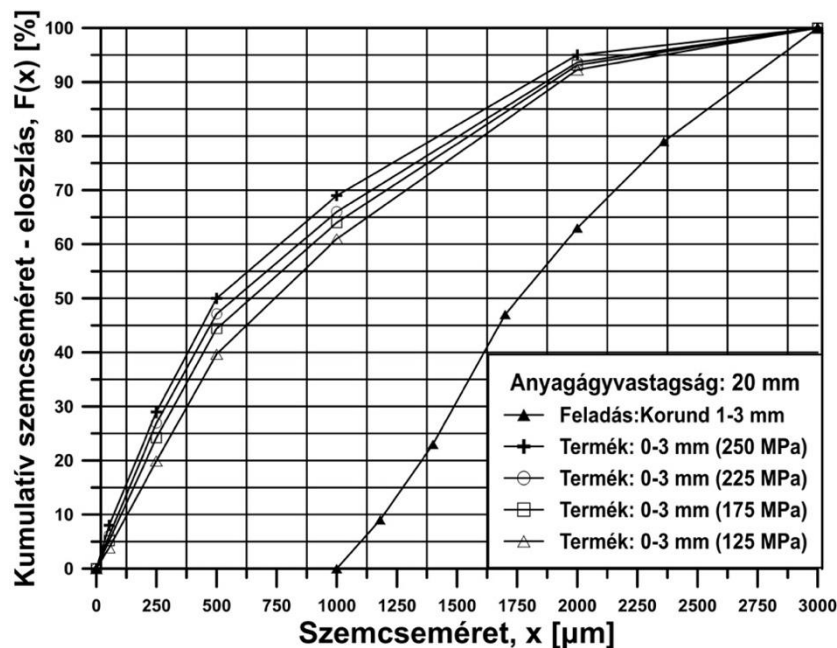
alkalmazott dugattyúnyomást 225 MPa-ra a 10, a medián és a 90 %-os szemcseméret értékei pedig 140, 740 és 1915 μm -nek adódtak. A mérési sorban alkalmazott legmagasabb dugattyúnyomás értékhez tartoztak a legkisebb nevezetes szemcseméret értékek, a 10 és a 90 %-os szemcseméret ebben az esetben 125, 690 és 1880 μm lett.



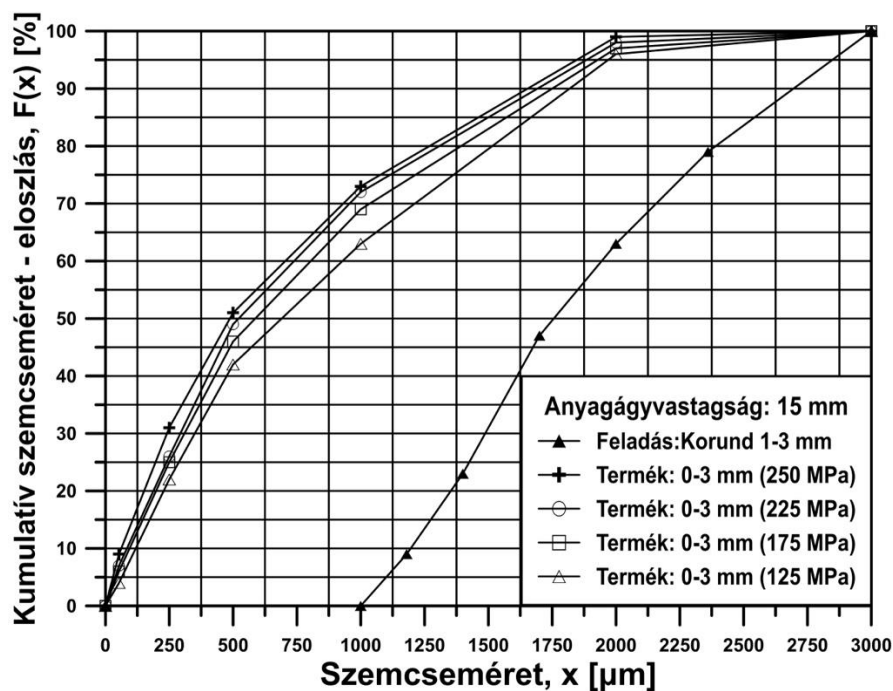
18. ábra Az alkalmazott dugattyúsprés nyomás hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására 25 mm vastag szemcseágy esetén

A második mérési sorozatban 20 mm-re csökkentve a szemcseágyvastagságot 125 MPa dugattyúnyomás mellett a 10, a medián és a 90 %-os szemcseméret értékei 125, 740 és 1930 μm -nek adódtak. 175 MPa-ra emelve a dugattyúnyomást az előzőekhez analóg módon a nevezetes szemcseméret értékei 105, 640 és 1890 μm -re csökkentek. A 225 MPa-hoz tartozó 10, 50 és 90 %-os nevezetes szemcseméret értékei 90, 560 és 1870 μm -ek voltak. A legkisebb 10, 50 és 90 %-os szemcseméret értékei a legnagyobb, tehát a 250 MPa dugattyúnyomás esetén jelentkeztek, szám szerint, 70, 500 és 1810 μm -vel. A 20-mm vastag szemcseágy különböző nyomásértékekkel megterhelt termékeinek szemcseméret-eloszlása a 19. ábrán látható.

Szisztematikusan tovább csökkentve a szemcseágyvastagságot 15 mm-re és a 20. ábrán látható dugattyúnyomásokat alkalmazva szintén azt tapasztaltam, hogy a nagyobb nyomás tendenciózusan jobb aprítást és finomabb töretet fog eredményezni.



19. ábra Az alkalmazott dugattyúsprés nyomás hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására 20 mm vastag szemcseágy esetén

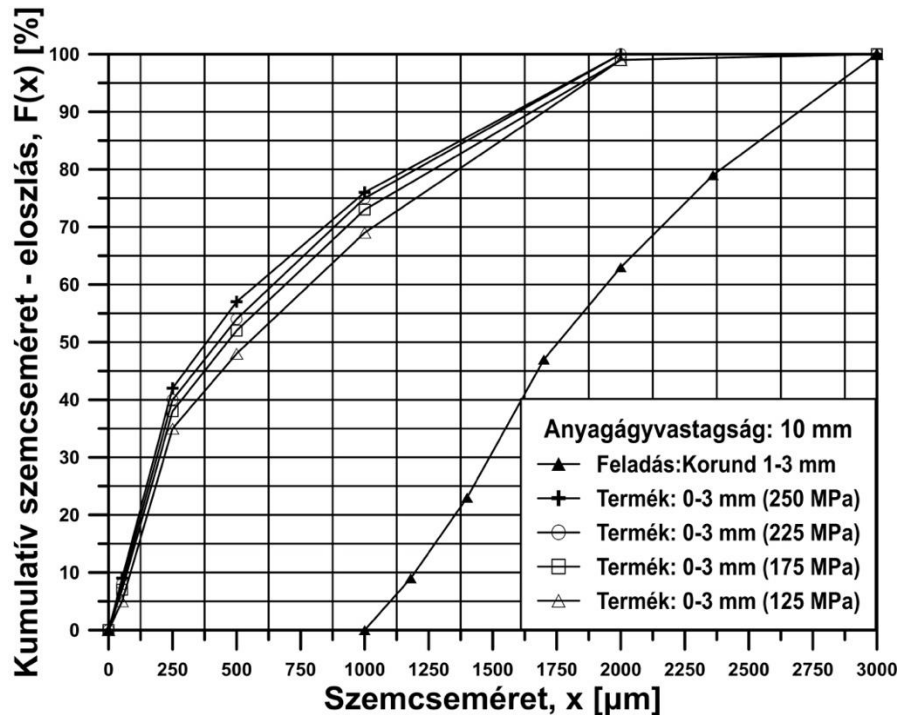


20. ábra Az alkalmazott dugattyúsprés nyomás hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására 15 mm vastag szemcseágy esetén

Látható, hogy a 10, 50 és a 90 %-os szemcseméret a legkisebb dugattyúnyomás esetén 120, 690 és 1840 μm lesz míg a dugattyúnyomást 175 MPa-ra emelve ugyanezen nevezetes szemcseméretnek 90, 600 és 1750 μm -nek adódtak. Tovább emelve a

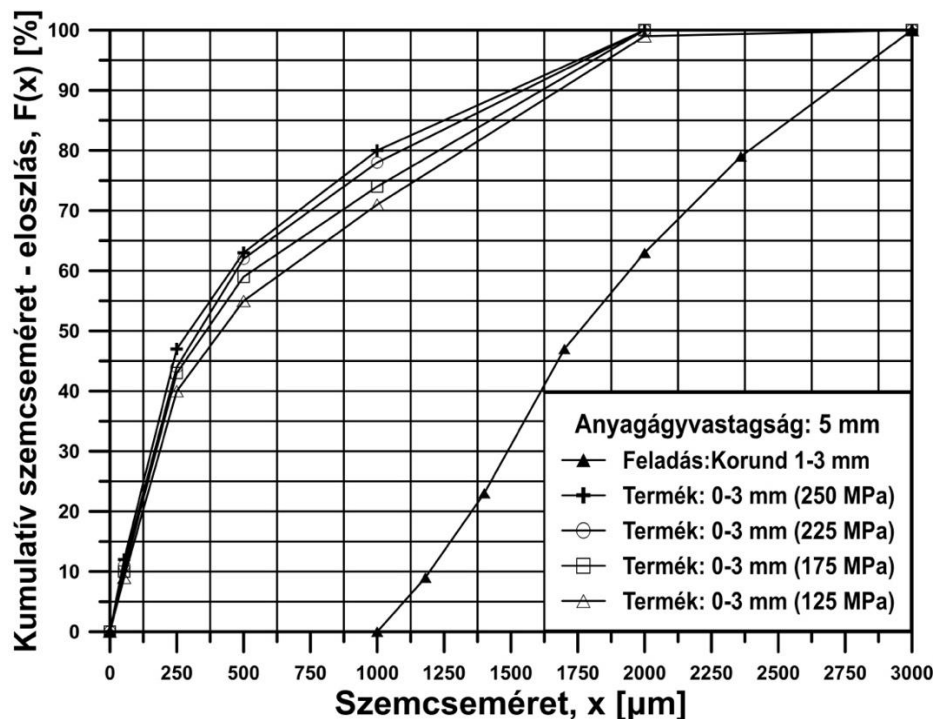
dugattyúnyomást 225 és 250 MPa értékre a 10, 50 és a 90 %-os szemcseméret: 85 μm , 520 μm , 1700 μm és 60, 490, illetve 1650 μm -es értékeket vettek fel.

A 21. ábrán azt láthatjuk, hogy 10 mm-es anyag esetén is fennáll a korábbiakhoz hasonló nyomás-töret finomság reláció. A 10, 50 és a 90 %-os szemcseméret a 125 és 175 MPa dugattyúnyomás esetén 80, 540 és 1690 μm -nek majd, 75, 470 és 1650 μm -nek adódott. A 225 és 250 MPa dugattyúnyomások esetén ugyanezen három nevezetes szemcseméret pedig 70, 450 és 1600 μm , illetve 55, 380 és 1585 μm -es értéket vett fel.



21. ábra Az alkalmazott dugattyúsprés nyomás hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására 10 mm vastag szemcseágy esetén

Az általam legalacsonyabb vizsgált szemcseszemcseágy vastagság esetén, melyet a 22. ábra mutat be, a 10, 50 és a 90 %-os szemcseméret 125 MPa és 175 MPa dugattyúnyomások alkalmazása mellett, 60, 400 és 1670 μm -nek, majd 55, 365 és 1620 μm -nek adódtak. A dugattyúnyomást 225 és 250 MPa-ra emelve a három nevezetes szemcseméret az 50, 340 és 1550 μm -es és a 45, 300 és 1500, μm -es értékeket vette fel.

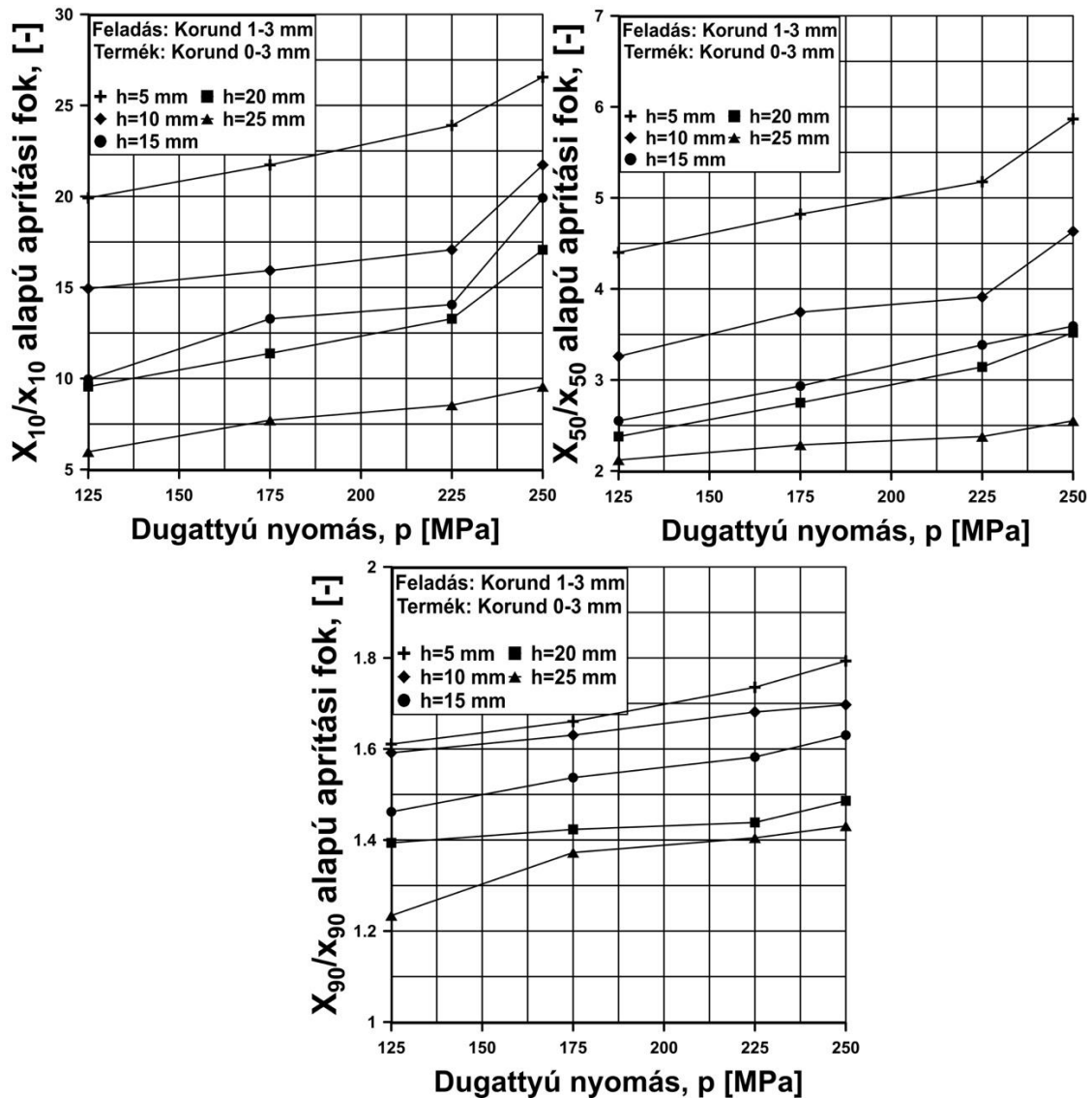


22. ábra Az alkalmazott dugattyúsprés nyomás hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására 5 mm vastag szemcseágy esetén

Összességében azokra a fő következtetésekre jutottam a fejezetben, hogy a vizsgált szemcseágyvastagság és dugattyúnyomás tartományában, egy adott szemcseágyvastagság mellett a nagyobb dugattyúnyomás minden esetben finomabb töretet eredményezett, illetve adott dugattyúnyomás érték mellett mindig az alacsonyabb szemcseágyvastagság alkalmazása vezet finomabb törethez. Ezen eredményeim teljes mértékben összhangban állnak a 7. ábrán bemutatott tapasztalásokkal, miszerint a vékonyabb szemcseágy, közelítve az egyszemcse szituációhoz, energetikailag jobb törést eredményez (Schönert, 1996).

4.3. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása az aprítási fokra

Mivel az aprítási fok a szemcseméret-eloszlás függvények mellett szintén jó leíróparaméter a szemcseméretcsökkentő eljárás hatékonyságának jellemzésére, ezért elvégeztem ezt a kiértékelést is, viszont három különböző pontján vizsgáltam meg a kapott szemcseméret-eloszlásfüggvényeket. A 10-50-90 %-os szemcseméret alapján számolt aprítási fokokat is meghatároztam, majd ábrázoltam a kapott értékeket a 23. ábrán.



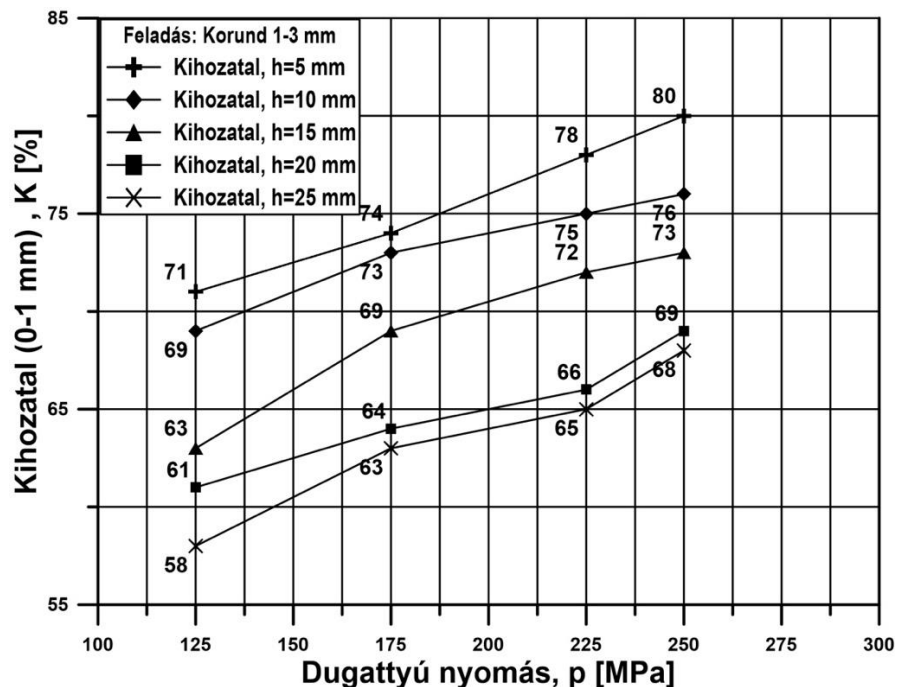
23. ábra Az alkalmazott szemcseágyvastagság és a dugattyúnyomás hatása a termékek 10, 50 és 90%-os szemcseméretén alapuló aprítási fokára

A 23. ábrán jól látható miért szükséges több, tehát a 10, 50 és a 90 %-os szemcseméreteknél is megvizsgálni az aprítási fokokat. Míg a 90 %-os szemcseméretnél értelmezett aprítási fok 1,23 és 1,79 es intervallumban, addig az 50 %-os szemcseméretnél értelmezett aprítási fok már a 2,12- 5,87 értékek között változott. A 10 %-os szemcsemérethez tartozó aprítási fok értékei ölelték fel a legszélesebb intervallumot 5,98 – 26,56-ig, melyből az utóbbi eredmény mutatkozott a legmagasabb aprítási foknak, és hozzá a legalacsonyabb szemcseágyvastagság és a legmagasabb dugattyúnyomás volt köthető. Szintén egyértelműen látszik az is, hogy bármely általam megvizsgált dugattyúnyomás alkalmazása mellett, bármelyik nevezetes szemcseméreten alapuló aprítási fokot megvizsgálva, mindig az alacsonyabb szemcseágyvastagság vezetett

magasabb aprítási fokhoz, mivel az energetikailag leghatékonyabb aprítási mód Schönert (1996) szerint az egyszemcsetörés és az egymáson elhelyezkedő szemcsék számának növekedésével, tehát a szemcseágy vastagság növekedésével ezt követi a zárt szemcseágyas törés.

4.4. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a termékkihozatalra

Ebben a fejezetben a korund 1-3 mm-es feladási modellanyagból dugattyúsprésben letört 0-1 mm-es szemcsék arányainak változását mutatom be, 20 különböző mérési beállítás esetén. Jól látható, hogy a mintaelőkészítés rendkívül alapos mivolta következtében, ez egyben és analóg módon a feladott szemcsék igénybevétel hatására elszenvedett törési valószínűségét is jelenti.



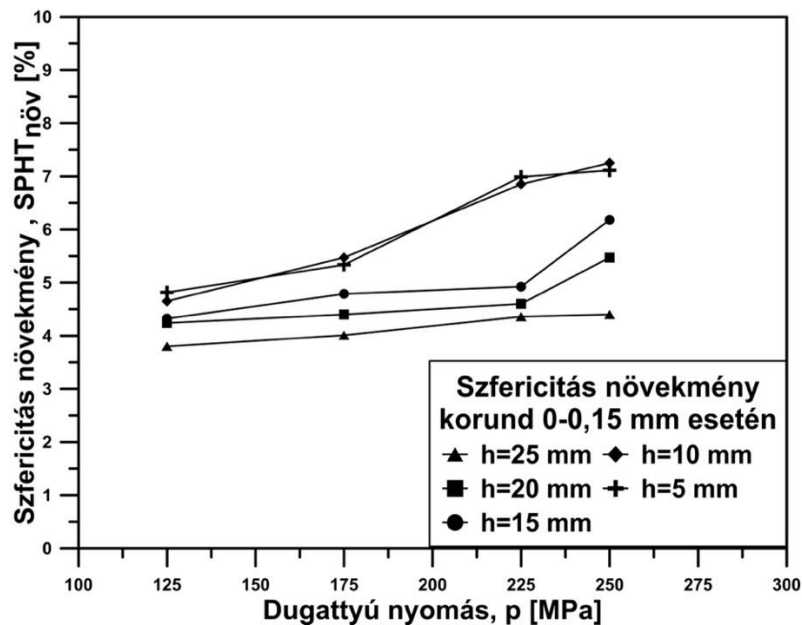
24. ábra Az alkalmazott szemcseágyvastagság és a dugattyúnyomás hatása a 0-1 mm-es frakció tömegkihozatalára

A 24. ábrára tekintve látható, hogy a különböző mérést és aprítást befolyásoló mérési paraméterek függvényében a 0-1 mm-es korundfrakció kihozatala 58 és 80 % között változott. A legalacsonyabb kihozatal a legkisebb dugattyúnyomás és a legvastagabb alkalmazott szemcseágy esetén jelentkezett, míg a legmagasabb kihozatal a legmagasabb alkalmazott dugattyúnyomáshoz és legvékonyabb szemcseágyhoz tartozik. Szintén megfigyelhető ezen az ábrán, hogy bármely általam vizsgált szemcseágyvastagság esetén, a mérés során használt dugattyúnyomás emelése növeli a 0-1 mm-es korundfrakció kihozatalát. Megállapítható továbbá, hogy bármely, a szemcseágyat terhelő alkalmazott dugattyúnyomás esetén a vékonyabb szemcseágyréteg magasabb kihozatali értékeket

tudott biztosítani, mert a kevésbé energiahatékony zárt szemcseágyas aprítási módszertől közeledünk az egyszemcsetörés esetéig, mely energetikailag a leghatékonyabb törési mód a kompresszió alapuló igénybevételek közül (Schönert, 1996)

4.5. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a termék szemcse-szfericitásra

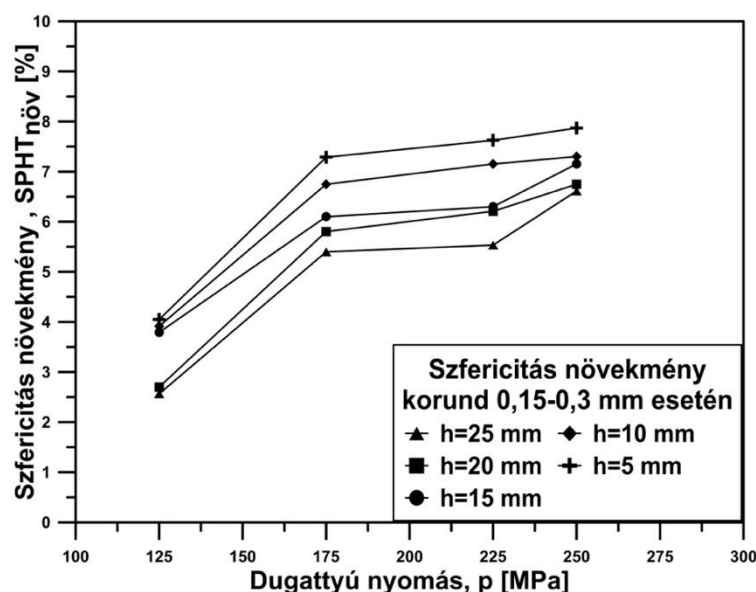
A 4.2-4.4. fejezetekben bemutatott eredményeim alapján nyilvánvalóvá vált, hogy adott dugattyúnyomás értékek mellett a csökkentett szemcseágyvastagság egy energetikailag hatékonyabb aprítási módhoz vezethet, mivel a csökkenő egymáson elhelyezkedő szemcsék száma közelít ahhoz az állapothoz, amikor egyszemcseigénybevétel általi törés jön létre. Bár Schönert, (1979) szerint energetikailag valóban nagyon hatékony, a szemcsealak és az ezzel szoros kapcsolatban álló halmazsűrűség, melyet a 4. táblázat is szemléltet. Hátrányos eredmények érhetők csak el egyszemcsetörés esetén, köszönhetően a lemezes és tűs szemcsealaknak, mely ezt a fajta törési módszert jellemzi. A fejezetben a szemcsék alakleíróparaméterei közül a szemcse szfericitási mérőszámot vizsgáltam meg a termékek különböző frakcióin.



25. ábra Az alkalmazott szemcseágyvastagság és a dugattyúnyomás hatása a 0-0,15 mm-es frakció szfericitás növekményére

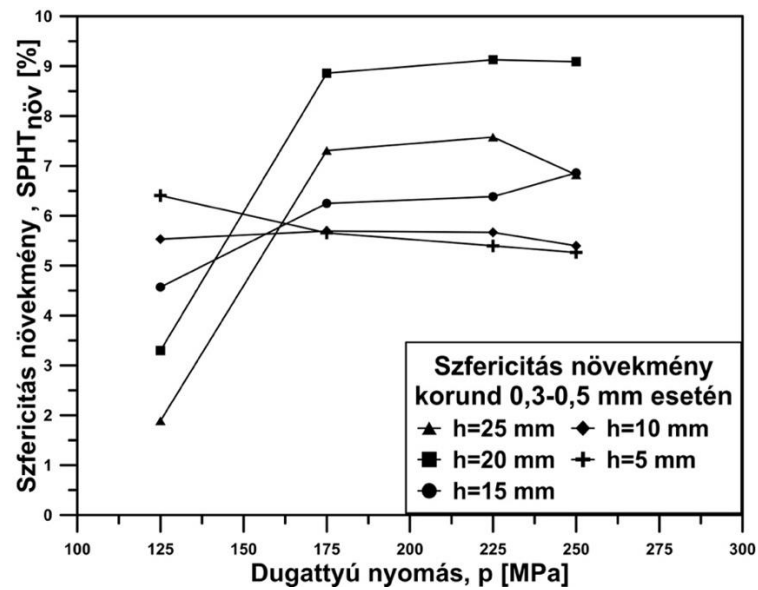
A 25. ábrán a legfinomabb vizsgált frakció szfericitás növekményei láthatóak különböző szemcseágyvastagság és dugattyúnyomás esetén. Látható, hogy minden egyes szemcseágyvastagság esetén, a magasabb dugattyúnyomás nagyobb szfericitás növekményhez vezetett, ezért minden függvény, bár változó mértékben, de folyamatosan növekvő értéket vesz fel a megvizsgált tartományban. Az 25, 20 és 15 mm-es szemcseágyvastagság esetén a megnövelt dugattyúnyomás, minden esetben magasabb

szemcse szfericitás növekményt eredményezett, míg az 10 és 5 mm-es szemcseágyvastagság esetén nagyon hasonló függvények rajzolódnak ki. A legmagasabb szemcse szfericitás növekmény a legvékonyabb szemcseágy és a legnagyobb dugattyúnyomás mellett jelentkezett a 0-0,15 mm-es korund frakció esetén. A 0,15-0,3 mm-es frakció analóg módon megvizsgált adatainak eredményeit a 26. ábra tartalmazza. A 125 és 175 MPa dugattyúnyomás intervallumban a görbemeredékség jelzi, hogy jelentősebb szfericitás növekmény jelentkezik ezen nyomástartományban minden vizsgált szemcseágynyomás mellett.



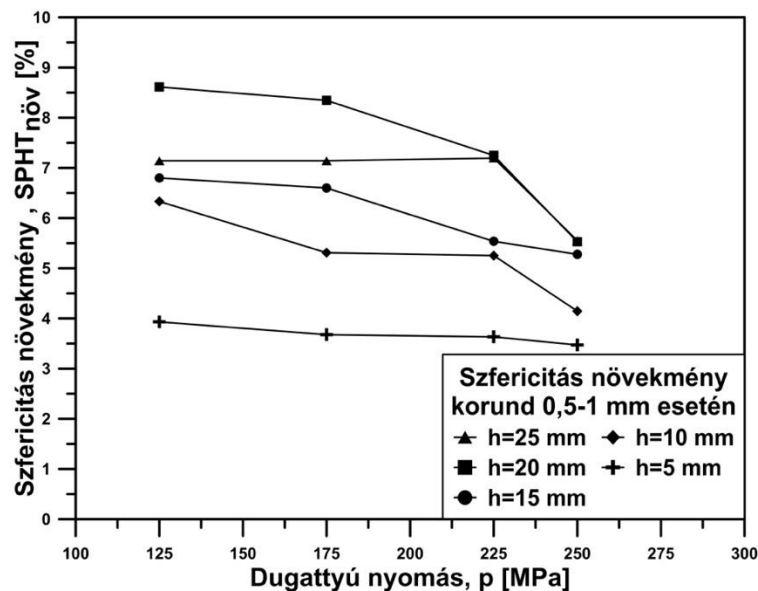
26. ábra Az alkalmazott szemcseágyvastagság és a dugattyúnyomás hatása a 0,15-0,3 mm-es frakció szfericitás növekményére

A további alkalmazott dugattyúnyomás értékekhez tartozó szemcse szfericitás növekmény, bár konstans emelkedő trendet mutat, annak üteme jóval elmarad az alacsonyabb dugattyúnyomás értékeknél tapasztalttól. A legmagasabb szfericitás növekmény, minden dugattyúnyomás érték esetén az 5 mm vastag szemcseágyhoz köthető. A következő vizsgált korund termékfrakció a 0,3-0,5 mm volt, amely esetben csak a 15 mm-es szemcseágy vezetett folyamatosan növekvő szemcse szfericitás növekményhez a teljes vizsgált dugattyúnyomás tartományban, amit a 27. ábra mutat be. Ennek ellenére, a legmagasabb szfericitás növekmény a 20 mm vastag szemcseágy esetén jött létre 225 MPa dugattyúnyomás mellett. Fontos látni, hogy a 0-0,15 és a 0,15-0,3 mm-es frakciók esetén a legvékonyabb szemcseágyhoz tartozó függvények a dugattyúnyomás növelésével folyamatosan emelkedő szemcse szfericitás növekményt mutattak, míg a 0,3-0,5 mm frakció esetén ez éppen ellentétesen alakul.



27. ábra Az alkalmazott szemcseágyvastagság és a dugattyúnyomás hatása a 0,3-0,5 mm-es frakció szfericitás növekményére

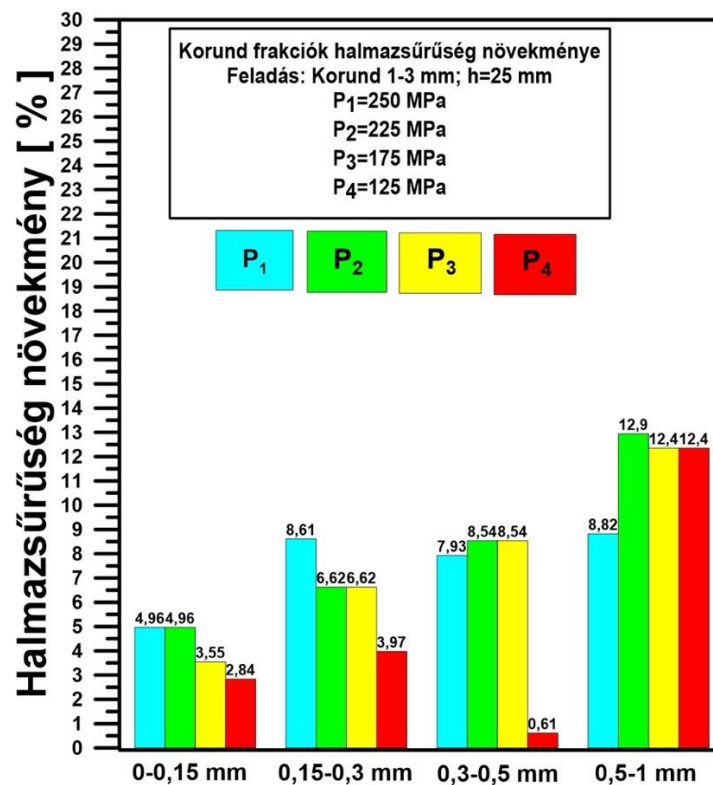
A 28. ábrán közölt 0,5-1 mm-es töretfrakció esetén a szfericitás növekmény minden megvizsgált szemcseágyvastagság alkalmazásával folyamatosan csökken a magasabb dugattyúnyomás értékek használatával, kivéve a 25 mm-es szemcseágyat, ahol a 125-225 MPa dugattyúnyomás intervallumban kvázi konstans értéket vesz fel, majd a dugattyúnyomás 250 MPa értékre emelésével szintén csökkenést mutat.



28. ábra Az alkalmazott szemcseágyvastagság és a dugattyúnyomás hatása a 0,5-1 mm-es frakció szfericitás növekményére

4.6. A nyomás és a szemcseágyvastagság hatása a termék halmazsűrűségére

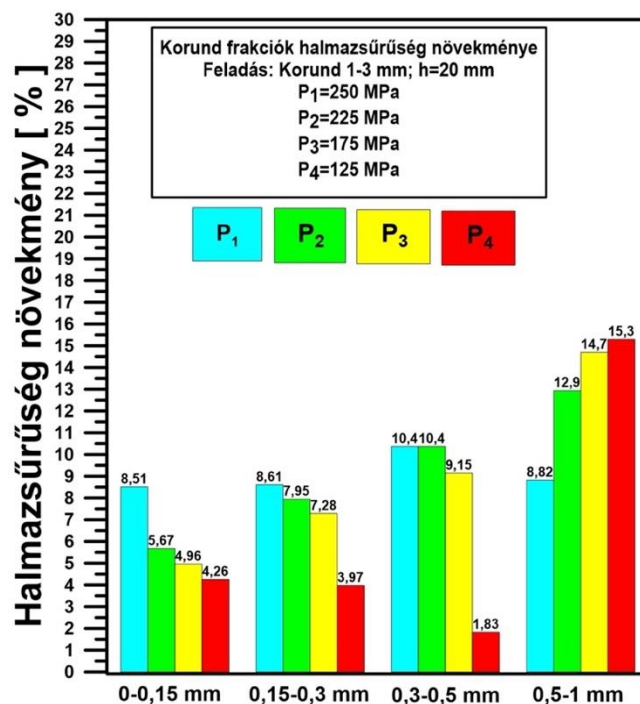
Az 4.5 fejezetben bemutattam az egyszemcsetörés kedvezőtlen hatásait a termék szemcséinek szfericitására, illetve a zárt szemcseágyas törési mód jóval kedvezőbb következményeit ugyanezen szemcsealakleíró paraméterre. Jelen fejezetben közölni fogom a zárt szemcseágyas aprítás hatását a töret frakcióinak halmazsűrűség változására. A 29. ábrán megfigyelhető, hogy a 25 mm vastag szemcseágy alkalmazása esetén, a legmarkánsabban a 0,5-1 mm frakció halmazsűrűség értékei emelkedtek meg, összehasonlítva az egyszemcse törésből nyert ugyanezen frakciókhoz képest, függetlenül az alkalmazott dugattyúnyomás nagyságától. A legnagyobb halmazsűrűség növekmény 12,9 %-kal a 225 MPa dugattyúnyomás esetén jelentkezett a legdurvább vizsgált frakciónál. Szintén látható, hogy a finomabb szemcsemérettartományokban a 0-0,15 és a 0,15-0,3 mm esetén a halmazsűrűség növekmény tendenciája, a nagyobb dugattyúnyomás esetén jobb eredményre vezet. Ennek ellenére mindössze 4,96 %-kal sikerült megemelnem a legfinomabb frakció halmazsűrűségét, még a legmagasabb dugattyúnyomás alkalmazása mellett is. A 0,3-0,5 mm frakció esetén nagyjából konstans halmazsűrűség növekményt értem el, ez alól kivételt képez a 125 MPa dugattyú nyomással létrehozott termék, ahol 1% alatti a növekmény.



29. ábra Az dugattyúnyomás hatása a halmazsűrűség növekménye esetén, 25 mm szemcseágyvastagság mellett

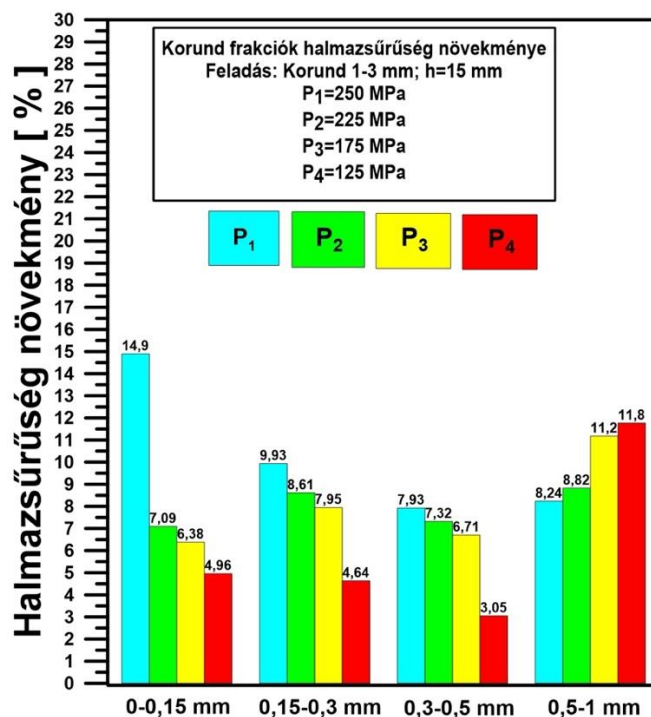
A 30. ábrán már a vékonyabb, 20 mm vastag szemcseágy mellett elért eredményeim figyelhetőek meg. Látható, hogy még ennél a szemcseágyvastagságnál is a legdurvább frakciónál adódtak a legmagasabb halmazsűrűség növekmények, ám itt már megfigyelhető a csökkenő tendencia a dugattyúnyomás növelése mellett. A 0-0,15 és a 0,15-0,3 mm frakcióknál azonban már egy ellentétes tendencia figyelhető meg, míg a 0,3-0,5 mm-es frakció esetén bár a tendencia hasonló, mint a két legfinomabb frakciónál, a 250 és 225 MPa dugattyúnyomás azonos halmazsűrűség növekedést eredményezett.

A 31. ábrán a 15 mm-es szemcseágyvastagság alkalmazása mellett elért eredményeim láthatóak, ahol a 0,5-1 mm-es frakció esetén továbbra is helytálló az a megállapítás, hogy a magasabb dugattyúnyomás alacsonyabb halmazsűrűség növekményhez vezet. Ahogyan a 20 úgy a 15 mm vastag szemcseágyak alkalmazása esetén is megfigyelhető, hogy a megnövelt dugattyúnyomás előnyösen befolyásolja a halmazsűrűség növekmény alakulását a két legfinomabb frakció esetén, ám ebben az esetben ez ugyanúgy igaznak bizonyult a 0,3-0,5 mm-es frakcióra is.



30. ábra Az dugattyúnyomás hatása a halmazsűrűség növekménye esetén, 20 mm szemcseágyvastagság mellett

A mérési eredmények ebben az esetben azt mutatták, hogy a legmagasabb halmazsűrűség növekmény már nem a legdurvább szemcsemérettartományban érhető el, hanem a legfinomabban, melyhez 250 MPa dugattyúnyomás szükséges.

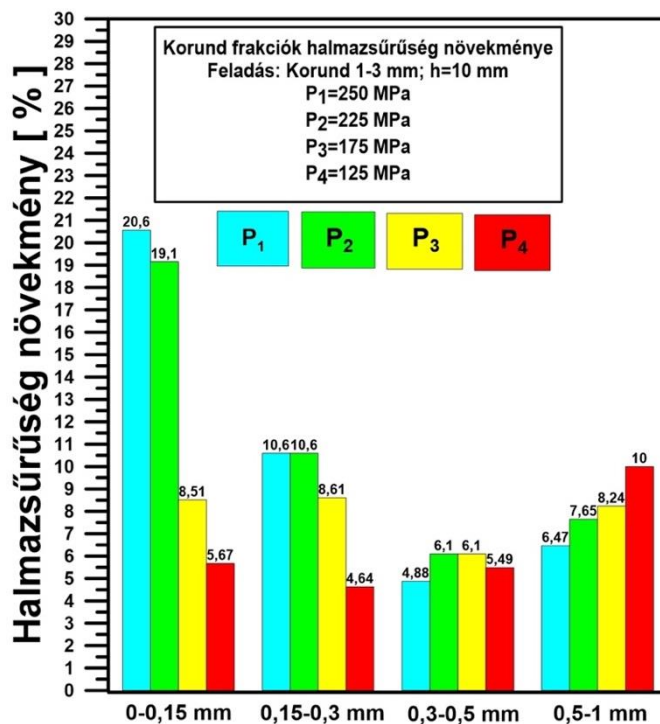


31.ábra Az dugattyúnyomás hatása a halmazsűrűség növekménye esetén, 15 mm szemcseágyvastagság mellett

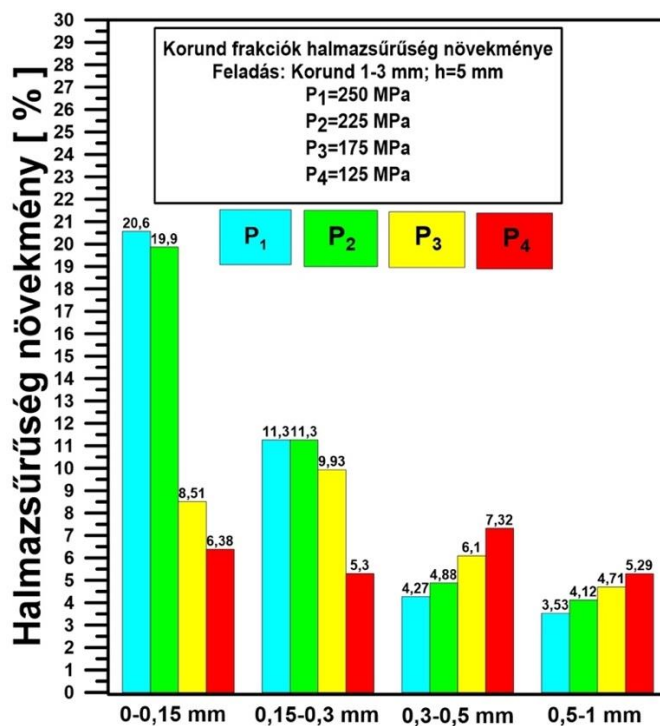
A szemcseágyvastagságot 10 mm-re csökkentve az látható, hogy szintén a legalacsonyabb szemcseméretű frakció esetén jelentkezett a legnagyobb halmazsűrűség növekmény, szám szerint 20,6 %. Szintén megfigyelhető a 32. ábrán, hogy ennél a frakciónál a dugattyúnyomás csökkenése jelentősen redukálja az elérhető halmazsűrűség növekmény értékét. A 0,5-1 mm-es frakció esetén, ahogy korábban már láthattuk a 15-20 mm szemcseágy alkalmazásakor, a csökkenő dugattyúnyomáshoz magasabb halmazsűrűség növekmények társulnak.

Tovább csökkentve a szemcseágyvastagságot, tekintettel a maximális feladási szemcseméretre mely 3 mm, az 5 mm-es szemcseágyvastagság alkalmazása már közelít az egyszemcse töréshez szükséges szemcse pozicionáláshoz, tehát a korábbi tapasztalatokon és eredményeimen alapuló várakozás szerint lemezes, tűs szemcsék képződése történne meg, ezzel csökkentve az elérhető halmazsűrűséget. Látható azonban a 33. ábrán, hogy minden esetben a bázisértéket biztosító egyszemcse töréshez viszonyított értékekhez képest, minden megvizsgált frakciónál történt halmazsűrűség növekedés. A legalacsonyabb halmazsűrűség növekmények a legdurvább, tehát a 0,5-1 mm-es frakció esetén adódtak, melynél továbbra is fennállt az az összefüggés, hogy a megemelt dugattyúnyomás csökkenti a halmazsűrűség növekményt. A legvékonyabb

szemcseágyat alkalmazva ez az összefüggés már a 0,3-0,5 mm-es korund termék frakció esetén is igaznak bizonyul.



32. ábra Az dugattyúnyomás hatása a halmazsűrűség növekménye esetén, 10 mm szemcseágyvastagság mellett

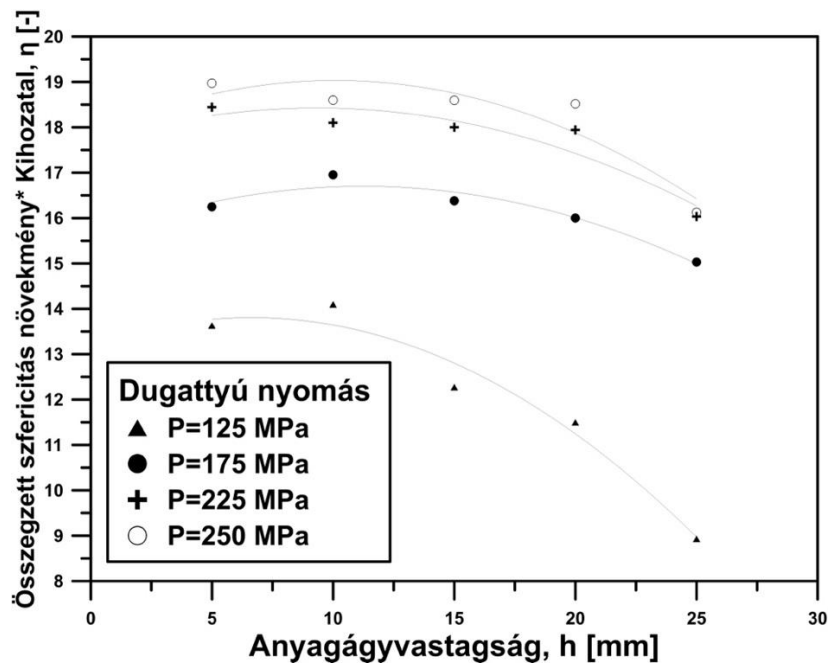


33. ábra Az dugattyúnyomás hatása a halmazsűrűség növekménye esetén, 5 mm szemcseágyvastagság mellett

A legfinomabb frakciót szemügyre véve az látható, hogy az elérhető halmazsűrűség növekedés – dugattyúnyomás relációja megfordul, mivel a nagyobb dugattyúnyomás értékek magasabb halmazsűrűség növekedést eredményeztek a 0-0,15 mm-es frakció.

4.7. A zárt szemcseágyas törési mód hatékonyságának bemutatása a szfericitás növekmény és kihozatal mérőszámainak segítségével

Mint minden folyamat eredményeképpen létrejött termék esetén, úgy ebben az esetben is nem csak minőségi, de mennyiségi paramétereket is figyelembe kell venni mikor a zárt szemcseágyas őrlési mód hatékonyságát kell számszerűsíteni. Ezért ebben a fejezetben bemutatom a dugattyúnyomás és az alkalmazott szemcseágyvastagság hatásait a keletkezett <1 mm termékek kihozatalaival súlyozott szemcse szfericitás η mérőszámának segítségével. A 34. ábrán megfigyelhető, hogy legnagyobb mértékű η változás a legkisebb, 125 MPa dugattyúnyomás alkalmazása mellett jelentkezik, tehát ennél a nyomásnál még nagyon érzékeny a folyamat a szemcseágyvastagság változására. A dugattyú nyomás növelésével a szemcseágyvastagság hatásának mértéke csökken. A 34. ábrára tekintve jól látható továbbá, hogy bármely szemcseágyvastagságot vesszük is figyelembe, nagyobb dugattyúnyomás mellett nagyobb η érték érhető el. A legnagyobb η érték az 5-15 mm-es szemcseágyvastagság és a 225-250 MPa dugattyúnyomás alkalmazásával jött létre, de a szemcseágyvastagság 20 mm-ig terjedő növelése sem eredményezett jelentős hatékonyság csökkenést ebben a nyomásintervallumban.



34. ábra A dugattyúnyomás és a szemcseágyvastagság hatásainak értékelése a keletkezett termékek összegzett szfericitás növekményéből és a kihozatalból képzett mérőszámon keresztül

4.8. A statikus szemcseágy összenyomási eredmények átfogó értékelése

Miután megvizsgáltam a korund 1-3 mm-es frakció feladásából zárt szemcseágyas aprítással előállított termékeinek a szemcseméret-eloszlását és az ahhoz köthető mérőszámokat, szemcse szfericitás növekményét, halmazsűrűség növekményét és η értékét különböző függvénykapcsolatok segítségével, az alábbi megállapításokat teszem:

Meghatároztam a különböző korund termékfrakciók esetén a szemcsealakleíró paraméterek (b/l és SPHT) és a halmazsűrűség közötti összefüggéseket. Meghatároztam a termékfrakciókra jellemző átlagos szfericitás érték és a halmazsűrűség értékek közötti függvény kapcsolatokat, bebizonyítva, hogy a szűken frakcionált mintaanyagaim halmazsűrűségével a termékek SPHT értékei szorosabb összefüggésben állnak, mint a b/l esetén.

A 10, 50 és 90%-os szemcseméretén alapuló aprítási fokokat megvizsgálva a legvékonyabb, tehát az 5 mm-es szemcseágy vezetett a legmagasabb aprítási fokra. Emellett, bármely a megvizsgált szemcseágyvastagságok közül, magasabb aprítási fokot eredményezett, nagyobb dugattyúnyomás alkalmazása esetén.

Megállapítottam, hogy a kompressziós statikus zárt szemcseágyas aprítás során a szemcseágy vastagsággal és az alkalmazott nyomással a töretből előállított szűk szemcseméretfrakciókra jellemző átlagos szemcsealak és ezen keresztül az adott frakció átlagos szfericitása és halmazsűrűsége szabályozható, bizonyítva az első munkahipotézisem helyességét.

Megállapítottam, hogy a statikus zárt szemcseágyas aprítás során, az ideális szemcseágyvastagságtól alacsonyabb szemcseágyvastagság esetén, egy olyan hatékony aprítási mód érhető el, ahol a törési folyamat során keletkező termék szemcsék alakjának következtében nő a frakcionált termékek halmazsűrűsége az egyszemcse igénybevétellel előállított korund termékekhez képest.

A statikus zárt szemcseágyas aprítási kísérleteim során kimutattam, hogy a nem ideális szemcseágyvastagságú (az egyszemcse és az ideális szemcseágyas aprítás között elérhető) tranziens törési módszer, a szemcseágy vastagság és nyomás függvényében, más-más szemcseméretű termékfrakciók szemcse szfericitása és ezáltal halmazsűrűsége növelhető meg.

Az elérhető tudományos eredmények és a saját vizsgálati eredményeim alapján együttesen arra lehet következtetni, hogy a statikus zárt szemcseágyas aprítás alkalmas az <1 mm-től

kisebb szemcseméretű szűken osztályozott korundfrakciók aprítással párhuzamosan kivitelezett szemcsealakformálásán keresztül azok halmazsűrűségének megemelésére, mely a következő folyamatoknak köszönhető:

1. A szemcseágyban a kompressziós terhelés hatására meginduló szemcserendeződés a szemcsék felületét a kontaktpontokban koptatja, ezzel emelve azok szfericitását.
2. Párhuzamosan az (1) folyamattal is bekövetkezik, de jellemzően ezt követően (a nyomás emelkedésével) kerül sor a szemcseágy szemcséinek olyan mértékű nyomás alá kerülésére, mely után azok már nem tudnak helyet változtatni a szemcseágyban, bennük a terhelés hatására repedések indulnak meg és bekövetkezik a legkisebb törési szilárdságú, tehát a legnagyobb méretű szemcsék tönkremenetele. A törések következtében, további szemcsediszlokáció és jobb térkitöltés jön létre a szemcseágyban, csökken az átlagos szemcseméret, nő a fajlagos felület, mely nagyobb felületen végbemenő súrlódáshoz vezet a kompakció során, ami újfent kedvezni fog a szemcsealakformálásnak.

Látható, hogy bármely kompakciós állapotban a szomszédos szemcsék egymásra továbbítják a kompakciós terhelést, ezzel megvalósítva a Briggs és Evertsson (1998) szerinti, (multi point loading) több pontú terhelés esetét, mely a folyamatos szemcse-szemcse felületen végbemenő súrlódás mellett, szintén kedvező blokkos kubikus szemalakra vezet. Fontos megjegyezni, hogy a szemcsealakból kifolyólag bármely szemcseágyban elhelyezkedő azonos méretű szemcse közül, a szabálytalan szemcsealakú, hosszúkas-lemezes és tűszerű szemcsék fognak először törést szenvedni, mert ezek törési szilárdsága kisebb, mint a szabályos szemcsealakú társaiké (5.ábra), mely ismételten kedvez a magasabb halmazsűrűség kialakulásának a töretszemcsék esetén.

Az η mérőszám bevezetésével kimutattam, hogy a <1 mm-től kisebb szemcseméretű szűken osztályozott korundfrakciók mennyiségét és szfericitás növekedését figyelembevéve, a leghatékonyabb vizsgált előállítási mód az 5 mm vastag szemcseágyhoz és a 250 MPa dugattyúnyomáshoz köthető kompressziós zárt szemcseágyas aprítás esetén.

5. Félüzemi méretű HPGR berendezés fejlesztése és mérési eredményeinek bemutatása

Az alacsony igénybevételi sebességű, kompresszió alapuló szemcseágyas törési mechanizmus vizsgálata során az I.M. fejezetben bemutatott, saját fejlesztésű, félüzemi méretű HPGR berendezést használtam. A fejlesztett berendezéssel megvalósíthatóvá vált a folyamatos üzemű alacsony igénybevételi sebességű, kompressziós igénybevételű zárt szemcseágyas aprítás a rendkívüli mechanikai tulajdonságokkal bíró korund esetén. Ennek

köszönhetően szisztematikusan vizsgálhattam meg a különböző üzemeltetési és igénybevételi paraméterek termék tulajdonságfüggvényeire gyakorolt hatását, ezzel össze kötve a két fő tudományos célkitűzésemet melyeket a 3.1. fejezetben bemutattem. A berendezésfejlesztés és tervezés során természetesen felhasználtam a 4. fejezetben közölt eredményeimet.

5.1. Kísérleti és kiértékelési módszerek

A folyamatosüzemű kompressziós igénybevételen alapuló szemcseágyas aprítást az I.M. fejezetben bemutatott félüzemi méretű, saját fejlesztésű HPGR berendezéssel végeztem el, amihez 1-3 mm-es korundfrakciót használtam feladási modellanyagként. A feladási modellanyag a törési vizsgálatokhoz a 3.3. fejezetben bemutatott módszer szerinti lineáris síkszítán került előkészítésre. A nyitott folyamatos aprítás közben létrejött, 0-1 mm-es szemcsemérettartományba letört, lemezes és tűszerű korund szemcsék alacsony halmazsűrűségű frakciókat eredményeztek, mivel főleg egyszemcsetöréssel jöttek létre, valamint a szemcse-szfericitásuk is alacsonynak adódik, melyet a korábban közölt 4. táblázat mutat be. Ezek a frakciók és a szfericitási ($SPHT_0$) valamint halmazsűrűségi értékeik (ρ_{halm0}) szolgáltak bázisértéknek a későbbi összehasonlító vizsgálataim és kiértékelési módszeraim során. A szemcsealak vizsgálathoz az I.M. fejezetben bemutatott Camsizer X2 berendezést használtam, az ott közölt beállításokkal. Továbbá a vizuális megerősítést segítik a ZEISS optikai mikroszkópos felvételeim. A mérésekből származó adatok kiértékelésekor az alábbi függvénykapcsolatokat vizsgáltam meg:

- $F(x)=f(x)$
- $K=f(P_{spec}, V_{ker})$
- $SPHT_{nö} = f(P_{spec} \text{ és } V_{ker})$
- $\rho_{halm, nö} = f(P_{spec} \text{ és } V_{ker})$
- $SPHT = f(\rho_{halm})$
- $\Sigma SPHT_{nö} = f(P_{spec} \text{ és } V_{ker})$
- $\Sigma \rho_{halm, nö} = f(P_{spec} \text{ és } V_{ker})$
- $\eta = f(P_{spec} \text{ és } V_{ker})$
- $\Omega = f(P_{spec} \text{ és } V_{ker})$

ahol:

$F(x)$: Kumulatív szemcseméret-eloszlás [%]

K: 0-1 mm termékek tömegkihozatala [%]

k: 0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5; 0,5-1 frakciók tömegkihozatala

P_{spec} : Fajlagos hengerpalást nyomás [MPa]

V_{ker} : A HPGR berendezés palástjainak kerületi sebessége

SPHT: Adott feladási vagy termékfrakció szfericitása [-]

ρ_{halm} : Adott feladási vagy termékfrakció halmazsűrűsége [g/cm³]

SPHT_{növ}: Adott termékfrakció szfericitás növekménye [%]

$\rho_{halm,növ}$: Adott termékfrakció halmazsűrűség növekménye [%]

Σ SPHT_{növ}: 0-1 mm-es termék összegzett szfericitás növekménye [%]

$\Sigma\rho_{halm,növ}$: 0-1 mm-es termék összegzett halmazsűrűség növekménye [%]

η : Törést és szemcse alakformálást jellemző hatékonysági mérőszám [-]

Ω : Törést és szemcse alakformálást jellemző hatékonysági mérőszám adott termékfrakció esetén [-]

A 4.1 fejezetben korábban már közöltem, a szemcse szfericitás mint szemcsealakot leíró paraméter kiválasztásának az okát, a szemcsealak-halmazsűrűség relációjának vizsgálatához. Eszerint jártam el a jelen kísérletrendszerből nyert adathalmaz kiértékelése során is, illetve a 4.1.1; 4.1.3; 4.1.4 és 4.1.5. képlet szerint meghatározott mérőszámokat ezen fejezetben is felhasználtam. Bevezettem továbbá az 5.1.1. képlet szerint számított Ω mérőszámot is. Az Ω mérőszám meghatározásának szükségessége mögött az fizikai tény áll, hogy a különböző igénybevételi paraméterek hatására a lassú kompressziós igénybevétel során a HPGR berendezésben a különböző szemcseméretű termékfrakciók más-más terméktulajdonság függvényekkel állíthatók elő. A különböző igénybevételi paraméterek és a létrehozott termékfrakciók közötti kapcsolat leírására szolgál az Ω érték.

$$\Omega = \frac{(SPHT_{növ} \times k)}{100} \quad 5.1.1.$$

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

A folyamatos üzemű szemcseágy aprítási kísérletek HPGR berendezésben történő lefolytatásakor megvizsgáltam a 6,88; 12,19; 15,63 és a 20,31 MPa fajlagos hengerpalást nyomások hatásait 72, 108 és 143 mm/s HPGR palás kerületi sebességek esetén a keletkezett töretek diszperzitási tulajdonságaira. A 4.7 és 4.8. fejezetben részletesen kifejtettem, hogy miért optimális az 5-15 mm vastag szemcseágy alkalmazása 1-3 mm-es korund feladás esetén a kompressziós igénybevételen alapuló zárt szemcseágyas aprítás során szakaszos üzemben, ezért már a berendezés fejlesztést is úgy folytattam le, hogy ebben a szemcseágyvastagság tartományban lehessen üzemeltetni a HPGR-t, elkerülve annak felesleges túlméretezését. A fentebb közölt vizsgálati hengerpalást

nyomásértékekből is látszik, hogy ezt az elvet a hidraulikai és pneumatikus támasztórendszer méretezésénél és tervezésénél is figyelembe vettem. A mérések alatt minden beállítási paraméter esetén a feladás 1-3 mm-es korundfrakció volt, tehát soha nem történt ismételt igénybevétel egyik termék esetén sem a HPGR berendezésben. Minden mérési beállítás alkalmazása során dinamikus egyensúlyi állapotban történt a vizsgálat és a mintavételezés is. Ennek relevanciáját a berendezés működési elvében kell keresni, mert fontos a tömött feladási mód biztosítása a megfelelő dinamikus egyensúly létrejöttéhez és fenttartásához a szemcseágy és a hengerpalástok között, amit a hidraulikai és pneumatikai rendszer biztosít. Az aprítási kísérletek során a berendezésen beállítottam a kezdő résméretet, mely minden esetben 2 mm volt, illetve a hidraulikai kezdőnyomás értékét is, valamint frekvenciaváltó segítségével a hengerpalástok kerületi sebességét. Lézeres fordulatszám mérő berendezéssel az aprítókísérletek során ellenőriztem a $V_{ker}=72-143$ mm/s mérési tartományban a maximális eltérést a dolgozatban használt értékektől, mely minden esetben 3 % alatti volt. Az aprítási kísérleteim során, az 1-3 mm-es korund feladás, a 2 mm-es kezdeti résméretet, a részbe behúzott szemcsék tömörítésének és egyidejű aprításának következtében a HPGR hengerpalástot megtámasztó erővel szemben megnyitotta, majd kialakult a dinamikus egyensúlyi állapotot. Az eltérő három V_{ker} és négy P_{spec} üzemparaméter 12 darab mérést eredményezett, melyek mindegyikénél gond nélkül kialakult a szükséges $s=5$ mm-es résméret, tehát az 5 mm-es szemcseágy vastagság is. Ennek ellenőrzésére egy mm skálát használtam, ami a dugattyúszáron került elhelyezésre, melyet szemmel olvastam el. Az 5 mm-től nagyobb résméret kialakulását mechanikus támasztással akadályoztam meg. A dinamikus egyensúlyi helyzet kialakulása után minden mérési beállításhoz tartozó termékből minimum 5 kg mintát vettem, illetve leolvastam a nyomásmérőről a kialakult, a mérés előtti beállított hidraulikus nyomástól értelemszerűen magasabb értéket, melyet a 5. táblázatban összesítettem. A P_{spec} fajlagos hengerpalást nyomást az 5.1.2. képlettel számítottam ki, mely esetben a maximális 100 kN nyomóerőhöz 160 bar hidraulikus nyomás tartozott, ami $P_{spec} = 25$ MPa értéknek felelt meg. A hidraulikus kezdőnyomás tehát mérés előtt beállított, a hidraulikus kör nyomása 5 mm szemcseágnál leolvasott, a P_{spec} pedig számított érték.

$$P_{spec} = \frac{F_{max}}{D_0 \times L_0} = \frac{100 \text{ kN}}{200 \times 20} = 25 \text{ MPa} \quad 5.1.2.$$

Hidraulikus kör kezdőnyomás [bar]	Hidraulikus kör nyomása s=5 mm résméretnél [bar]	P _{spec} [MPa]
109	130	20,31
87	100	15,63
70	78	12,19
41	44	6,88

5. táblázat A hidraulikus körön beállított kezdőnyomás hatására ébredő különböző nyomásértékek

A méréseim alkalmával a dinamikus egyensúlyi helyzetek kialakulása alatt kapacitást is mértem, melynek során megmértem, hogy adott idő alatt mekkora tömegáramú korundszemcse halad át a berendezésen. A Schönert és Lubjuhn (1990) által javasolt 5.1.3. képlet széleskörűen elfogadott módszer a HPGR berendezések kapacitásának számítására, melyet átrendezve meghatároztam a termékek halmazsűrűségét az 5.1.4. képlet szerint.

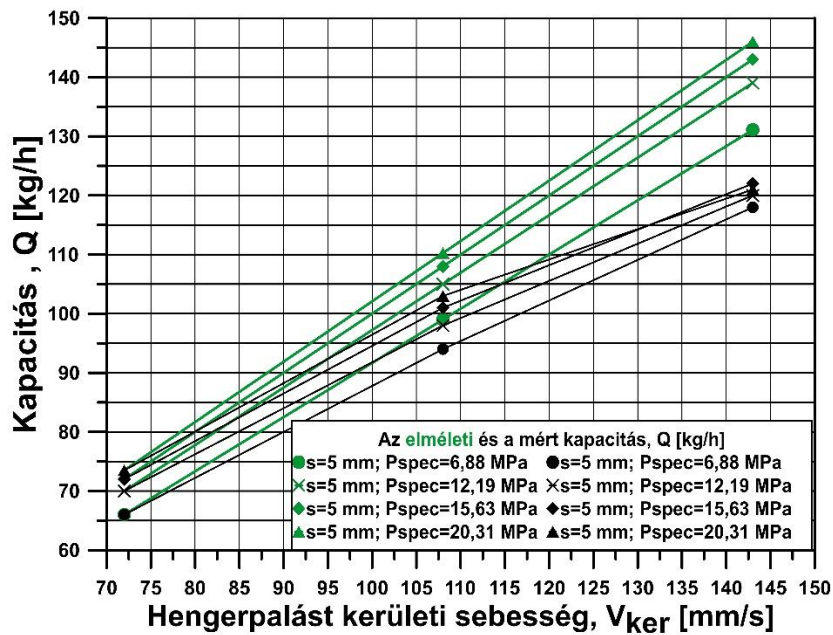
$$Q = \rho_t \times X_g \times v \times L \times 3,6 = \rho_t \times 5 \times 0,072 \times 0,02 \times 3,6 = 73,5 \text{ kg/h} \quad 5.1.3.$$

$$\rho_t = \frac{Q}{X_g \times v \times L \times 3,6} \quad 5.1.4.$$

, ahol: ρ_t a termék halmazsűrűsége, Q a tömegáram vagyis a mért kapacitás, X_g a résméret, v a hengerpalást kerületi sebessége, L a hengerszélesség.

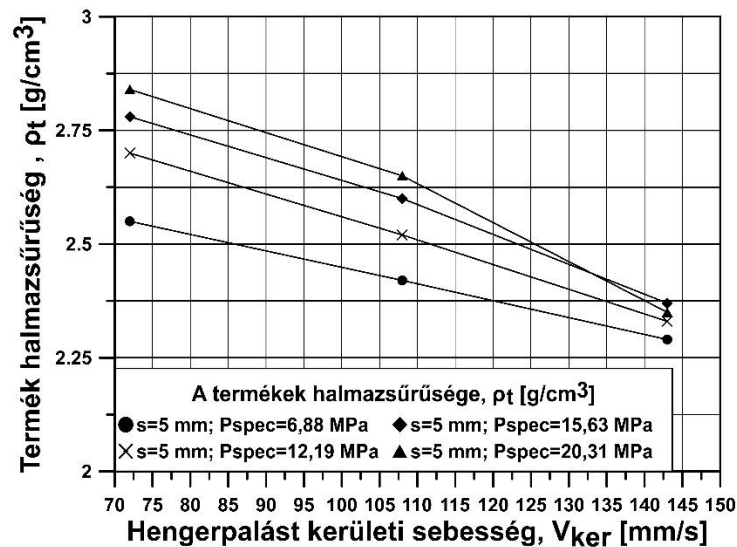
A termék halmazsűrűségének meghatározása azért rendkívül fontos, mert a 12 különböző mérési beállítás során 12 különböző mértékű szemcseágy tömörödés jött létre a hengerrés hatózónájában. Figyelembe véve, hogy az 5.1.4. egyenletben csak az Q értéke, tehát a mért kapacitás változott meg, kijelenthető, hogy a csökkent kapacitás az alacsonyabb mértékű kompresszió és az ebből eredő alacsonyabb termék halmazsűrűség következtében alakul ki.

A 35. ábrán egyértelmű trend látható, hogy $V_{ker} = 72$ és 108 mm/s esetén a magasabb fajlagos hengerpalást nyomással magasabb kompakció érhető el, ami magasabb kapacitást eredményezett. Megfigyelhető továbbá, hogy a V_{ker} növelésével minden alkalmazott P_{spec} esetén növekszik az M értéke is, ám nem olyan ütemben, mint azt várnánk.



35. ábra A hengerpalást kerületi sebesség és fajlagos hengerpalást nyomás hatása a HPGR kapacitására

A zölddel jelölt görbék azt mutatják, hogy $V_{ker}=72$ mm/s alkalmazásával elért Q értékek a $V_{ker}=108$ majd 143 mm/s-re növelésével aránytalanul kisebb ütemben növekedtek, mint az várható lett volna a V_{ker} 1,5 majd közel 2-szeres értékre növelése esetén. A 36. ábrán látható eredmények segítenek jobban megérteni a 35. ábrán bemutatott kapacitás csökkenést és annak okait, mivel a V_{ker} növelésével drasztikusan csökken a termékek halmazsűrűsége, ezzel arányosan csökkentve a berendezés feldolgozó képességét.



36. ábra A hengerpalást kerületi sebesség és fajlagos hengerpalást nyomás hatása a HPGR termékeinek halmazsűrűségére

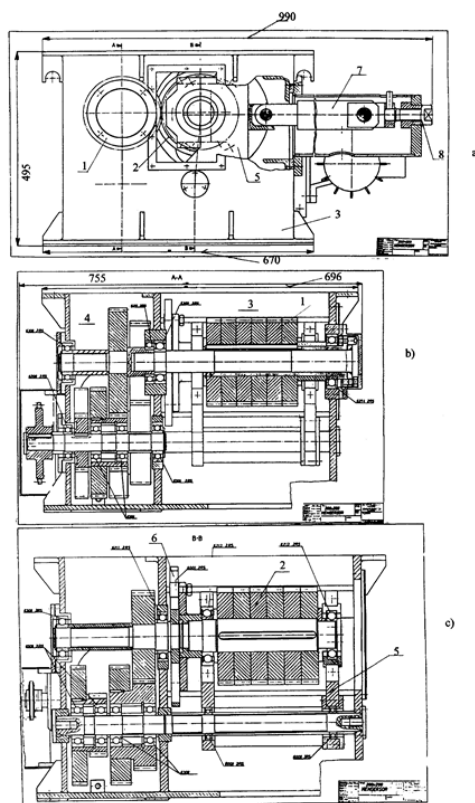
Érdemes megfigyelni, hogy a V_{ker} növelésével csökken az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomásból eredő eltérés a termék kompaktóját és ezért annak halmazsűrűségét illetően. Miután bemutattam, hogy a fejlesztett HPGR berendezéssel milyen megfontolásokon alapuló szempontokat kellett szem előtt tartanom a szisztematikusan felépített kísérletsorozat során, a következő 5.2. fejezetben bemutatom hogyan jutottam el odáig, hogy a jelen fejezetben közölt kísérletek megvalósíthatóvá váltak.

5.2. Berendezésfejlesztés

A Miskolci Egyetem és a Paderborni Egyetem 1998-as közös EU-s kutatási program keretében történt fejlesztései során megépítésre került egy kísérleti hengeres kompaktáló berendezés a projektben definiált szűrőpor kompaktálására. A kísérletekhez 10 μm alatti szemcseméretű bentonitot használtak. A doktori kutatómunkám során a berendezés vázszerkezetének robosztus kivitelezése és masszív gépészeti kialakítása miatt ezt a berendezést építettem át a 3.1. fejezetben ismertetett tudományos céljaim eléréséhez.

A kiindulási préshenger berendezés bemutatása

A rendszerben a kompaktálást 200 mm átmérőjű és 80...200 mm között változtatható szélességű egymással szemben forgó préshenger-pár végzi. A kísérleti préshenger gépészeti rajzát a 37. ábra szemlélteti.



37. ábra A hengerprés kialakítása (PAFOG98 jelentés)

A prérshenger-pár, amelyből az egyiknek (1) a tengelye fix telepítésű, a másiké (2) elmozdulhat, egy kettéosztott házba (3) van beépítve; a ház másik részében a fogaskerék hajtómű (4) helyezkedik el. Az elmozduló prérshenger tengelye egy rögzített tengely körül elforduló himbába (5) van beépítve. A hajtómű és az elmozduló henger tengelye közötti kapcsolatot Oldham-tengelykapcsoló biztosítja. A hengerek forgatása lánchajtáson keresztül hidromotorral történik. Az elmozduló hengert hidraulikus dugattyú (7) támasztja meg, a prérshengerek közötti üresjárat-résméret a hidraulikus hengerhez kapcsolódó végcsavarral (8) állítható be.

A kiindulási prérshenger főbb műszaki jellemzői:

- Prérshenger átmérője és szélessége: $D_0=200$ mm; $L_0=80 \dots 200$ mm
- Tengelyátmérő: 50, ill. 65 mm
- Csapágyszélesség: = Fix-henger: 24 mm (6214 2RS), 26 mm (6309 2RS)
= Elmozduló henger: 24 mm (6214 2RS)
- Hajtás jellemzői:
 - = Hidromotor: $P = 11,5$ kW; $n_{\max} = 2700$ min⁻¹, $q_{\max} = 32$ cm³/min
 - = Lánchajtás és fogaskerék hajtómű áttétel: 3; 8
- Hidraulikus egység:
 - =Támasztóhenger átmérője: $d_{\text{Cyl}} = 90$ mm
 - =Maximális hidraulikus nyomás: $p_{\text{Hydr,max}} = 160$ bar
- Technológiai jellemzők:
 - =Maximális nyomóerő: $F_{0\max} = 100$ kN
 - =Maximális nyomaték: $M_{\max} = 1000$ Nm
 - =Kapacitás: $Q = 1,8$ t/h ($L_0=80$ mm)
 - (Résméret = 4 mm, palást kerületi sebesség = 1,5 m/s esetén a tömegáram = 4,8 t/h ($B=200$ mm) és a kísérletben használt finom bentonit esetében.

A fenti adatokból, meghatároztam a hengerprés fajlagos hengerpalást nyomását (P_{0spec}), a tömörítési szögét (α), illetve a maximális szemcseágy nyomás értékét (P_{0max}), hogy ellenőrizhessem azok megfelelőségét:

$$P_{0spec} = \frac{F_{0max}}{D_0 \times L_0} = \frac{100 \text{ kN}}{200 \times 80} = 6,25 \text{ MPa} \quad 5.2.1.$$

ahol: P_{0spec} a hengerprés fajlagos hengerpalást nyomása, F_{0max} a hengerprés hidraulikus dugattyújának maximális nyomóereje, D_0 és L_0 a hengerpalástok kiindulási átmérője és hossza.

Ez az érték afelett a nyomástartomány felett foglal helyet, ahol a legnevesebb, komoly gyártási tapasztalattal rendelkező HPGR gyártók berendezéseinek fajlagos palástnyomása található. Példaként megemlítem a Metso HRC8 és HRC 800-as modelljeit 2,5 és 4,5 MPa, ThyssenKrupp Polysius 2-5 MPa. Nem szabad azonban megfeledkezni róla, hogy a mintaanyagom egy nagyon kemény, koptató és ridegen törő anyag, rendkívüli mechanikai szilárdsággal, ezért szükségem volt ezen érték megnövelésére. Látni kell azt is, hogy Pedrosa és társai (2019) állítása szerint nincs tudomásuk arról, hogy bárhol a világon HPGR berendezést alkalmaznának korundaprításra. Szeretném megemlíteni, hogy bár számos korundgyártó üzem gyártási technológiáját megtekinthettem már szakmai életutam során, illetve a Metso, Köppern és ThyssenKrupp Polysius munkatársaival is folytattam egyeztetéseket, ezek mind-mind arra engedtek következtetni, hogy jelenleg semelyik vállalat nem alkalmaz HPGR berendezést korundaprításra. Mindezekről függetlenül tisztában kell lenni azzal az iparágban bevett gyakorlattal, miszerint sok esetben nem, hogy nem publikálnak eredményeket, de még szabadalmaztatás alá sem vonnak újfejlesztésű technológiákat, melynek részét képezhetik a HPGR berendezések, mert nem céljuk ezzel versenyelőnyhöz juttatni a konkurens gyártókat, megadva ezzel nekik azt az előnyt, hogy milyen vonalon induljanak el saját kutatásaikkal.

A P_{0max} maximális szemcseágy nyomás értékének számításához elengedhetetlen a tömörítési szög ismerete, mert ez határozza meg azt a térfogatot, ahol az feladott szemcseágyat igénybevétele éri és az $\alpha=0$ értéknél a P_{0max} jelentkezik. Az α tömörítési szög tisztán geometriai és a feladott anyag halmazsűrűségéből és annak növekményéből meghatározható az alkalmazott részméret és a hengerátmérők arányából a következő képlettel Klymowsky és társai (2002) szerint, melyhez a 4. fejezetben közölt eredményeim alapján 5 mm-es részméretet választottam, hogy az 5 mm-es szemcseágyvastagságot létre tudjam hozni a hengerek között:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(1 - \left(\frac{\rho_t}{\rho_f} - 1 \right) \times \left(\frac{X_g}{1000 \times D} \right) \right) = \cos^{-1} \left(1 - \left(\frac{2,1}{1,83} - 1 \right) \times \left(\frac{5}{1000 \times 0,2} \right) \right) = 0,0859 \text{ Radián}$$

5.2.2

, ahol: α a tömörítési szög, ρ_t a termék halmazsűrűsége, ρ_f a feladás halmazsűrűsége, X_g a résméret, D a henger átmérője.

A tömörítési szög számítása során kapott 0,0859 radián érték 4,92 fokkal egyenlő, tehát $\alpha=4,92$. A kapott tömörítési szög értékét felhasználva már megtudtam határozni a szemcseágyban ébredő P_{0max} nyomás értékét az alábbi képlet szerint melyet Saramak és Naziemiec (2013), szerint a következőképp lehet számítani:

$$P_{0max} = \frac{F_{0max}}{D_0 \times L_0 \times \pi \times \frac{\alpha}{360}} = \frac{100 \text{ kN}}{200 \times 80 \times \pi \times \frac{4,92}{360}} = 145,64 \text{ MPa} \quad 5.2.3.$$

ahol: F_{max0} a maximális nyomóerő, D_0 és L_0 a hengerpalástok kiindulási átmérője és hossza, α a tömörítési szög.

Figyelembevéve a kapott $P_{0max}=145,64$ MPa értéket, és a korábbi kutatómunkám során meghatározott 125-250 MPa ideális szemcseágynyomás intervallumot, mely kedvező eredményeket biztosított a termékekre nézve a P_{0max} értékének növelése vált szükségessé P_{1max} értékre.

A fejlesztett HPGR berendezés bemutatása

Az elvégzett módosításaim után a következő berendezésre jellemző technikai adatok adódtak:

- Henger átmérője és **szélessége**: $D_0=200$ mm; $L_0=20$
- Tengelyátmérő: 50 mm
- Csapágyszélesség: = Fix-henger: 24 mm (6214 2RS), 26 mm (6309 2RS)
= Elmozduló henger: 24 mm (6214 2RS)
- Hajtás jellemzői:
 - = **Hajtómotor: $P = 2,2$ kW; $n_{max} = 1420 \text{ min}^{-1}$,**
 - = **Redukált maximális fordulatszám (hajtott tengely) = 17 min^{-1} ,**
- Hidraulikus egység:
 - =Támasztóhenger átmérője: $d_{cyl} = 90$ mm

=Maximális hidraulikus nyomás: $p_{\text{Hydr,max}} = 160 \text{ bar}$

- Technológiai jellemzők:

=Maximális nyomóerő: $F_{0\text{max}} = 100 \text{ kN}$

=Maximális nyomaték: $M_{\text{max}} = 1000 \text{ Nm}$

=Maximális gyakorlati kapacitás: **0,122 t/h, ha ($L_0=20 \text{ mm}$)**

Résméret = 5 mm, palást kerületi sebesség = 0,143 m/s.

Az elvégzett módosításokat az alábbi számítások alapján eszközöltem:

$$P_{1\text{spec}} = \frac{F_{\text{max}1}}{D_1 \times L_1} = \frac{100 \text{ kN}}{200 \times 20} = 25 \text{ MPa.} \quad 5.2.4.$$

, ahol: $P_{1\text{spec}}$ az átalakított berendezés fajlagos nyomásértéke, $F_{\text{max}1}$ a maximális nyomóerő, D_1 és L_1 a hengerpalástok új átmérője és hossza.

Bár a fajlagos nyomás értéke az átalakítással jelentősen meghaladta az iparban jellemző 2-5 MPa értékeket, a következő $P_{1\text{max}}$ legmagasabb szemcseágy nyomás számítása mutatja, hogy erre szükség volt.

$$P_{1\text{max}} = \frac{F_{\text{max}1}}{D_1 \times L_1 \times \pi \times \frac{\alpha}{360}} = \frac{100 \text{ kN}}{200 \times 20 \times \pi \times \frac{9,53}{360}} = 300 \text{ MPa} \quad 5.2.5.$$

, ahol: $F_{\text{max}1}$ a maximális nyomóerő, D_1 és L_1 a hengerpalástok új átmérője és hossza, α a tömörítési szög mely a 5.2.2. egyenlettel a nagyobb elérhető ρ_t termék halmazsűrűség (2,84 g/cm³) következtében 9,53 értéknek adódott. A számított $P_{1\text{max}}$ érték már megfelelő mozgásteret biztosított, hogy a 125-250 MPa szemcseágynyomás tartományában és akár felette is folyamatos üzemű méréseket folytassak le.

Ezen módosítások mellett, a berendezésfejlesztés során megoldottam, hogy a zárt szemcseágyas aprítás a hengerpalástokon folyamatos üzemben kivitelezhető legyen, és az alkalmazott hengerpalást nyomás ellenére a szemcsék behúzásra kerüljenek a hengerek hatózónájába. A feladás tekintetében megoldottam, hogy folyamatos üzemben tömött szemcseágy helyezkedjen el a berendezés kompressziós zónája felett, ezzel biztosítva a szükséges feltételeket a feladás szemcséinek behúzására. A fejlesztett HPGR berendezés megfelelő üzemviszonyainak biztosítása érdekében megoldottam, hogy a megfelelő támasztóerő a hengerpalástokon folyamatos, és a lehető leghomogénebb eloszlású legyen. A probléma megoldására egy hidraulikus akkumulátor egységre volt szükségem, mivel a benne található gáz a hidraulikus nyomás következtében kompressziót szenved el, és tárolni tudja a hidraulikus kör nyomásnövekedéséből fakadó energiát. A

HPGR berendezés fejlesztése során ezzel elértem, hogy kvázi konstans hengerpalást nyomás mellett lehessen a gépet üzemeltetni úgy, hogy közben a résméret is a kívánt kritériumnak feleljen meg. A hidraulikus akkumulátor tehát egyfajta szabályozható rugóállandóval rendelkező korrekciós eszköz, amivel befolyásolni tudom a hatózónában kialakuló hengerpalást nyomást és a résméretet is.

Fontos megemlítenem, bár a berendezés fejlesztéshez és annak bemutatásához szükségem volt egy támpontra a szemcseágyban kialakuló nyomásviszonyokkal kapcsolatban, a szabatos mérnöki munka kritériumainak a tőlem telhető legmagasabb szinten szerettem volna megfelelni, ezért a dolgozatomban nem a számított P_{max} maximális szemcseágy nyomás szerinti eredményközlés mellett döntöttem, hanem a P_{spec} fajlagos hengerpalást nyomás értéket választottam. Ennek oka egyszerű. Az 5.1. fejezetben bemutattam, hogy a 12 különböző P_{spec} és V_{ker} viszonyok között létrejövő, 5 mm vastag szemcseágy más-más kompakciós állapotban van, ezért a termék halmazsűrűségei is merőben máshogy alakultak, melyet a 36. ábra mutatott be. A termék halmazsűrűség pedig meghatározza az 5.2.2. egyenlet szerint számított tömörítési szöget. Ugyan ezen okból számoltam az eredeti hengerprés esetén 4,92 majd a fejlesztett berendezés esetén már 9,53 értékkel a tömörítési szög esetén. A szakirodalomban több szerző Saramak és Naziemiec (2013), Samira és társai (2017), Klymowsky és társai (2002) által közölt tömörítési szög meghatározására tett javaslat is szerepel, melyek mind rendkívül eltérő tömörítési szöghöz és ezáltal eltérő maximális szemcseágy nyomás értékekhez vezetnek. Egy példán keresztül bemutatom ennek jelentőségét:

Az 5.2.6 egyenlet Saramak és Naziemiec (2013) szerint alkalmas tisztán geometria úton a tömörítési szög meghatározására:

$$\sin^{-1} = \frac{s}{R} = \frac{5}{100} = 2,87 \quad 5.2.6.$$

, ahol s a résméret és R a henger sugara.

Az 5.2.5. képletben lecserélve a tömörítési szöggént korábban használt 9,53 értéket, melynek eredményeképpen $P_{max}=300$ MPa érték adódott, a Saramak és Naziemiec (2013) szerinti számítással kapott 2,87 értékre az alábbi eredmény adódik:

$$P_{max} = \frac{F_{max_1}}{D_1 \times L_1 \times \pi \times \frac{\alpha}{360}} = \frac{100 \text{ kN}}{200 \times 20 \times \pi \times \frac{2,87}{360}} = 999 \text{ MPa}$$

Látható, hogy több mint háromszoros P_{max} érték alakul ki a szemcseágyban a Saramak és Naziemiec (2013) szerinti számítással, mint az 5.2.5. egyenlet esetén. Mivel a szakirodalom

és annak megalkotói is tisztában vannak a problémával, ennek elkerülésére a legelterjedtebb és gyakorlatiasabb módszert alkalmazzák a szerzők, vagyis csak a P_{spec} fajlagos hengerpalást nyomás értékekkel számolnak, ezért a továbbiakban én is így jártam el, mert nem szerettem volna önkényesen egy számomra megfelelő eredményt nyújtó módszerrel az elért eredményeim helyességét igazolni.

A dugattyús préssel és a fejlesztett HPGR berendezéssel kapott eredményeim összhangba állítása érdekében egy lehetséges módszert fogok bemutatni erre a problémára az 5.9. fejezetben.

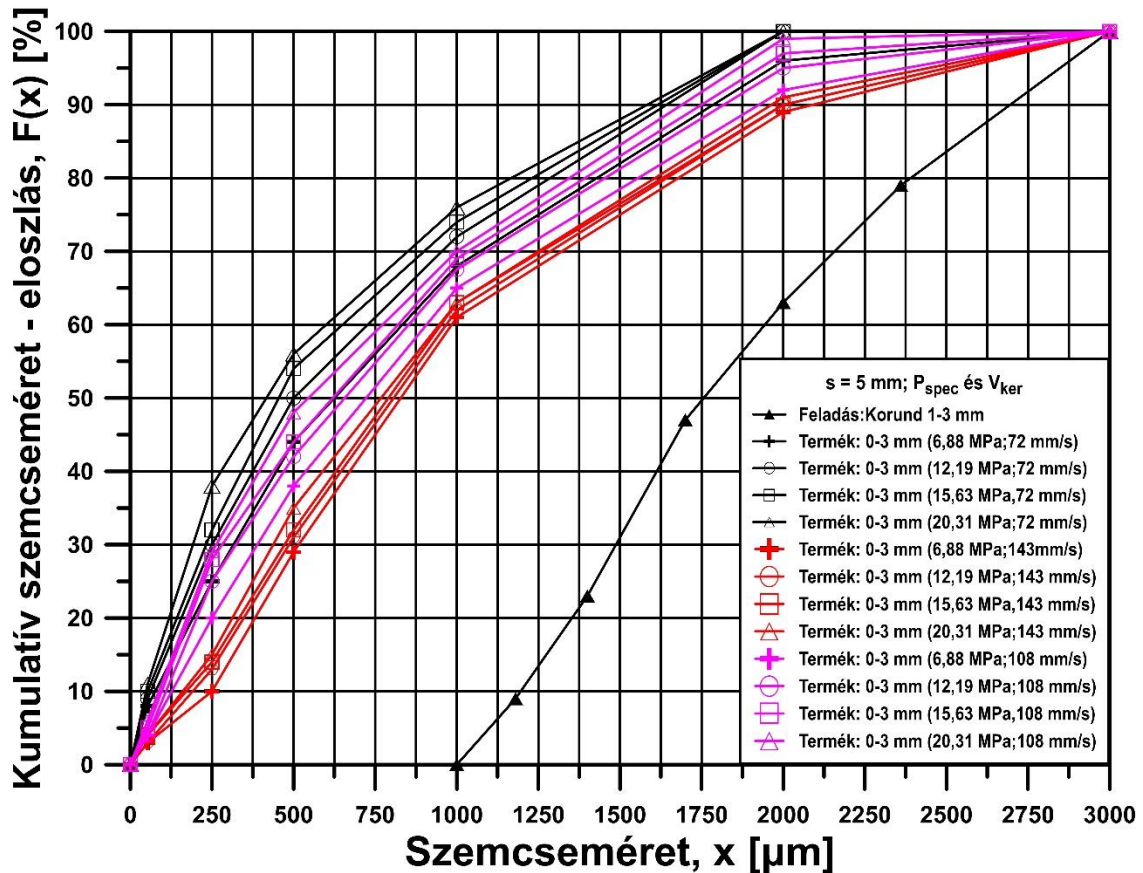
5.3. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a töret szemcseméret-eloszlására

A zárt szemcseágyas lassú kompressziós igénybevételen alapuló aprítási módszert a 5.2. fejezetben bemutatott fejlesztéseimnek köszönhetően, immár folyamatos üzemben is kivitelezhettem és vizsgálhattam. A 4.7. fejezetben bemutatott η értékek egyértelműen bebizonyították, hogy a dugattyús préssel megvizsgált 125-250 MPa szemcseágy nyomástartományban a legjobb eredmények az 5-15 mm vastag szemcseágy használatával érhetőek el. Mivel Kanda és szerzőtársai, (1990) és Schönert (1996) ridegen törő és abrazív kvarc szemcsék esetén is azt állapította meg, hogy energetikailag hatékonyabb az egyszemcse törés, ezért az egyszemcse szituációhoz közelebb álló 5 mm szemcseágy vastagságú, tranziens tartományban végeztem el a HPGR berendezéssel a méréseimet 1-3 mm-es feladású korundszemcsékkel.

A HPGR berendezéssel négy fajlagos hengerpalást nyomásértéket (P_{spec}) és három hengerpalást kerületi sebességet (V_{ker}) alkalmaztam, hogy megvizsgáljam a hatásukat a keletkezett termékek szemcseméret-eloszlására, melyek eredményei a 38. ábrán láthatóak. Megfigyelhető, hogy mindhárom alkalmazott hengerpalást kerületi sebesség esetén a magasabb fajlagos hengerpalást nyomás finomabb terméket eredményezett. Továbbá minden megvizsgált fajlagos hengerpalást nyomás esetén a magasabb hengerpalást kerületi sebesség durvább szemcseméret-eloszlással jellemezhető terméket hozott létre. Fontos látni, hogy a hengerpalást kerületi sebesség növelésével csökken a jelentősége az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomásnak, egyértelműen kevésbé hatékony a szemcseméretcsökkentési eljárás.

Ezt jól bizonyítja, hogy a 72 mm/s hengerpalást kerületi sebesség esetén a legnagyobb az eltérés a 6,88 és a 20,31 MPa fajlagos hengerpalást nyomás termékeinek szemcseméret-eloszlás függvényei között jött létre. A hengerpalást kerületi sebességét növelve, 108 majd

143 mm/s-ra ezek az eltérések csökkennek, alacsonyabb relevanciát kölcsönözve az aktuálisan alkalmazott P_{spec} értékeinek a vizsgált tartományokban.



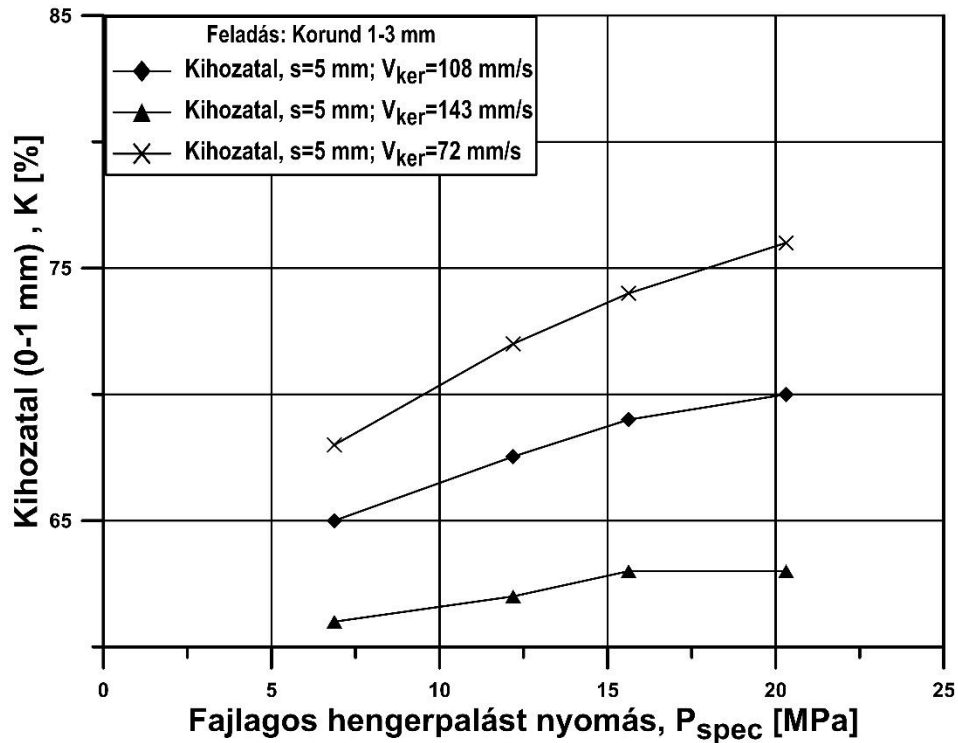
38. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a hengerpalást kerületi sebesség hatása a töret szemcseméret-eloszlására

A fentebb megfogalmazott állításaimmal összhangban a legfinomabb termék a $V_{\text{ker}}=72$ mm/s és $P_{\text{spec}}=20,31$ MPa, a legdurvább termék $V_{\text{ker}}=143$ mm/s és $P_{\text{spec}}=6,88$ MPa beállítások esetén jött létre.

5.4. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a termékkihozatalra

Mivel a feladásként használt 1-3 mm-es korundfrakció nem tartalmazott 1 mm alatti szemcseméretű szemcséket (38. ábra), ezért ebben az esetben is a termékkihozatal értéke megfeleltethető a szemcsék törési valószínűségének adott mérési viszonyok esetén. Az 39. ábrán megfigyelhető, hogy bármely vizsgált P_{spec} esetén a magasabb 0-1 mm-es termékkihozatal az alacsonyabb hengerpalást kerületi sebességgel érhető el. A legalacsonyabb meredekségű görbe a legmagasabb, 143 mm/s hengerpalást kerületi sebesség esetén adódott, míg ezen sebesség csökkentésével a görbék meredeksége növekszik. Ennek jelentése szintén azt igazolja, amit a 5.3. fejezetben állítok, miszerint a magasabb hengerpalást kerületi sebesség nem csak durvább töretet fog eredményezni

azonos vizsgált fajlagos hengerpalást nyomások esetén, de a P_{spec} hatása a keletkezett töret finomságára a megvizsgált hengerpalást kerületi sebesség tartományában a V_{ker} érték növelésével csökken, alacsonyabb hatékonyságú aprítást eredményezve.

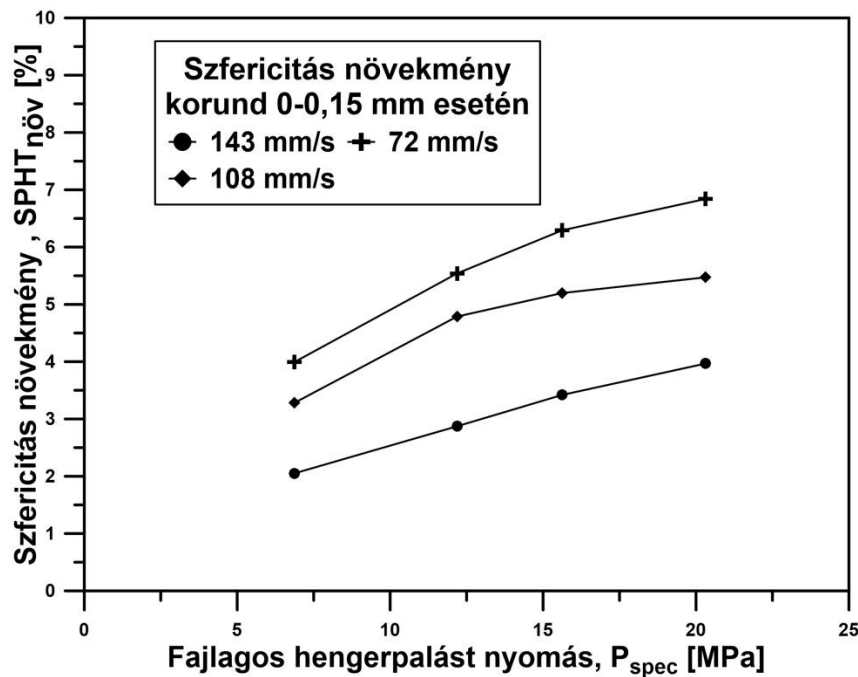


39. ábra. A 0-1 mm-es termékkihozatal értékei a fajlagos hengerpalást nyomás és a hengerpalást kerületi sebességének függvényében

5.5. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a termékfrakciók szfericitására

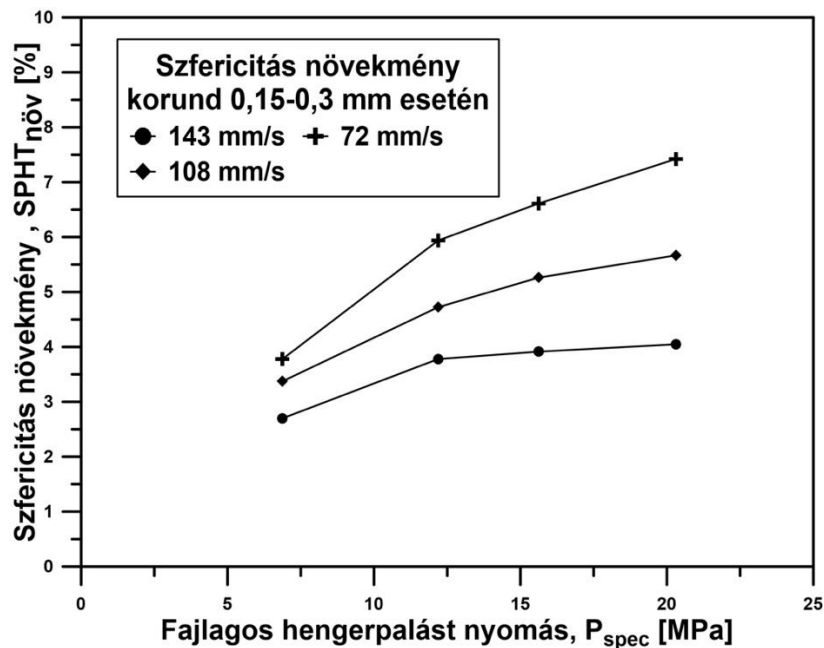
A 4.2-4.4. fejezetekben bemutatott eredményeim alapján nyilvánvalóvá vált, hogy adott dugattyúnyomás értékek mellett a csökkentett szemcseágyvastagság egy energetikailag hatékonyabb aprítási módhoz vezethet, mivel a csökkenő egymáson elhelyezkedő szemcsék száma közelít ahhoz az állapothoz, amikor egyszemcseigénybevétel általi törés jön létre. Hasonló következtetésre jutottam immár folyamatos üzemben a HPGR berendezésben elvégzett méréseim során az 5.3. és 5.4. fejezetekben közölt eredményeim szerint, 5 mm-es szemcseágyvastagságot alkalmazva a $P_{\text{spec}}=6,88-20,31$ MPa tartományban az igénybevétel sebesség csökkentését illetően, amit a hengerpalások kerületi sebességének redukálásával értem el.

A 40. ábrán a legfinomabb vizsgált termékfrakció szfericitás növekményei láthatóak különböző fajlagos hengerpalást nyomás és hengerpalást kerületi sebesség esetén, 5 mm vastag szemcseágy alkalmazása mellett.



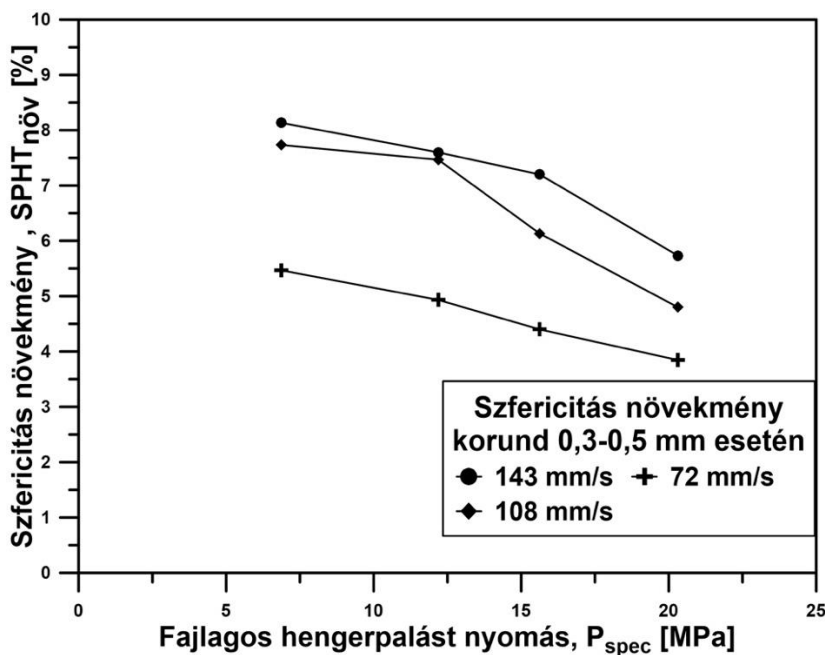
40. ábra Az fajlagos hengerpalást nyomás és hengerpalást kerületi sebesség hatása a 0-0,15 mm-es frakció szfericitás növekményére

Látható, hogy minden egyes vizsgált hengerpalást kerületi sebesség esetén a magasabb P_{spec} érték nagyobb szfericitás növekményhez vezetett, ezért minden függvény, bár változó mértékben, de folyamatosan növekvő értéket vesz fel a megvizsgált tartományban. Következésképpen, a legmagasabb $SPHT_{növ}=6,84$ -es érték a legalacsonyabb $V_{ker}=72$ mm/s és a legmagasabb $P_{spec}=20,31$ MPa esetén, míg a legalacsonyabb $SPHT_{növ}=2,05$ érték a legalacsonyabb $P_{spec}=6,88$ MPa és legmagasabb alkalmazott $V_{ker}=143$ mm/s esetén jött létre. A 0,15-0,3 mm-es frakció analóg módon megvizsgált adatainak eredményeit a 41. ábra tartalmazza. Ahogy a 0-0,15 mm termékfrakció esetén, úgy ezen frakció esetében is növekvő trendet mutatnak a görbék, minden egyes vizsgált hengerpalást kerületi sebesség esetén, a magasabb P_{spec} érték nagyobb szfericitás növekményhez vezetett. Azonban jól látható, hogy a V_{ker} értékek növekedésével, a P_{spec} értékek megnövelésének előnyös hatása a szfericitás növekményre csökkenő tendenciát mutat, mert a függvények $SPHT_{növ}$ intervallumai 3,64; 2,29 majd 1,35 értékre csökkennek a V_{ker} érték növelésével. A 0,15-0,3 mm-es termékfrakció esetében a legmagasabb $SPHT_{növ}=7,42$ -es érték a legalacsonyabb $V_{ker}=72$ mm/s és a legmagasabb $P_{spec}=20,31$ MPa esetén, míg a legalacsonyabb $SPHT_{növ}=2,7$ érték a legalacsonyabb $P_{spec}=6,88$ MPa és legmagasabb alkalmazott $V_{ker}=143$ mm/s esetén jött létre.



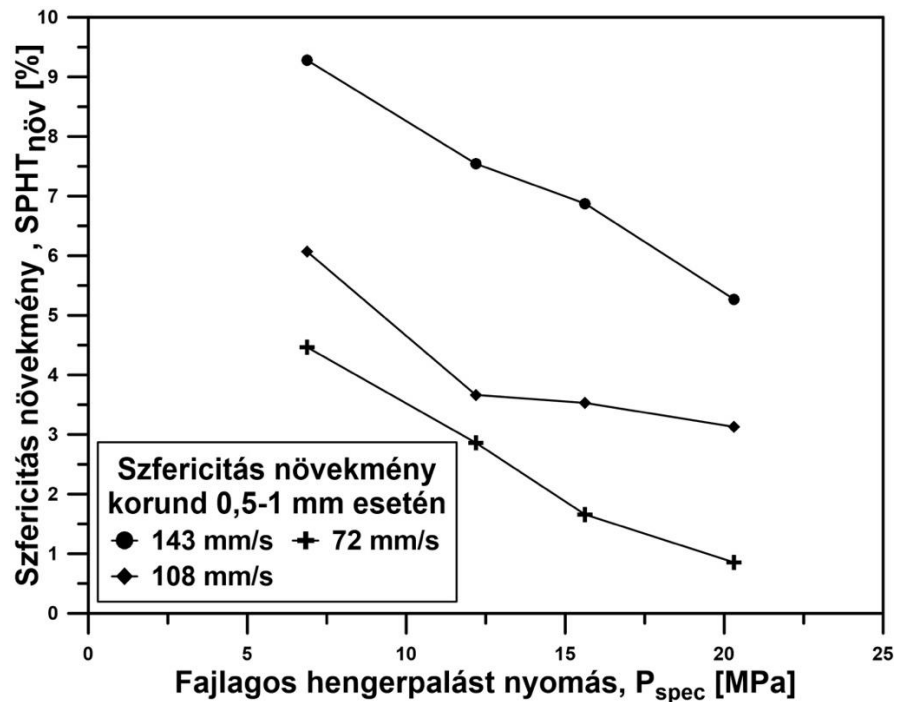
41. ábra Az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomás és hengerpalást kerületi sebesség hatása a 0,15-0,3 mm-es frakció szfericitás növekményére

A következő megvizsgált korund termékfrakció a 0,3-0,5 mm volt, mely esetében a trendvonalak csökkenő tendenciát vesznek fel az alkalmazott P_{spec} értékek megnövelése esetén, függetlenül az alkalmazott V_{ker} értéktől. Ez látható a 42. ábrán, illetve megfigyelhető, hogy adott P_{spec} értékek esetén, a magasabb V_{ker} érték alkalmazása vezet jobb $SPHT_{nö}$ eléréséhez.



42. ábra Az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomás és hengerpalást kerületi sebesség hatása a 0,3-0,5 mm-es frakció szfericitás növekményére

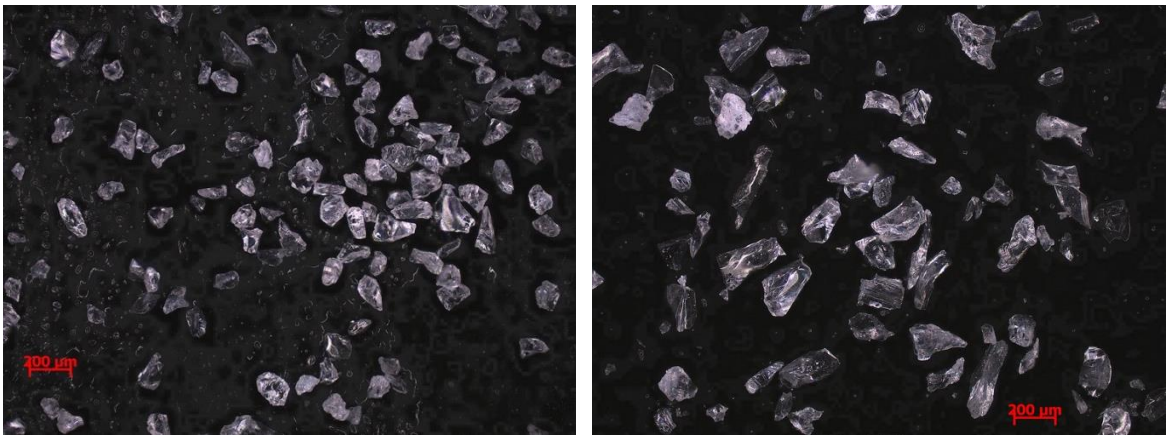
A 0,3-0,5 mm-es termékfrakció esetében a legmagasabb $SPHT_{növ}=8,13$ -as értékkel a legalacsonyabb $P_{spec}=6,88$ MPa és a legmagasabb $V_{ker}=143$ mm/s esetén, míg a legalacsonyabb $SPHT_{növ}=3,85$ érték a legmagasabb $P_{spec}=20,31$ MPa és legalacsonyabb alkalmazott $V_{ker}=72$ mm/s esetén jött létre. A kiértékelésemet analóg módon folytatva a legdurvább termékfrakció, tehát a 0,5-1 mm-es szemcsék szfericitási növekményére tekintve hasonló trendek mutatkoztak, mint a 0,3-0,5 mm-es termékfrakció esetében, azaz a trendvonalak csökkenő tendenciát vesznek fel az alkalmazott P_{spec} értékek megnövelése esetén, függetlenül az alkalmazott V_{ker} értéktől a vizsgált tartományban, melyet a 43. ábra szemléltet. Hasonlóképp a 0,3-0,5 mm termékfrakcióhoz a 0,5-1 mm-es termékfrakciónál is adott P_{spec} értékek esetén, a magasabb V_{ker} érték alkalmazása vezet jobb $SPHT_{növ}$ eléréséhez. A 0,5-1 mm-es termékfrakció esetében a legmagasabb $SPHT_{növ}=9,28$ -as értékkel a legalacsonyabb $P_{spec}=6,88$ MPa és a legmagasabb $V_{ker}=143$ mm/s esetén, míg a legalacsonyabb $SPHT_{növ}=0,86$ érték a legmagasabb $P_{spec}=20,31$ MPa és legalacsonyabb alkalmazott $V_{ker}=72$ mm/s esetén jött létre.



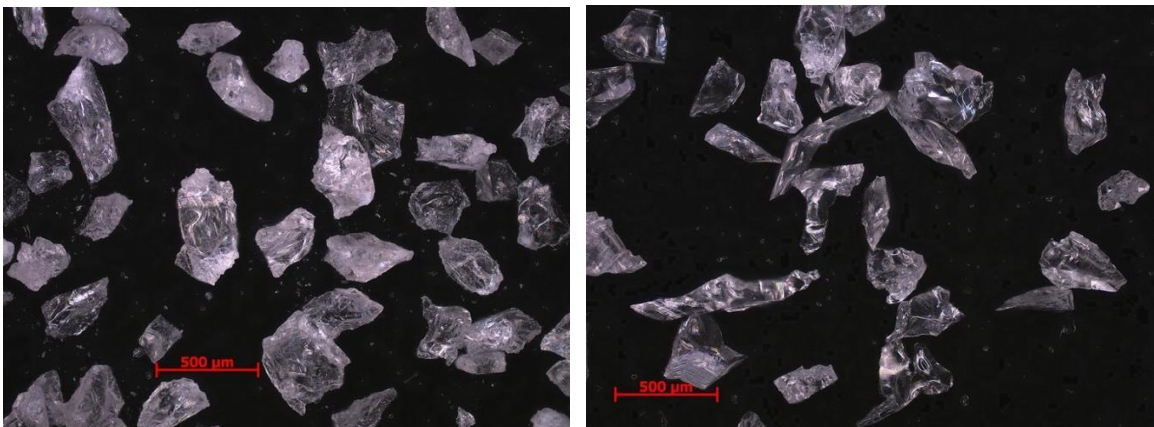
43. ábra Az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomás és hengerpalást kerületi sebesség hatása a 0,5-1 mm-es frakció szfericitás növekményére

A legnagyobb $SPHT_{növ}$ értéket elérte, és az összehasonlítás alapját képező egyszemcse töréssel előállított termékfrakciók ZEISS optikai mikroszkóppal elkészített képeim is igazolják a hatékony alakformálást, amihez köthetően a következő megfogalmazást társítom: A fejezetben közölt eredményeim alapján kijelenthető, hogy az $SPHT_{növ}$ értékének a növelése a 0-0,15; 0,15-0,3 esetében a megvizsgált P_{spec} és V_{ker} értéktartományokban 5

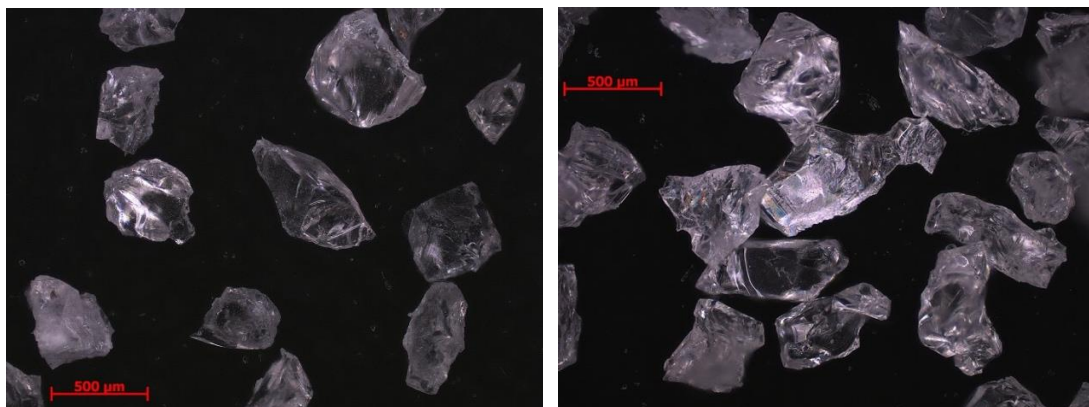
mm részméret esetén 1-3 mm-es korund feladásából, a leghatékonyabban a legmagasabb P_{spec} és a legalacsonyabb V_{ker} alkalmazásával érhető el. A 0,3-5 és a 0,5-1 mm-es termékfrakció esetében, a legalacsonyabb P_{spec} és a legmagasabb V_{ker} alkalmazása vezet a legnagyobb $\text{SPHT}_{\text{növekvő}}$ értékekhez az általam megvizsgált tartományokban. Ennek eredményeképpen a 44. ábrán markáns szemcsealak különbségek figyelhetők meg. A bal oldalon a 0-0,15 mm-es frakció szemcséi jóval gömbösebb szemalakkal rendelkeznek, valamint a szemcsék kontúrvonalait megvizsgálva is jóval lekerekítettebb szemcsehatár vonalak rajzolódnak ki. A teljes 0-0,15 mm-es frakció szfericitása 6,84 %-kal magasabb, mint az ábra jobb oldalán helyet foglaló egyszemcse töréssel előállított frakció esetében. A 0,15-0,3 mm-es frakciók esetében, is ugyanezen szemcsealak leírással kapcsolatos állításaimat tudom megfogalmazni, a HPGR-rel előállított frakció szfericitása 7,42%-kal magasabb, amit a 45. ábra mutat be.



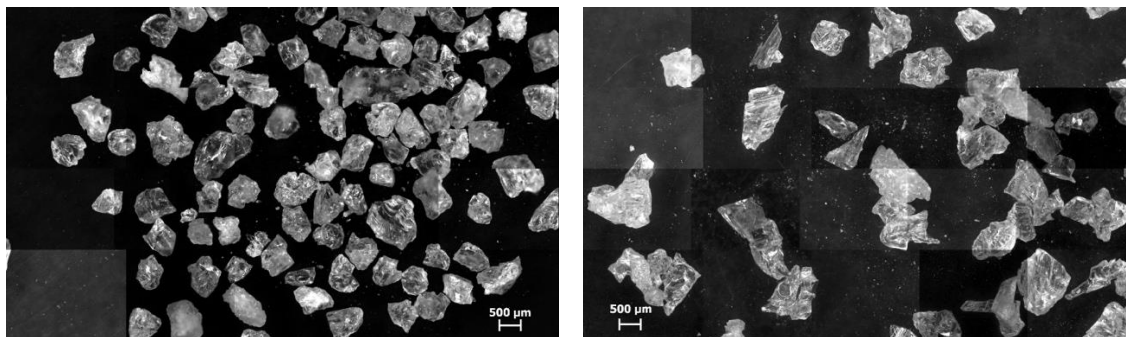
44. ábra. 0-0,15 mm-es termékfrakciók: (bal) $P_{\text{spec}}=20,31$ MPa, $V_{\text{ker}}=72$ mm/s, $s=5$ mm HPGR berendezésben előállítva, (jobb) egyszemcse töréssel előállítva 3.3. fejezet szerint



45. ábra. 0,15-0,3 mm-es termékfrakciók: (bal) $P_{\text{spec}}=20,31$ MPa, $V_{\text{ker}}=72$ mm/s, $s=5$ mm HPGR berendezésben előállítva, (jobb) egyszemcse töréssel előállítva 3.3. fejezet szerint



46. ábra. 0,3-0,5 mm-es termékfrakciók: (bal) $P_{\text{spec}}=6,88$ MPa, $V_{\text{ker}}=143$ mm/s, $s=5$ mm HPGR berendezésben előállítva, (jobb) egyszemcse töréssel előállítva 3.3. fejezet szerint



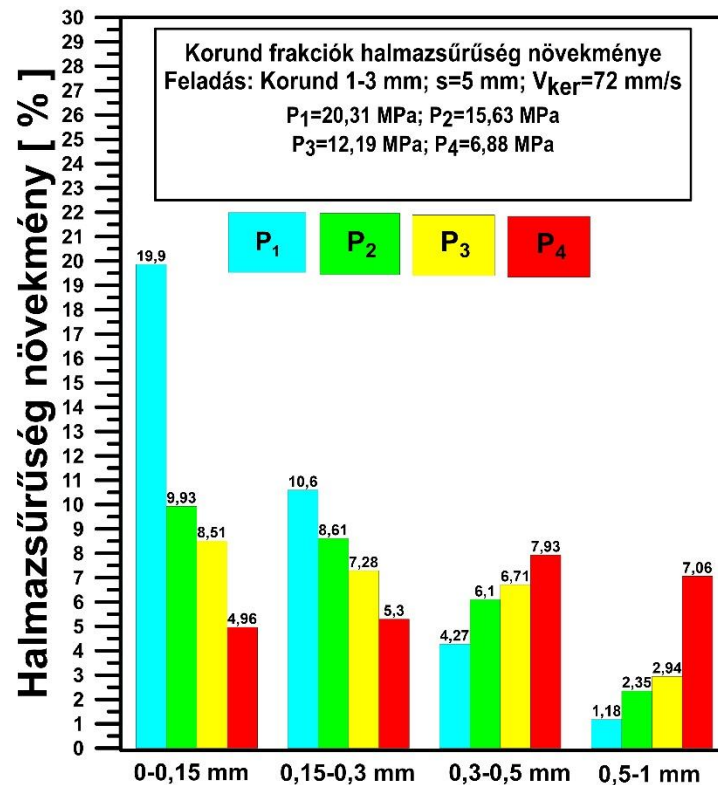
47. ábra. 0,5-0,1 mm-es termékfrakciók: (bal) $P_{\text{spec}}=6,88$ MPa, $V_{\text{ker}}=143$ mm/s, $s=5$ mm HPGR berendezésben előállítva, (jobb) egyszemcse töréssel előállítva 3.3. fejezet szerint

A 46. és 47. ábrákon látható, hogy a bal oldali HPGR termékek esetében jóval szabályosabb szemcsealak alakult ki, ezzel kedvezve 0,3-0,5 és a 0,5-1 mm-es frakciók szfericitásának, mely 8,13 és 9,28 %-kal volt magasabb, mint az egyszemcse töréssel előállított termékfrakciók esetében.

5.6. A nyomás és az igénybevételi sebesség hatása a termékfrakciók halmazsűrűségére

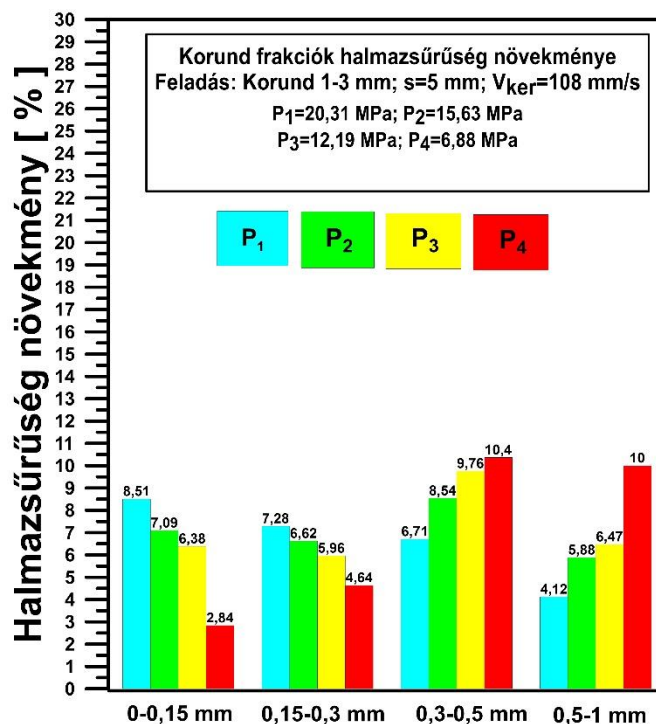
Jelen fejezetben közlöm a zárt szemcseágyas aprítás hatását a töret frakcióinak halmazsűrűség változására, immár folyamatos üzemben, $s=5$ mm rés méret használatával. A 48. ábrámon az látható, hogy legalacsonyabb vizsgált $V_{\text{ker}}=72$ mm/s alkalmazásakor, a P_{spec} érték növelésével a 0-0,15 és a 0,15-0,3 mm-es termékfrakciók esetén folyamatosan emelkedő halmazsűrűség növekmény érhető el, míg a két legdurvább vizsgált termékfrakció esetében P_{spec} érték csökkentése vezet jobb halmazsűrűség növekmény értékekre. A legmagasabb halmazsűrűség növekmény a két legfinomabb termékfrakció esetén 19,9 és 10,6 %-nak, míg a 0,3-0,5 és a legdurvább frakció esetén 7,93, illetve 7,06%-os értéket vett fel. A hengerpalást kerületi sebességnek az emelésével 108 mm/s értékre a tendenciák nem változnak, azaz, a két legfinomabb termékfrakció esetén a P_{spec}

érték növelésével emelkedik a halmazsűrűség növekmény, csökkentésével pedig a két legdurvább termékfrakció esetében érhető el folyamatosan emelkedő halmazsűrűség növekmény, melyet a 49. ábra szemléltet. Látható azonban az is, hogy a két legfinomabb frakció esetében már csak 8,51 és 7,28%-os halmazsűrűség növekedés érhető el $P_{\text{spec}}=20,31$ MPa értékkel, míg a 0,3-5 és a 0,5-1 mm-es frakcióknál már 10,4 és 10 %-os az emelkedés mértéke $P_{\text{spec}}=6,88$ MPa használatakor.

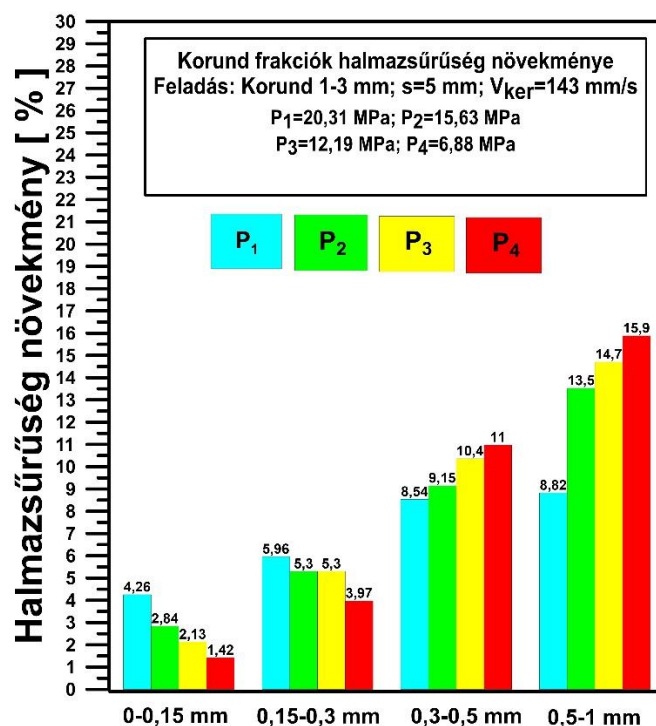


48. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás hatása 72 mm/s hengerpalást kerületi sebesség esetén a termékfrakciók halmazsűrűség növekményére

A 50. ábrán megfigyelhető annak hatása, ha a hengerpalást kerületi sebességét tovább növeltem 143 mm/s értékre. A növekedési trendek azonosan alakulnak, mint az előző két ábrán bemutatott eredményeim esetén, viszont a két legfinomabb termékfrakció halmazsűrűsége már csak 4,26 és 5,96 %-kal emelhető meg $P_{\text{spec}}=20,31$ MPa alkalmazásakor. Ezzel szemben, a fejezetben bemutatott három ábra közül a két legdurvább frakciót tekintve, az utolsónál, tehát a legmagasabb V_{ker} alkalmazását bemutató ábrán látható a legnagyobb halmazsűrűség növekedés $P_{\text{spec}}=6,88$ MPa alkalmazásával, melynek értékei 11 és 15,9%-nak adódtak.



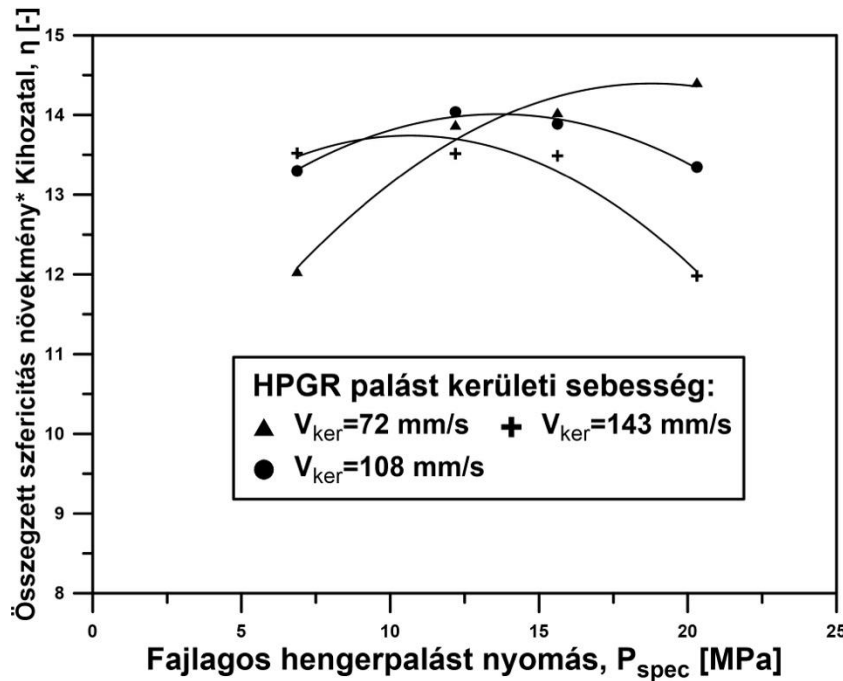
49. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás hatása 108 mm/s hengerpalást kerületi sebesség esetén a termékfrakciók halmazsűrűség növekményére



50. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás hatása 143 mm/s hengerpalást kerületi sebesség esetén a termékfrakciók halmazsűrűség növekményére

5.7. A zárt szemcseágyas törési mód hatékonyságának bemutatása a szfericitás növekmény és kihozatal mérőszámainak segítségével HPGR termékek esetén

Analóg módon a 4.7 fejezetben bemutatott eredményeim bemutatásához, úgy ebben a fejezetben is minőségi és mennyiségi paraméterek figyelembevételével értékeltem ki a HPGR berendezés hatékonyságát a folyamatos üzemű zárt szemcseágyas aprítás során, figyelembe véve a termékek mennyiségét és alakformáltságát (szfericitását) is.



51. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a hengerpalást kerületi sebesség hatásainak értékelése $s=5$ mm-es rés méret esetén, a keletkezett termékek összegzett szfericitás növekményéből és a kihozatalból képzett η mérőszámon keresztül

A 51. ábrán látható, hogy a η érték változása $V_{ker}=72$ mm/s esetén a növekvő P_{spec} értékek alkalmazásával folyamatosan növekvő tendenciát mutat. A V_{ker} értéket 108 mm/s-ra növelve, a $P_{spec}=6,88-12,19$ MPa tartományban növekszik az η érték, majd 20,31 MPa értékig csökken. A legmagasabb $V_{ker}=143$ mm/s hengerpalást kerületi sebesség használatával, gyakorlatilag stagnálás figyelhető meg a $P_{spec}=6,88-15,63$ MPa tartományban, majd az η érték $P_{spec}=20,31$ MPa értékig csökken. Egyértelműen látszik a tendenciákból, hogy az elérhető η értéket a megvizsgált $V_{ker}=72-143$ mm/s tartományban a hengerpalást kerületi sebességének növelése negatívan befolyásolja, azonban $P_{spec}=15,63$ MPa esetén az η értékek nagyon közel helyezkednek el egymáshoz, sőt $P_{spec}=12,19$ MPa alkalmazásával a 108 mm/s hengerpalást sebességhez köthető η érték adódott a legmagasabbnak, valamint $P_{spec}=6,88$ MPa esetén a legmagasabb $V_{ker}=143$ mm/s alkalmazásával értem el a legmagasabb η értéket. Ennek magyarázata egyszerű, az

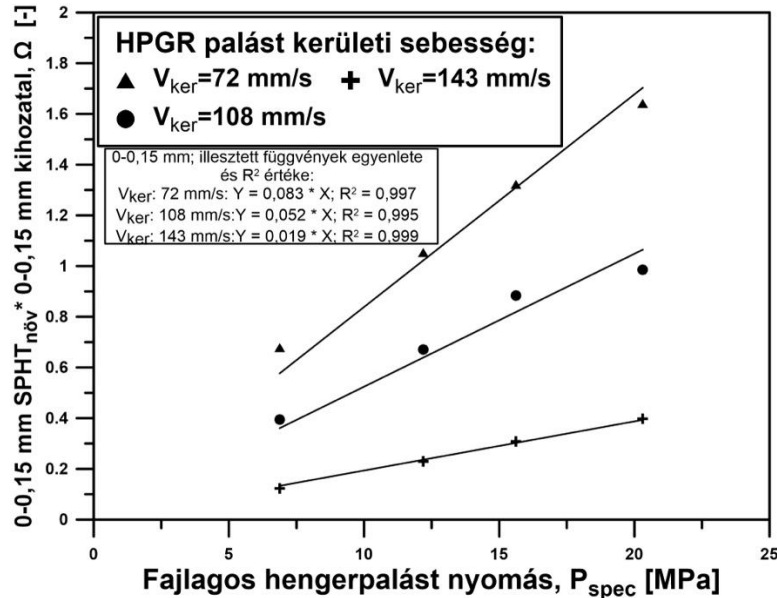
η érték képzésénél a 4.1.5. képlet szerint a termékfrakciók $SPHT_{növ}$ értéke, azok kihozatalával súlyozva kerül összegzésre. Ez a módszer ugyan jól leképezi a zárt szemcseágyas töréssel létrejövő aprítási és ezzel párhuzamosan lezajló alakformálási folyamatok teljeskörű eredményét, mégsem nyújt információt az egyes frakciók előállításának optimális HPGR üzemviszonyairól. Ennek a kérdéskörnek a tisztázására egy új mérőszámon alapuló kiértékelési módszert dolgoztam ki, amit a következő fejezetben mutatok be.

5.8. A zárt szemcseágyas törési mód hatékonyságának bemutatása a szfericitás növekmény és a frakciókihozatal mérőszámainak segítségével HPGR termékek esetén

Az 1-3 mm-es feladású korund zárt szemcseágyas aprítása során, a HPGR berendezésben a különböző aprítógép beállítások függvényében a terméket alkotó a 0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5 és a 0,5-1 mm frakciók kihozatala, szfericitása és az ebből következő halmazsűrűsége, vagyis a termékfrakciók tulajdonságfüggvényei szabályozhatóak. Ezen összefüggések feltárását mutatom be az aktuális fejezetben.

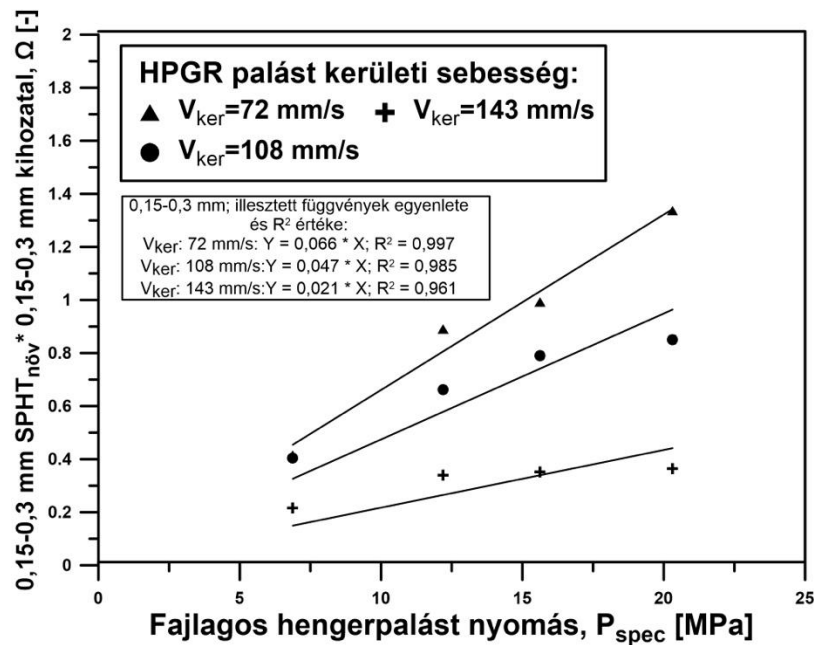
A 52. ábrán látható, hogy minden egyes illesztett görbe az origóba tart, melynek jelentése szerint az X és Y tengelyek elnevezését figyelembe véve kézen fekvő lenne azt a következtetést levonni, hogy a meghatározott illesztett függvényegyenletekkel determinálható a $P_{spec}=0-20,31$ MPa és $V_{ker}=72-143$ mm/s intervallumokban az Ω értéke. Nem szabad azonban megfeledezni arról, hogy az egyszemcse és a szemcseágyas törés területén a nemzetközi szakirodalomban számtalanszor hivatkozott Professzor Schönert (1982) (1996), eredményei rámutattak arra, hogy a zárt szemcseágyas töréshez minimum elvárt szemcseágynyomás az 50 MPa, viszont kutatásai során, amikor ezen értéket meghatározta, a legkeményebb és legnehezebben aprítható anyag, amivel kísérletezett a kvarc volt, mely jóval könnyebben aprítható, mint a korund. Ezen tények ismeretében és mivel a saját fejlesztésű HPGR berendezésemmel nem mértem 6,88 MPa fajlagos hengerpalást nyomás alatti tartományban, nem jelenthető ki, hogy az origóba mutató egyenesek egyenletei biztosítanak az összefüggést a P_{spec} és V_{ker} HPGR üzemparaméterei és a méréseimből származtatott Ω értékek között, tetszőleges értelmezési tartományon. Viszont az általam elvégzett $P_{spec}=6,88-20,31$ MPa és $V_{ker}=72-143$ mm/s mérési tartományokban igen, mert minden esetben $R^2=0,99$ feletti értékek adódtak az illesztett függvényeimre a 0-0,15 mm-es termékfrakció esetében, ezzel meghatároztam az 1-3 mm-es korund feladásból 5 mm vastag szemcseágyú tranziens tartományban (mely se nem tisztán egyszemcse se nem tisztán ideális szemcseágy aprítás Schönert (1996) szerint), P_{spec} és V_{ker} HPGR üzemparaméterei és a méréseimből származtatott Ω értékek közötti

függvénykapcsolatokat. Az Ω érték tisztán determinálja adott termékfrakció (0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5 és 0,5-1 mm továbbiakban bemutatva) esetén azokat a P_{spec} és V_{ker} üzemparamétereket, mellyel az adott frakció Ω értéke maximálható, tehát a legszférikusabb szemcsék legjobb kihozattalal előállíthatóak, adott termékszemcseméreten.

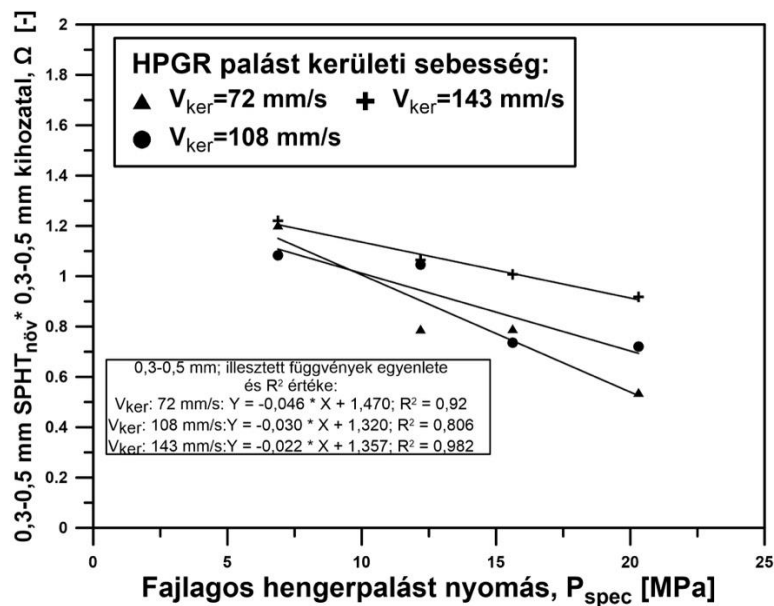


52. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a hengerpalást kerületi sebesség hatásainak értékelése 5 mm-es szemcseágyvastagság esetén, a keletkezett 0-0,15 mm-es termék szfericitás növekményéből és a kihozatalból képzett Ω mérőszámon keresztül

A 52. ábrán látható, hogy a legfinomabb vizsgált termékfrakció esetén a $V_{\text{ker}}=72$ mm/s és a $P_{\text{spec}}=20,31$ MPa hatására képződik a legnagyobb tömegű és legszférikusabb szemcse. Az 53. ábrán azt mutatom be, hogy a 0,15-0,3 mm frakció esetén is a $V_{\text{ker}}=72$ mm/s és a $P_{\text{spec}}=20,31$ MPa hatására képződik a legnagyobb tömegű és legszférikusabb szemcse.



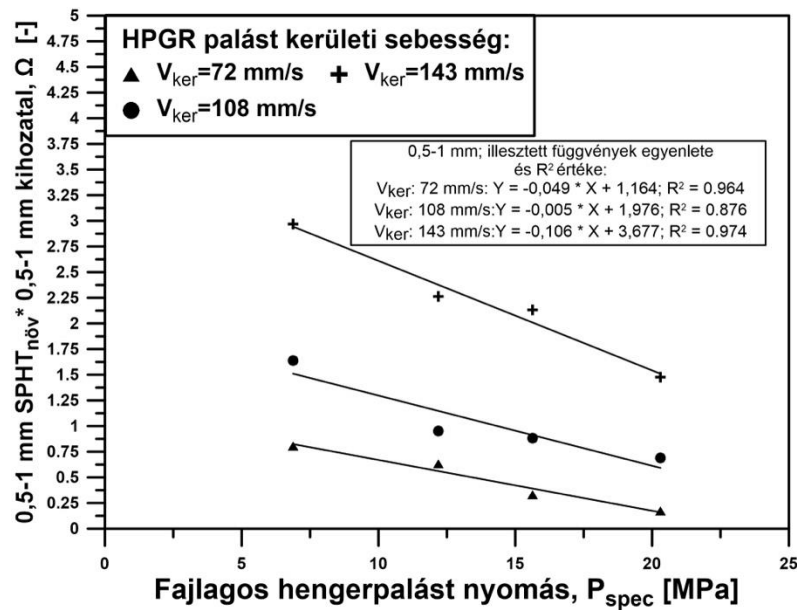
53. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a hengerpalást kerületi sebesség hatásainak értékelése 5 mm-es szemcseágyvastagság esetén, a keletkezett 0,15-0,3 mm-es termék szfericitás növekményéből és a kihozatalból képzett Ω mérőszámon keresztül



54. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a hengerpalást kerületi sebesség hatásainak értékelése 5 mm-es szemcseágyvastagság esetén, a keletkezett 0,3-0,5 mm-es termék szfericitás növekményéből és a kihozatalból képzett Ω mérőszámon keresztül

A 0,3-0,5 mm-es frakció esetén melyet az 54. ábra szemléltet azt látható, hogy a $V_{ker}=143$ mm/s és a $P_{spec}=6,88$ MPa hatására képződik a legnagyobb tömegű és legszférikusabb

szemcse. Ebben az esetben meg kell említenem, hogy a $V_{ker}=108$ mm/s illesztett egyenes R^2 értéke 0,806. A 0,5-1 mm-es termékfrakció optimális előállítási körülményeit szemléltető összefüggést a 55. ábra mutatja be az általam megvizsgált intervallumokban. A legdurvább termékfrakció esetében az jelenthető ki, hogy $V_{ker}=143$ mm/s és a $P_{spec}=6,88$ MPa hatására képződik a legnagyobb tömegű és legszférikusabb szemcse a termékben.



55. ábra A fajlagos hengerpalást nyomás és a hengerpalást kerületi sebesség hatásainak értékelése 5 mm-es szemcseágyvastagság esetén, a keletkezett 0,5-1 mm-es termék szfericitás növekményéből és a kihozatalból képzett Ω mérőszámon keresztül

A fejezet eddig közölt és a 4.8. fejezetben bemutatott eredményeimből látható, hogy meghatároztam a sajátfejlesztésű HPGR berendezés fő üzemparamétereinek hatását a keletkezett termékek tulajdonságfüggvényiére. Fontos látni, hogy a hengerpalást kerületi sebesség, a maximális szemcseágynyomás és az alkalmazott szemcseágyvastagságon kívül minden más aprítási folyamatot befolyásoló paraméter a berendezés geometriájától, és a feladott anyag tulajdonságaitól függ, melyek nem üzemparaméterek (hanem geometriai és anyagtulajdonsági paraméterek) és a feladás diszperzitási tulajdonságai doktori kutatásom során eleve determináltak voltak a kutatásom ipari alkalmazásra szánt mivolta miatt.

5.9. A dinamikus szemcseágy összenyomási eredmények átfogó értékelése

Miután megvizsgáltam a HPGR berendezésben az 1-3 mm-es korund feladásából a törési kísérletekkel nyert termékek: szemcseméret-eloszlását, kihozatalait, szemcse szfericitás és halmazsűrűség növekményeit, valamint az η és Ω értékeit különböző függvénykapcsolatok segítségével, az alábbi megállapításokat teszem:

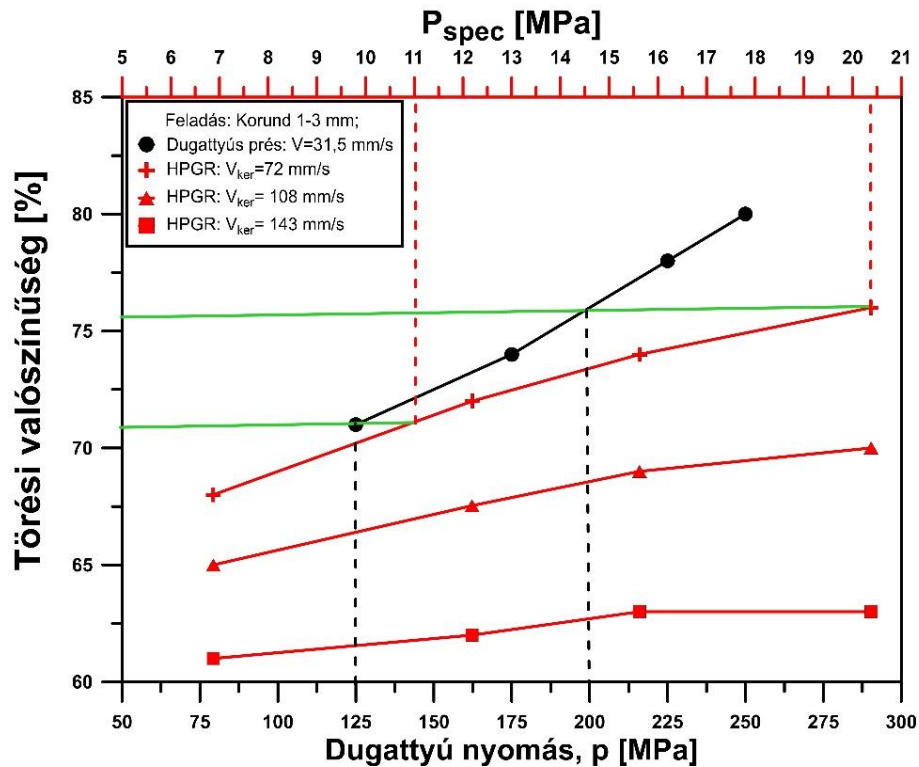
A szakirodalmi kutatásom és a statikus zárt szemcseágyaprítási eredményeimre támaszkodva tervszerű eszközfejlesztést hajtottam végre, melynek során egy olyan sajátfejlesztésű nagynyomású őrlőhengerpárt hoztam létre, melyben folyamatos üzemben valósítható meg a rideg, kemény és koptató korundszemcsék tudatos termékszabályozása a <1 mm szemcsemérettartományban. A fejlesztés során megoldottam a dinamikus zárt szemcseágyas aprításhoz nélkülözhetetlen tömött adagolási módszer sajátos kidolgozását. A hidraulikus támasztóerőt megnövelve a hengerpalástok hosszának csökkentésével megnöveltem az elérhető maximális fajlagos hengerpalást nyomást 25 MPa értékre. A hidraulikus körhöz épített pneumatikus akkumulátor segítségével szabályozható rugóállandójú nyomásszabályozó rendszert építettem ki. A berendezés kifejlesztésével igazoltam a 2. munkahipotézisem helyességét.

Megállapítottam, hogy dinamikus zárt szemcseágyas aprítás során az 5 mm vastag szemcseágy különböző mértékben komprimálható (36.ábra), melyet a vizsgált hengerpalást kerületi sebességek növelése negatívan, az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomás minden esetben pozitívan befolyásolt. Emellett az alkalmazott hengerpalást kerületi sebesség növelése minden megvizsgált esetben csökkentette az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomás relevanciáját, alacsonyabb törési hatékonyságot eredményezve.

A bevezetett mutatók ($SPHT_{növ}$, $\rho_{halm,növ}$, $\Sigma SPHT_{növ}$, $\Sigma \rho_{halm,növ}$ η és Ω) és a fejlesztett HPGR berendezésen elvégzett aprítási kísérleteimmal feltártam a rideg, kemény és koptató korund szűken frakcionált termékszemcsék szemcsemérete, törési módja, szemcsealakja és a frakciók halmazsűrűsége közötti összefüggéseket, a hengerpalást kerületi sebesség és a fajlagos hengerpalást nyomásának a függvényében.

A dugattyús prés nyomástartományát, illetve a HPGR berendezés fajlagos hengerpalást nyomását az 56. ábra segítségével lehet összhangba hozni a törési valószínűség felhasználásával. Az ábra segítségével az Y tengelyen, a határoló zöld egyenesek közötti intervallumban, az X tengellyel párhuzamost húzva és elmetszve a dugattyúsprés és a 72 mm/s kerületi sebességgel mért HPGR görbéit, összhangba hozható egymással adott dugattyús prés nyomás és HPGR fajlagos hengerpalást nyomás. Eszerint tehát, 125 MPa dugattyúnyomás 31,5 mm/s nyomósebességgel, ugyan akkora tömegű szemcse törését idézi elő, mint 11 MPa fajlagos hengerpalást nyomás 72 mm/s kerületi sebesség esetén, természetesen ugyan olyan 1-3 mm korund feladásból, 5 mm vastag szemcseágyban. Analóg módon, a $P_{spec}=20,31$ MPa fajlagos hengerpalást nyomás 200 MPa dugattyúnyomásnak feleltethető meg a dugattyús présben. Fontos látni, hogy a módszerrel

csak a 0-1 mm termékkihozatal becsülhető meg, mert ahogy a jelen fejezetben korábban közöltem, a szemcse szfericitás és a halmazsűrűség megváltozása is függ az igénybevétel sebességétől adott nyomásértékek mellett.



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

6. Horizontális és vertikális tengelyű röptőtörők mérési eredményeinek bemutatása

Az 5-6. fejezetekben közöltem a lassú kompressziós igénybevételen alapuló zárt szemcseágyas aprítás eredményeit szakaszos és folyamatos üzemen is, illetve az ezen törési módnak a termék diszperzitási tulajdonságaira gyakorolt hatásait is bemutattam, összevetve az egyszemcse törési mód termékre gyakorolt hatásaival, korund esetén. A jelen fejezetben bemutatott kísérletsorozat alapját az a régóta ismert tény adta, hogy az ásványelőkészítés területén a szemcse-szemcse kölcsönhatáson alapuló igénybevételi mód a vertikális tengelyű röptőtörőkben, kedvező és jellemzően kubikus szemcsealakot biztosít a terméknek Bengtsson és Evertsson (2006) és Hickel és társai (2018) szerint, minimalizálva a túszerű és lemezes szemcsék részarányát abban. Nem szabad azonban megfeledkezni arról sem, hogy ennek komoly ára van, hiszen Rumpf (1973) és Schubert (1987) -ben már kimutatta, hogy az egyszeri ütközéses igénybevétel esetén a szemcsetörési minimum energián felül, a szemcsével közölt többletenergia az utódszemcsék mozgási energiáját is fedezi, mely utólagos szemcse aprózódást is előidézhet. Megfigyelték továbbá, hogy az igénybevételi intenzitás növekedésével az

ütközéses igénybevételek során, illetve a lassú kompressziós igénybevétel esetén is, a törésre fordítódott energiahasznosulás csökkenő tendenciát mutat. Látható tehát, hogy bár a szakirodalmi információk alapján magasabb aprítási munkaigénnyel fog járni az aprítás és szemcsealakformálás a szemcse-szemcse és szemcse- szemcseágy közötti nagyobb sebességű ütközések miatt, de várhatóan kedvező szemcsealak változás lesz elérhető a termékekben, mely a kutatási témám egyik fő kérdésköre.

6.1. Kísérleti és kiértékelési módszerek

A magas igénybevételi sebességű, egyszemcse és szemcse-szemcse törési mechanizmusok vizsgálatai alatt az I.M. fejezetben bemutatott horizontális (a továbbiakban Horizontal Shaft Impact mill, tehát HSI) és vertikális tengelyű röpitőtörő (a továbbiakban Vertical Shaft Impact mill, tehát VSI) berendezéseket alkalmaztam, amihez 1-3 mm-es lineáris síkszítán előállított mullit frakciót használtam feladási modellanyagként. A feladási modellanyag a törési vizsgálatokhoz a 3.3. fejezetben bemutatott módszer szerint került előkészítésre és a 10, 50 és 90 %-os szemcsemérete 1,14 mm, 1,78 mm és 2,79 mm. A szisztematikus kísérletrendszer során az egyszemcse igénybevételt a HSI, a szemcseágyas igénybevételre jellemző szemcse-szemcse kölcsönhatáson alapuló törési módot a VSI berendezésben hoztam létre. Tekintettel arra, hogy a kutatási témám modellanyaga a korund, annak rendkívül abrazív tulajdonsága miatt még a szemcse-szemcse kölcsönhatáson alapuló VSI berendezésben is komoly kopási károk keletkeztek már az első mérések alkalmával. A HSI szemcse-felület ütközéséből adódó igénybevétel esetén ettől jóval jelentősebb károk keletkeztek volna, mely a teljes mérési sor végére bizonyosan a berendezés nagymértékű kopását és a különböző mérések rossz összevethetőségét eredményezték volna. Ezen információk birtokában egy másik, a Refra-System Kft. által gyártott magas alumínium-oxid tartalmú anyaggal, a mullittal végeztem el a méréseimet, mely hasonlóan a korundhoz rideg, kemény és koptató anyag, viszont a Mohs keménysége ellenben a korund 9-es értékével csak 6-7 közé tehető és az abrazív hajlama is jóval alacsonyabb. A kísérletrendszer célja, hogy megvizsgáljam az egyszemcse és a szemcseágyas törés hatásait a termékfrakciók diszperzitási tulajdonságaira, immár jóval nagyobb a 37-57 m/s ütközési sebesség tartományban, 3,25 t/h feladási tömegáramok alkalmazásával. Mindemmellet, a VSI üzemeltetési módjából adódóan úgynevezett szemcsékkel való túltöltési állapotokban is végeztem méréseket, melyhez megemeltem a feladási tömegáramokat 3,25 t/h-ról 4,76 t/h és 6,86 t/h-ra, aminek eredményeképp jóval nagyobb számú szemcse-szemcse ütközés jött létre.

A pofás majd hengerestörővel előállított és a 3.3. fejezetben bemutatott módszerrel elosztályozott 0-150; 150-300; 300-500 és 500-1000 μm -es frakciók képezték a bázisértékeket (SPHT_0 és $\rho_{\text{halm}0}$) 6. táblázat, melyek az összehasonlító elemzéseim alapjául szolgáltak. A HSI és VSI berendezésekkel előállított termékfrakciók összehasonlító szfericitási és halmazsűrűségi értékeit SPHT_1 és $\rho_{\text{halm}1}$ módon jelöltem.

X [μm]	Szfericitás SPHT_0 [-]	Halmazsűrűség $\rho_{\text{halm}0}$ [g/cm^3]
0-150	0,766	1,21
150-300	0,781	1,22
300-500	0,734	1,23
500-1000	0,688	1,27

6.táblázat Az egyszemcsetöréssel előállított mullit frakciók SPHT_0 és $\rho_{\text{halm}0}$ értékei

A mérésekből származó adatok kiértékelésekor az alábbi függvénykapcsolatokat vizsgáltam meg:

$$F(x) = f(x)$$

$$X_{10}/X_{10}, X_{50}/X_{50}, X_{90}/X_{90} = f(V_{\text{ker}} \text{ és } \dot{m})$$

$$K = f(V_{\text{ker}} \text{ és } \dot{m})$$

$$\text{SPHT}_{\text{növ}} = f(V_{\text{ker}} \text{ és } \dot{m})$$

$$\rho_{\text{halm},\text{növ}} = f(V_{\text{ker}} \text{ és } \dot{m})$$

$$\Sigma \text{SPHT}_{\text{növ}} = f(V_{\text{ker}} \text{ és } \dot{m})$$

$$\Sigma \rho_{\text{halm},\text{növ}} = f(V_{\text{ker}} \text{ és } \dot{m})$$

ahol:

$F(x)$: Kumulatív szemcseméret-eloszlás [%]

X és x : Feladási és termék szemcseméretek [μm és mm]

$X_{10}/X_{10}, X_{50}/X_{50}, X_{90}/X_{90}$: Aprítási fok 10, 50, 90%-os szemcseméreten [-]

K : 0-1 mm termékek kihozatala [%]

V_{ker} : Alkalmazott rotor kerületi sebesség [m/s]

$\dot{m}$: Alkalmazott tömegáram [t/h]

$\text{SPHT}_{\text{növ}}$: Adott termékfrakció szfericitás növekménye [%]

$\rho_{\text{halm},\text{növ}}$: Adott termékfrakció halmazsűrűség növekménye [%]

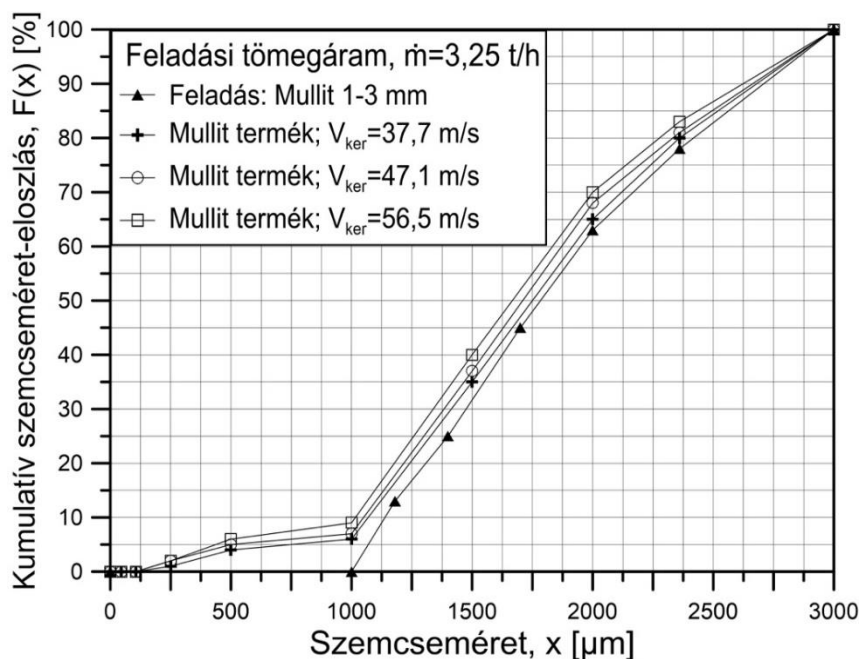
$\Sigma \text{SPHT}_{\text{növ}}$: 0-1 termék összegzett szfericitás növekménye [%]

$\Sigma \rho_{\text{halm},\text{növ}}$: 0-1 termék összegzett halmazsűrűség növekménye [%]

A 4.1 fejezetben korábban már közöltem, a szemcse szfericitás mint szemcsealakot leíró paraméter kiválasztásának az okát, a szemcsealak-halmazsűrűség relációjának vizsgálatához. Eszerint jártam el a jelen kísérletrendszerből nyert adathalmaz kiértékelése során is, illetve a 4.1.1; 4.1.3; 4.1.4 és 4.1.5. képlet szerint meghatározott mérőszámokat ezen fejezetben is felhasználtam. A frakciók halmazsűrűségmérésére a MSZ 6506-84 szabvány szerinti eljárást alkalmaztam, míg a szemcsealakvizsgálatra a Camsizer X2 berendezést használtam. A $\Sigma\text{SPHT}_{\text{növ}}$ és $\Sigma\rho_{\text{halm,növ}}$ számításánál összegeztem a 0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5 és 0,5-1 mm-es osztályozott frakciók $\text{SPHT}_{\text{növ}}$ és $\rho_{\text{halm,növ}}$ százalékos értékeit, így megkapva a teljes, újonnan letört szemcsék szfericitási és halmazsűrűség növekményeinek az értékeit.

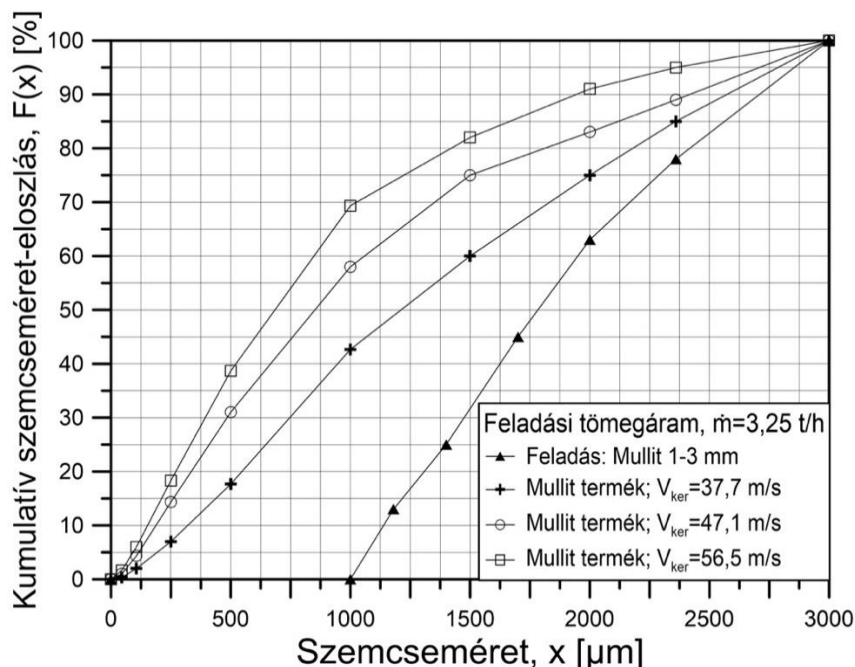
6.2. A rotor kerületi sebesség hatása HSI és VSI berendezésekben előállított mullit termékek szemcseméret-eloszlására és a feladási tömegáram hatása VSI berendezésben előállított mullit termékek szemcseméret-eloszlására

Jelen fejezetben bemutatom, hogy a V_{ker} rotor kerületi sebességnek milyen hatása van a mullit termékek szemcseméret-eloszlására abban az esetben, ha a feladás szemcséi egy felületnek ütközve egyszemcse igénybevételnek (HSI), illetve a szemcsék egymásnak ütközve (VSI) szenvednek el nagysebességű igénybevételt 37,7; 47,1; és 56,5 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazása mellett. Szintén ebben a fejezetben fogom közölni a feladási tömegáram megváltozásának hatását a VSI berendezésben 3,25; 4,76 és 6,86 t/h tömegáramok alkalmazása esetén, 47,1 m/s rotor kerületi sebesség használatával.

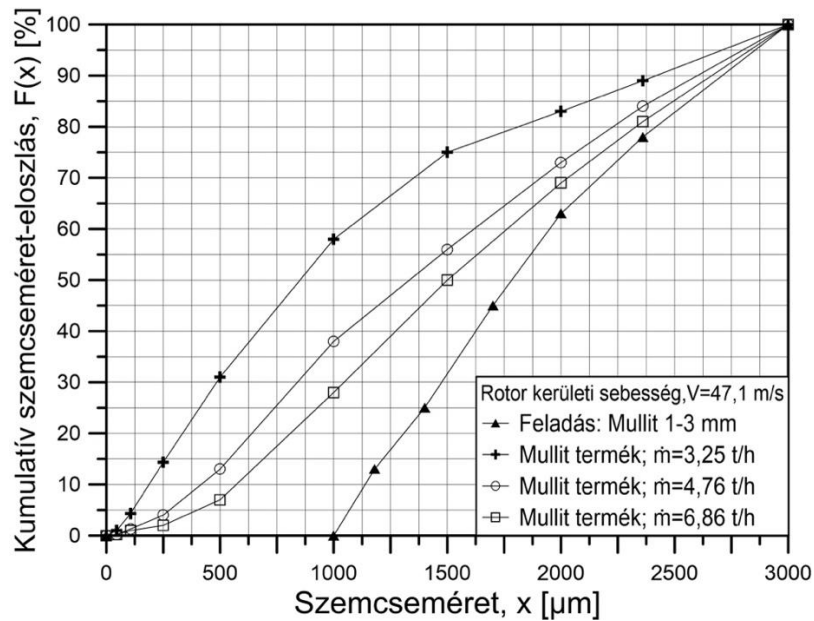


57. ábra. A rotor kerületi sebesség hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására HSI berendezésben

Az 57. ábrán megfigyelhető, hogy alapvetően a feladás és a termékek jellemző szemcseméret-eloszlás függvénye hasonló karakterisztikájú, az X-tengely mentén minimális eltolódás látható az alkalmazott rotor kerületi sebesség megváltozásának hatására. A magasabb rotor kerületi sebesség minden esetben finomabb töretet eredményezett. Az 1 mm alatti, tehát az újonnan létrejött termékszemcsék tömeghányadát megfigyelve azt tapasztaltam, hogy még a legmagasabb alkalmazott rotor kerületi sebesség sem eredményezett 10% feletti termékkihozattal. A 10 százalékos szemcseátmérő változása 37,7; 47,1; és 56,5 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazása mellett, 1065, 1050 és 1040 μm -nek adódott. Ugyanezen rotor kerületi sebességek alkalmazása esetén az 50 és 90%-os szemcseátmérő értékei 1750, 1710, 1650 és 2750, 2740, valamint 2695 μm értékre csökkentek 3,25 t/h feladási tömegáram mellett. Az 58. ábrán már egy jóval hatékonyabb aprítás eredményei látszanak a VSI berendezéssel letört termékek esetén, ahol a fő igénybevétel a szemcse-szemcse ütközés következtében jön létre. A 10%-os szemcseátmérő megváltozása 37,7; 47,1; és 56,5 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazása mellett, 320, 180 és 140 μm -nek adódott. Az 50 és 90%-os szemcseátmérő értékei 1210, 850, 675 és 2625, 2440, valamint 1940 μm értékre csökkentek 3,25 t/h feladási tömegáram mellett a 37,7; 47,1; és 56,5 m/s rotor kerületi sebességek használatával.



58. ábra. A rotor kerületi sebesség hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására VSI berendezésben



59. ábra. A feladási tömegáram hatása a keletkezett töret szemcseméret-eloszlására VSI berendezésben

Az I.M. fejezet 1M.3. ábráján látható, hogy abban az esetben, ha a rotoradagolás egy bizonyos tömegáramot elér, szükségszerűen a feladott szemcsék kaszkád üzemmód létrejöttét idézik elő az aprítóberendezésben. A kaszkád üzem létrejötte a feladott anyag tömegáramától, szemcseméretétől, halmazsűrűségétől, folyási tulajdonságától, az alkalmazott rotorkerületi sebességtől és a kaszkádoltatást szabályzó, a rotorba vezető feladócsövön létrehozott rés felületétől függ. Mivel ezen paraméterek közül mind állandó, leszámítva a mérések során változtatott feladási tömegáramokat, az anyagáramokat lépcsőzetesen növelve azt tapasztaltam, hogy az 1-3 mm-es feladási mullit frakcióhoz és a 47,1 m/s rotor kerületi sebességhez a 4,5 t/h feladási tömegáramnál kezdődik meg az feladás kaszkádolása, ezért a 4,76 t/h esetén a teljes feladási tömegáram 5%-a érkezett meg az őrlőtérbe kaszkádoltatással. A feladási tömegáramot 6,86 t/h-ra emelve a kaszkádoltatott tömegáram 35%-ra növekedett. Az ilyen üzemviszonyok mellett kivitelezett méréseim szemcseméret-eloszlását a 59. ábra szemlélteti. Látható, hogy a feladási tömegáram konstans 47,1 m/s rotor kerületi sebesség esetén fordítottan arányos a termék finomságával.

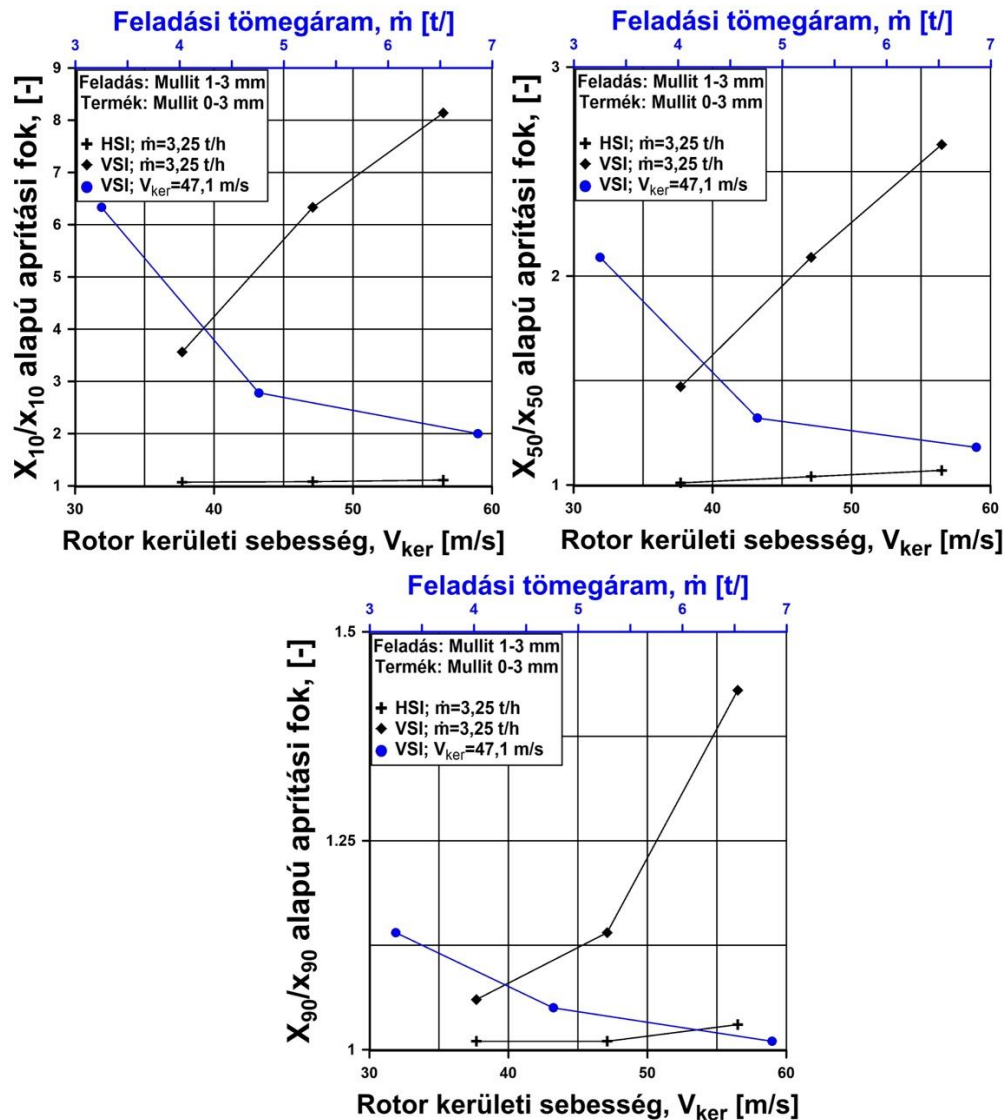
A 10%-os szemcseátmérő megváltozása 3,25; 4,76; és 6,86 t/h feladási tömegáram esetén, 180, 410 és 570 μm -nek adódott. Az 50 és 90%-os szemcseátmérő értékei 850, 1340, 1500 és 2440, 2655, valamint 2740 μm értékre csökkentek a 47,1 m/s rotor kerületi sebesség használatával.

Összességében megállapítható, hogy a szemcse-szemcse igénybevételen alapuló törési mechanizmus a VSI berendezésben jóval magasabb termékkihozatalt eredményezett bármely megvizsgált rotor kerületi sebesség esetén, mint a HSI berendezésben jellemző egyszemcsetörés, mely a szemcse-felület között játszódik le. A VSI aprítógépet 5, majd 35%-os kaszkád üzem mellett alkalmazva, a megnövelt feladási tömegáram következtében, adott időpillanatban az őrlőtérben jóval nagyobb számú szemcse-szemcse kölcsönhatás kialakulására volt lehetőség, melynek eredményeképpen a termékek finomsága fordított arányosságot mutatott a feladási tömegárammal 47,1 m/s rotor kerületi sebesség esetén.

6.3. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása az aprítási fokra HSI és VSI berendezésekben

A 4.3. fejezetben bemutattam miért szükséges több nevezetes szemcsemérethez köthető aprítási fokot is definiálni és eszerint megvizsgálni a törési folyamatokat. A 10; 50 és a 90 %-os szemcseátmérőn alapuló aprítási fokokat a 60. ábra szemlélteti. Látható, hogy mind a három szemcseátmérőhöz tartozó aprítási fok minimális növekedést mutatott a HSI berendezésben, melyek közül legnagyobb aprítási fok a 10 %-os szemcseátmérőn alapuló számításnál jelentkezett 1,12-es értékkel a legnagyobb alkalmazott rotor kerületi sebesség esetén 3,25 t/h feladási tömegáramnál.

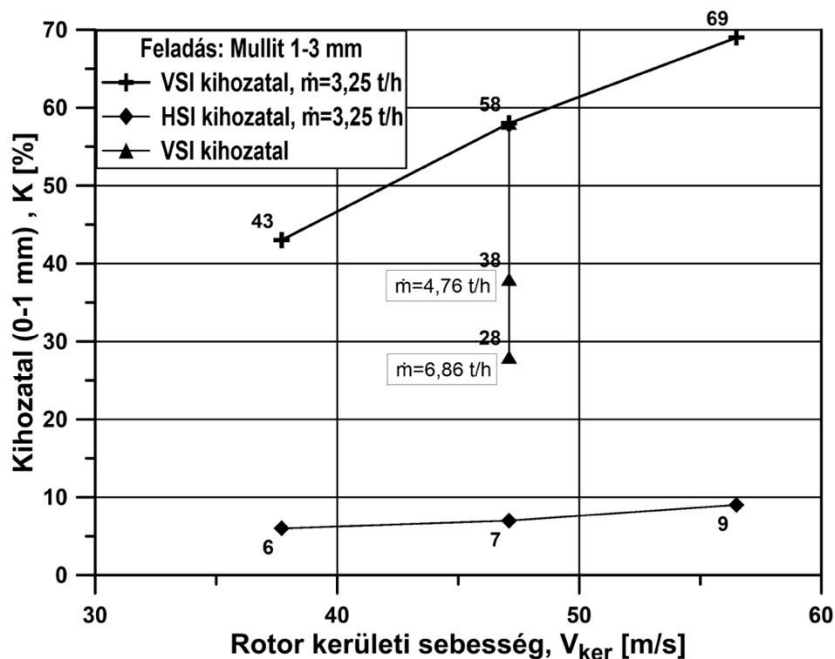
Ezzel szemben az ugyanezen szemcsemérethez tartozó aprítási fok jóval meredekebben emelkedő függvénykapcsolatot ábrázol az megemelt rotor kerületi sebességek függvényében, melyhez 56,5 m/s rotor kerületi sebesség esetén 8,14-es aprítási fok társul. A VSI berendezés esetében 47,1 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazása esetén mindhárom szemcsemérethez tartozó aprítási fok fordított arányosságban állt a feladási tömegárammal, tehát a nagyobb alkalmazott tömegáram durvább töretet eredményezett. A VSI berendezés alkalmazása esetén pedig, mindhárom szemcsemérethez tartozó aprítási foknál növekedés jött létre, a megemelt rotor kerületi sebességek használata mellett, tehát a magasabb igénybevételi sebesség kedvezett a finomabb töret előállításának.



60. ábra A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termékek 10, 50 és 90%-os szemcseméretén alapuló aprítási fokára

6.4. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termékkihozatalra HSI és VSI berendezésekben

Jelen fejezetben bemutatom, hogy a rotor kerületi sebesség milyen hatással bír a keletkezett töretben jelenlévő 0-1 mm-es frakció termékkihozatalára HSI és VSI berendezésekben. Emellett közlöm a VSI berendezésben 3 megvizsgált tömegáram hatását a 0-1 mm-es frakció termékkihozatalára. A termékkihozatal egyben a feladott 1-3 mm-es mullit szemcsék törési valószínűségét is jelenti, mivel a feladásban nincs 1 mm alatti szemcseméretű anyag 0,1 g pontosságú mérleggel meghatározva.



61. ábra A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termékek 0-1 mm-es frakciójának kihozatalára

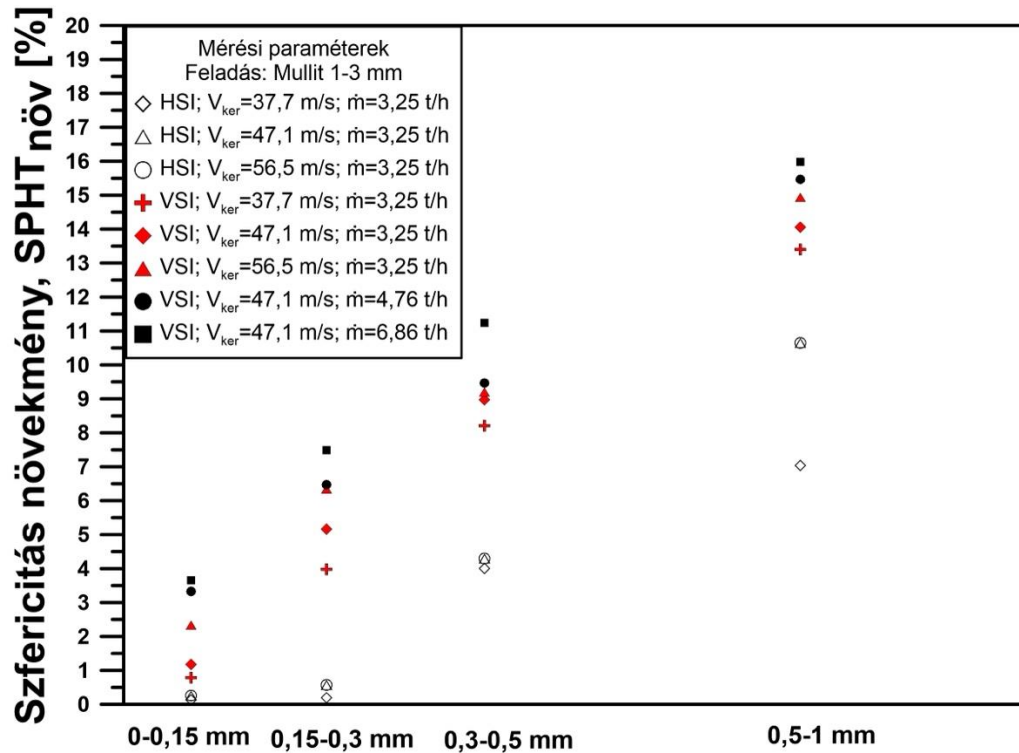
A 61. ábrán látható, hogy HSI berendezésben minimális 0-1 mm termékkihozatal volt elérhető a 37,7-ről 56,5 m/s-ra emelt rotor kerületi sebességgel, mert mindössze 3 tömegszázalékkal emelkedett meg ennek értéke 6-ról 9 %-ra. A VSI berendezésben ellenben 43, 58 és 69 %-os 0-1 mm-es termékkihozatalt sikerült elérnem, 37,7 ; 47,1 és 56,5 m/s rotor kerületi sebességek használatával, miközben a feladási tömegáram 3,25 t/h volt. A VSI berendezésben 47,1 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazásával, a 3,25-ről 4,76 majd 6,86 t/h-ra emelt feladási tömegáram 58-ról 38, majd 28 %-ra csökkentette a 0-1 mm kihozatalát. Látható, hogy amíg a konstans 3,25 t/h feladási tömegáram esetén a HSI és VSI aprítógépekben is növekvő tendenciát mutatott a termékkihozatal a 0-1 mm-es szemcseméret tartományban a rotor kerületi sebesség növelésével, addig a VSI berendezésben 47,1 m/s rotor kerületi sebesség mellett a megnövelt feladási tömegáram jelentősen csökkentette ugyanezen termékfrakció kihozatalát.

6.5. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termék szemcse-szfericitásra HSI és VSI berendezésekben

A 62. ábrán megfigyelhető, hogy a különböző rotor kerületi sebességek alkalmazása és feladási tömegáramok használata hogyan befolyásolja a 0-1 mm-es termékből a 3.3. fejezetben bemutatott procedura szerint kiosztályozott 0-0,15; 0,15-0,3; 0,3-0,5 és a 0,5-1 mm-es termékfrakciók szfericitásának a növekményét. Fontos megemlíteni, ha csak minimális mértékben is, de minden frakcióban, függetlenül a hozzájuk tartozó beállítási

paramétertől, történt egy minimális szfericitási növekedés az ($SPHT_0$) bázisértékekhez képest. Szintén látható egy növekedési tendencia az $SPHT_{növ}$ értékében a szemcseméret növekedésével a megvizsgált frakciók esetén. A HSI berendezés eredményeinél megfigyelhető, hogy a 0-0,15; és 0,15-0,3 mm-es frakciók esetén, a rotor kerületi sebességnek minimális a hatása a szfericitás növekményre. Visszatekintve a 57. ábrára, ahol a HSI berendezés termékeinek a szemcseméret-eloszlásai bemutatásra kerültek és összevetve a 62. ábrán tapasztalt 0,3-0,5 és a 0,5-1 mm-es $SPHT_{növ}$ értékeivel, látható, hogy az ezen szemcseméretű frakciókba tartozó szemcsék szemcsealakjának szférikusabbá válása következtében, a felületről letört kisebb szemcsék jelentek meg a termékek szemcseméret-eloszlását bemutató 57. ábrának az 1 mm-től kisebb szemcseméretet reprezentáló részén. A két ábrán az is megfigyelhető, hogy a kerületi sebesség növekedésével 37,7-ről 47,1 m/s-ra a HSI esetében mindössze 1%-os 0-1 mm kihozatal növekmény jelentkezik, ám a szfericitás 0,3-0,5 mm esetén még csak 0,3 %-kal, viszont a kisebb törési szilárdságú, nagyobb szemcseméretű 0,5-1 mm termékfrakció esetén már további 3,5 %-kal emelkedett meg 10,65%-os értékre, ami a későbbiekben bemutatott halmazsűrűségi eredményekre jelentős hatást gyakorol. Nagyon hasonló tendencia figyelhető meg a VSI berendezés termékfrakciói esetén is, hiszen a megnövelt rotor kerületi sebesség minden frakció esetében immár jóval jelentősebb $SPHT_{növ}$ értékeket eredményezett $\dot{m}=3,25$ t/h alkalmazásakor is, melynek intervalluma 0,78-14,94 % között változott a mérési beállítások és a vizsgált termékfrakciók függvényében. Előnyösen hatott tehát a szemcse-szemcse igénybevételek során a megnövelt rotor kerületi sebesség a frakciók szfericitás növekményére a VSI berendezésben, mert minden megvizsgált termékfrakciónál a magasabb $SPHT_{növ}$ értékhez, nagyobb rotor kerületi sebesség társítható.

A 62. ábrán megfigyelhető az is, hogy a VSI berendezésben a szemcsékkel túltöltött állapot, tehát a megnövelt kaszkád feladási tömegáram jelentősen megemelte a szemcsék szfericitását mind a négy vizsgált szemcseméret frakció esetén. Kijelenthető, hogy az 5 és 35%-os kaszkád feladás hozzájárult a $SPHT_{növ}$ értékek további emeléséhez 47,1 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazása esetén, mely a legfinomabb frakció esetén 3,66 %-nak, a 0,15-0,3 és 0,3-0,5 mm esetén 7,5 és 11,24 %-nak, míg a legdurvább termékfrakció esetén 15,99%-nak adódott. A nyolc mérési sorozat közül tehát a 47,1 m/s rotor kerületi sebesség és a 35%-os feladási kaszkád arány vezetett a legjobb eredményre mind a négy vizsgált frakció szfericitás növelésében.



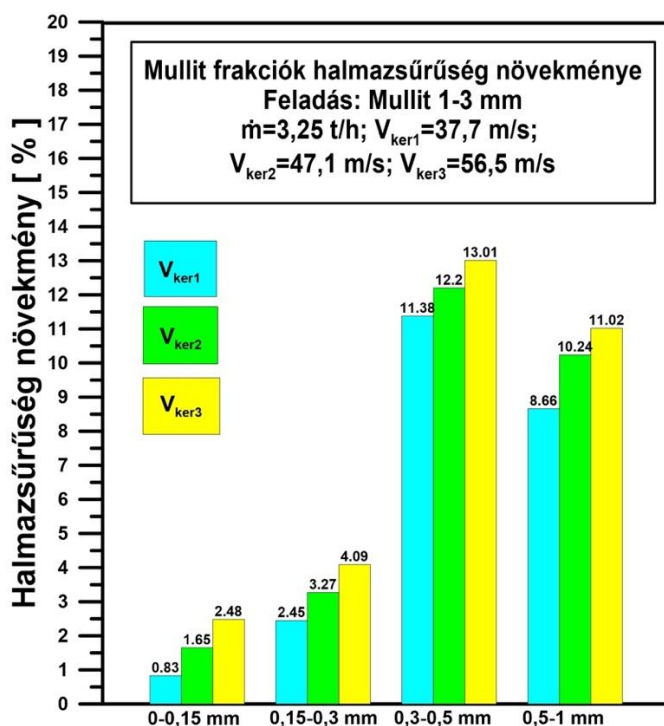
62. ábra. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termék szemcse-szfericitásra HSI és VSI berendezésekben

6.6. A rotor kerületi sebesség és a feladási tömegáram hatása a termék halmazsűrűségére HSI és VSI berendezésekben

Az 6.5. fejezetben bemutattam, hogy megfelelően nagy igénybevételi sebességek esetén a kisebb törési szilárdságú, tehát nagyobb szemcseméretű mullit szemcsék a 0,3-0,5 és 0,5-1 mm-es intervallumban már egyszemcsetöréssel (HSI) is alakformálhatóak úgy, hogy azok szfericitása növekedjen. Ahhoz azonban, hogy a két legfinomabb frakció szfericitását is érdemben emelni tudjam, még az 56,5 m/s rotor kerületi sebesség sem bizonyult elengedőnek. Ennek egyértelmű következményei láthatóak a 63. ábrán, ahol a legfinomabb termékfrakció 0,83 és 2,48 % míg a 0,15-0,3 mm-es termékfrakció 2,45-4,09 %-os halmazsűrűség növekmény intervallumaiban mutatott változásokat. Mindkét esetben, sőt, mind a négy megvizsgált frakció esetén a HSI berendezésen megnövelt rotor kerületi sebesség magasabb halmazsűrűség növekményeket eredményezett. A legmagasabb halmazsűrűség növekmény a 0,3-0,5 mm-es termékfrakciónál jött létre 13,01 %-os értékkel 56,5 m/s rotor kerületi sebesség és 3,25 t/h feladási tömegáram mellett. A 62. és 63. ábrát együttesen áttekintve nyilvánvalóvá válik, hogy különböző szemcseméreteken az SPHT_{növ} értékének emelkedése, más-más mértékű halmazsűrűség növekedést fog eredményezni. Tehát hiába volt a legdurvább HSI termékfrakció legmagasabb SPHT_{növ} értéke 10,81 %-os, a 0,3-0,5 mm-es termékfrakció maximális elért SPHT_{növ} értéke pedig 4,46 %-os, a

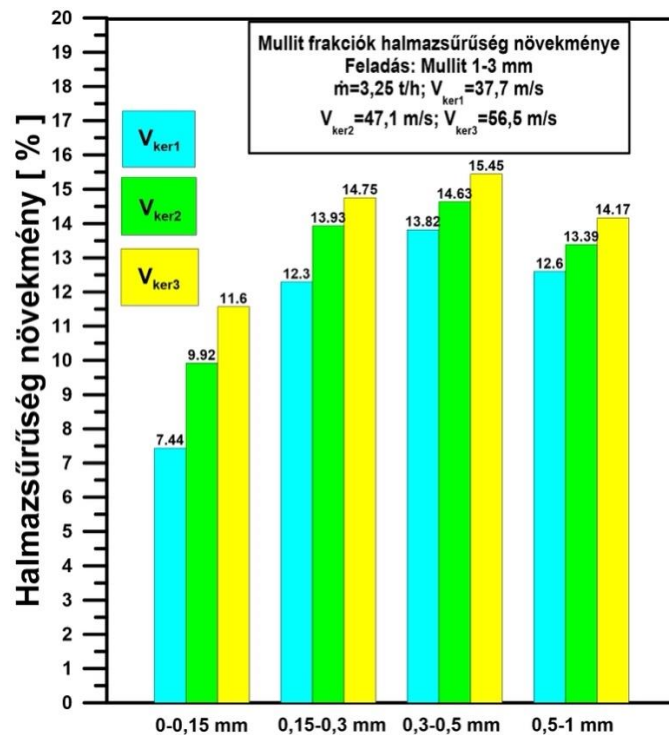
halmazsűrűség növekedésben mégis a 0,3-0,5 mm termékfrakció 13,01%-os értéke magasabbnak adódott, mint a legdurvább frakció 11,02%-os értéke.

Ez a tendencia megfigyelhető a 64. ábrán is, ahol a VSI berendezéssel elért eredményeim láthatóak. A legmagasabb halmazsűrűség növekmény tehát a 0,3-0,5 mm-es frakció esetén adódott 15,45 %-os értékkel, szintén a legmagasabb alkalmazott rotor kerületi sebesség használatával. Ennél a mérési sorozatnál is azt mutatják az eredményeim, hogy a megemelt rotor kerületi sebesség minden megvizsgált frakció esetén jobb halmazsűrűség növekményt biztosít az adott frakciónak. Fontos különbség azonban a VSI esetén, hogy a nagyszámú szemcse-szemcse ütközés következtében, a nagyobb törési szilárdságú 0-0,15 és 0,15-0,3 mm-es frakciók halmazsűrűsége is jelentősen megemelkedett a 7,44-11,6 és 12,3-14,75 %-os tartományban az alkalmazott rotor kerületi sebesség függvényében, a szemcse-szemcse kölcsönhatásoknak köszönhetően.

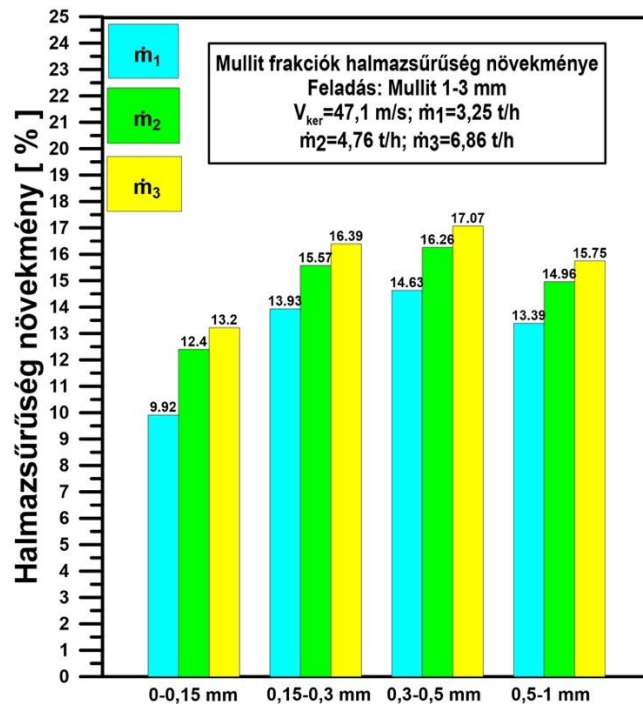


63. ábra. A rotort kerületi sebesség hatása a halmazsűrűség növekményre HSI esetén

A 65. ábrán az figyelhető meg, hogy bár a rotor kerületi sebességnek is markáns szerepe van a termék frakciók halmazsűrűségének kialakulásában, az őrlőtér túltöltése szemcsékkel a VSI berendezésben, további halmazsűrűség növekményt képes előidézni 47,1 m/s rotor kerületi sebesség esetén.



64. ábra. A rotort kerületi sebesség hatása a halmazsűrűség növekményre VSI esetén



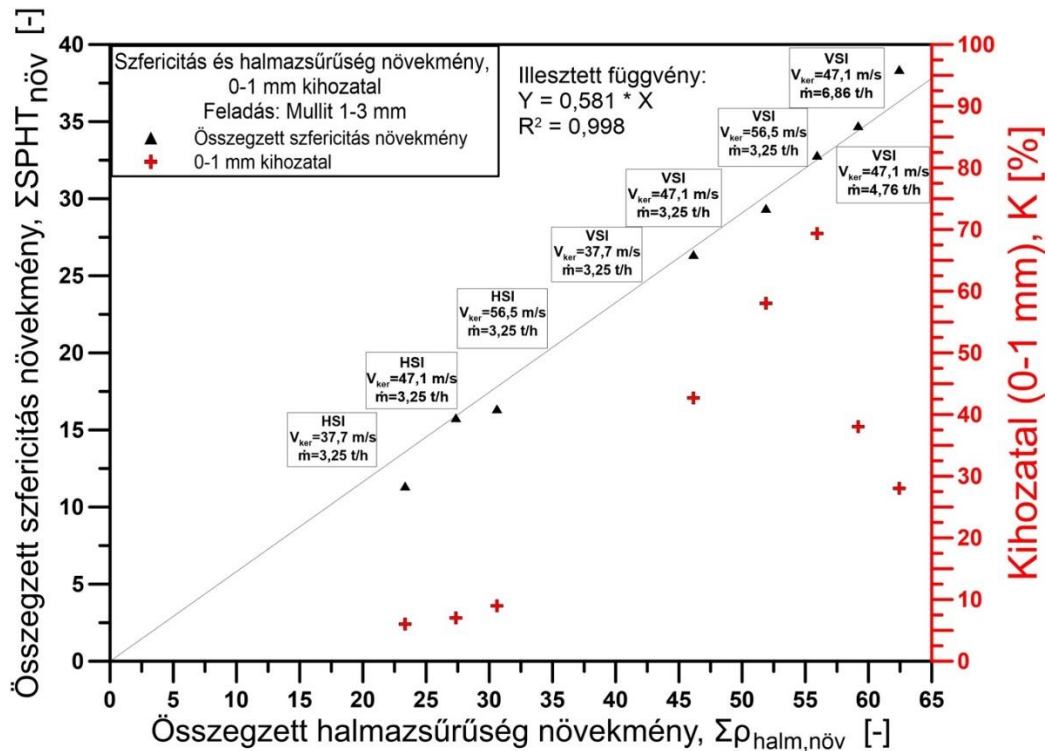
65. ábra. A feladási tömegáram hatása a halmazsűrűség növekményre VSI esetén

A feladási tömegáram növelése tehát a kaszkádoztatott feladási tömegáram 5 majd 35%-ra emelése a teljesen egészében rotoron keresztül közölt feladáshoz képest jelentős halmazsűrűség növekedést idézett elő minden megvizsgált termékfrakció esetén. A legnagyobb halmazsűrűség növekmény a két legfinomabb vizsgált termékfrakció esetén

13,2 és 16,39 %-nak, a két legdurvább termékfrakciók esetén pedig 17,07 és 15,75 %-nak adódott 6,86 t/h feladás mellett, melyből a feladás 35%-a kaszkád üzemmódban érkezett a berendezés őrlőterébe, 47,1 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazása mellett.

6.7. A HSI és VSI berendezések termékre gyakorolt hatásainak bemutatása a szfericitás és halmazsűrűség növekmények, illetve a termék kihozatal mérőszámainak segítségével

Mint minden folyamat eredményeképpen létrejött termék esetén, úgy ebben az esetben is nem csak minőségi, de mennyiségi paramétereket is figyelembe kellett vennem az eredményeim kiértékelése során. Ezért a 66. ábrán a keletkezett 0-1 mm-es frakciók összegzett szfericitás növekményét az összegzett halmazsűrűségük növekményének a függvényében ábrázoltam, párhuzamosan pedig feltüntettem, hogy tömegszázalék alapján mekkora kihozataalt sikerült elérnem ezekből a szemcsékből.



66. ábra. Az összegzett szfericitás és halmazsűrűség növekmények összefüggése a 0-1 mm termékfrakció kihozatalának figyelembevételével

Jól látható, hogy a HSI termékek esetében adódtak a legkisebb összegzett szfericitás növekmények és az ehhez kapcsolódó halmazsűrűség növekmények is, illetve alacsony, minden esetben 10% alatti kihozataalt sikerült csak elérnem a méréseim során. A VSI termékek esetén a legmagasabb szfericitás növekmény és a hozzá köthető halmazsűrűség növekmény a 6,86 t/h feladáshoz és 47,1 m/s rotor kerületi sebességhez volt köthető, azonban ennek ellenére az ilyen diszperzitási tulajdonságokkal rendelkező szemcsék kihozatala mindössze 28%. A nyolc különböző berendezés üzemparaméter közül amelyiket

megvizsgáltam és a hatékonyság megállapításánál a kihozatalt is figyelembe vettem, a VSI berendezéssel sikerült elérnem a legjobb eredményt, $\dot{m}=3,25$ t/h és 56,5 m/s rotor kerületi sebességgel, ahol a mullit 0-1 mm-es termékkihozatal 69 %-nak adódott.

6.8. A röpítőtoros kísérleti eredmények átfogó értékelése

Miután megvizsgáltam különböző függvénykapcsolatok segítségével a mullit 1-3 mm-es frakció feladásából nagysebességű ütközéses (37,7-56,5 m/s) egyszemcse és szemcse-szemcse igénybevételű aprítással előállított termékeinek a szemcseméret-eloszlását és az ahhoz köthető mérőszámokat, szfericitás növekményét, halmazsűrűség növekményét, az alábbi megállapításokat teszem:

A mullit termékek szemcseméret-eloszlását, aprítási fokát és <1 mm frakció kihozatait megvizsgálva megállapítottam, hogy a HSI berendezés jellemzően egyszemcse igénybevétele nem alkalmas az 1-3 mm szemcseméretű feladás hatékony aprítására. Szemcsealakformálására azonban a 0,3-0,5 és a 0,5-1 mm-es frakciónál, amely szemcsék esetében a törési energiaszükséglet alacsonyabb, mint a finomabb frakcióknál, alkalmas lehetne. A fentebb említett két frakció felületéről levált szemcse fragmentumok jelenléte az 57. ábrán jól megfigyelhető, viszont az is, hogy a <1 mm termékfrakciók kihozatala elenyésző (6-9 %), ezért összességében nem javasolt a HSI berendezést sem aprítási sem szemcsealakformálási céllal ilyen anyagokra alkalmazni.

Megállapítottam, hogy a szemcse-szemcse kölcsönhatáson alapuló igénybevételi környezet (VSI), mind a négy megvizsgált szűken osztályozott mullit termékfrakció esetében kedvezőbb szemcsealakformálást biztosított, ezáltal magasabb halmazsűrűség növekmény érhető el ezen aprítási móddal, mint a hasonló üzemparaméterek mellett egyszemcse igénybevétellel előállított frakciók eseténben.

A bevezetett mutatók ($SPHT_{növ}$, $\rho_{halm,növ}$, $\Sigma SPHT_{növ}$, $\Sigma \rho_{halm,növ}$) és a VSI-HSI berendezéseken elvégzett aprítási kísérleteimmel, feltártam a rideg, kemény és koptató mullit szűken frakcionált termékszémcsék szemcsemérete, törési módja, szemcsealakja és a frakciók halmazsűrűsége közötti összefüggéseket, a feladási tömegáram és a rotor kerületi sebességének a függvényében.

A fentebb megnevezetett mutatókkal és a VSI-HSI aprítási kísérleteimmel igazoltam a 3. munkahipotézisem helyességét is a VSI berendezés esetére, miszerint a berendezésben kialakuló szemcse-szemcse igénybevételek alkalmasak az 1-3 mm-es mullit szemcsék hatékony aprításával egyidejűleg kivitelezett termék szemcsealakformálásra, következésképpen a vizsgált termékfrakciók halmazsűrűség-növelésére.

7. Összefoglalás

A doktori kutatómunkám során az aprítási igénybevételi környezet termékszemcsék alakjára gyakorolt hatását kutattam a magas alumínium-oxid tartalmú olvasztott termékek esetén.

A szakirodalmi összefoglaló alapján megállapítottam, hogy elenyésző számú tudományos közlemény foglalkozik a nagy mechanikai szilárdságú és abrazív anyagok zárt szemcseágyas lassú kompressziós aprításával. A kutatómunkám során, a szakirodalmi elmélyülést követően a következő három fő területre fókuszáltam:

1. Statikus zárt szemcseágyas aprítási vizsgálatokat végeztem el korunddal, dugattyúsprés berendezésben, megvizsgálva a dugattyúnyomás és szemcseágyvastagság hatásait a keletkezett termékfrakciók diszperzitási tulajdonságaira.
2. A statikus zárt szemcseágyas vizsgálati eredményeimet felhasználva egy laboratóriumi-félüzemi méretű nagynyomású örlőhengerpárt fejlesztettem ki, mellyel hatékonyan szabályozható a korundtermékek kihozatala és szemcsealakja és halmazsűrűsége.
3. Röpítőtörős kísérleteket folytattam le, 1-3 mm-es mullit feladás apríthatóságának vizsgálata érdekében, előtérbe helyezve a szemcseméret csökkentés során jelentkező szemcsealakformálás lehetőségeit vertikális és horizontális tengelyű kialakítású berendezések esetén.

Az első vizsgálatom során szisztematikusan felépített kísérlet sorozatokat végeztem el 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 síksztálással előállítva azt.

A töret szemcseméret és szemcsealak-eloszlásának meghatározására dinamikus képelemző berendezést alkalmaztam. Előzetes vizsgálatok alapján a szemcseszfericitás (SPHT) alakleíró paramétert alkalmaztam a szemcsealak vizsgálatára.

A különböző beállításokkal kivitelezett szemcseágyas töréssel előállított frakcionált termékek szemcsealak és halmazsűrűségváltozásának leírására újszerű, dinamikus mutatószámokat vezettem be.

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 kompaktációs 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 aprítás technológiai paraméterei és a céltermék és frakcióinak kihozatala, valamint szemcsealak és halmazsűrűségváltozása között fennállnak. Ennek szemléltetésére bevezettem az Ω mutatószámot, mely a törést és szemcse alakformálást jellemző hatékonysági mérőszám.

Végezetül megvizsgáltam két alapvető aprítási üzemparaméter hatását (V_{ker} - rotor kerületi sebesség és $\dot{m}$ - feladási tömegáram) a tudatosan megválasztott és előkészített 1-3 mm-es mullit szemcsékre VSI (Vertical Shaft Impactor -Vertikális Tengelyű Röpítőtörő) és HSI (Horizontal Shaft Impactor – Horizontális Tengelyű Röpítőtörő) berendezésekben.

A tudományos kutatásommal lefektettem a magas alumínium-oxid tartalmú szemcsés anyagalmazok terméktervezési alapjait, melynek eredményeképpen a következő megállapításokat teszem:

Meghatároztam a különböző korund termékfrakciók esetén a szemcsealagleíró paraméterek (b/l és SPHT) és a halmazsűrűség közötti összefüggéseket. Meghatároztam a termékfrakciókra jellemző átlagos szfericitás érték és a halmazsűrűség értékek közötti függvény kapcsolatot.

Megállapítottam, hogy a statikus zárt szemcseágyas aprítás során a szemcseágy vastagsággal és az alkalmazott nyomással a töretből előállított szűk szemcseméretfrakciókra jellemző átlagos szemcsealak és ezen keresztül az adott frakció halmazsűrűsége szabályozható.

Megállapítottam, hogy a statikus zárt szemcseágyas aprítás során, az ideális szemcseágyvastagságtól alacsonyabb szemcseágyvastagság esetén egy olyan hatékony aprítási mód érhető el, ahol a törési folyamat során keletkező termék szemcsék alakjának következtében az egyszemcse igénybevétellel előállított korund termékekhez képest nő a frakcionált termékek halmazsűrűsége.

A statikus zárt szemcseágyas aprítási kísérleteim során kimutattam, hogy a nem ideális szemcseágyvastagságú (az egyszemcse és az ideális szemcseágyas aprítás között elérhető) tranziens törési módszer által a szemcseágy vastagság és nyomás függvényében, más-más szemcseméretű termékfrakciók szemcse szfericitása és ezáltal halmazsűrűsége növelhető meg.

A statikus zárt szemcseágyas korundaprítási eredményeimet felhasználva berendezésfejlesztést hajtottam végre, amivel elérhetővé vált a folyamatos üzemű tudatos termékszabályozás a 0-1 mm-es szemcseméret tartományban, korund esetén.

Törési valószínűségen alapuló számítási alapelveket dolgoztam ki, mellyel egymásnak megfeleltethetővé válik a statikus zárt szemcseágyas aprítás során használt dugattyúnyomás értéke, a dinamikus zárt szemcseágyas aprításkor használt fajlagos hengerpalást nyomással.

Megállapítottam, hogy dinamikus zárt szemcseágyas aprítás során az 5 mm vastag szemcseágy különböző mértékben komprimálható, melyet a vizsgált hengerpalást kerületi sebességek növelése negatívan, az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomás minden esetben pozitívan befolyásolt. Emellett az alkalmazott hengerpalást kerületi sebesség növelése, minden megvizsgált esetben, csökkentette az alkalmazott fajlagos hengerpalást nyomás relevanciáját, alacsonyabb törési hatékonyságot eredményezve.

A szemcsealak és termékfrakciók együttes értékelésére bevezettem az Ω mérőszámot, melynek segítségével az üzemeltetési paraméterek hatása a töret szemcsealakjára és az egyes termékfrakciók kihozatalára együttesen értékelhető, ezáltal az adott folyamathoz tartozó optimális beállítások meghatározhatók. Megállapítottam, hogy a dinamikus zárt szemcseágyas aprításkor 0-0,15 és a 0,15-0,3 mm termékfrakciók esetén a $v_{ker}=72$ mm/s és a $p_{spec}=20,31$ MPa hatására képződik a legnagyobb tömegű és legszférikusabb szemcse, míg a 0,3-0,5 és 0,5-1 mm termékfrakciók esetén ugyanezen hatást a $v_{ker}=143$ mm/s és a $p_{spec}=6,88$ MPa alkalmazásával lehet biztosítani. A mérési pontokra illesztett függvények magas R^2 értékét figyelembevéve megállapítottam, hogy a fejlesztett HPGR berendezésen, 1-3 mm korund feladásból, 5 mm-es szemcseágy vastagság használatával milyen Ω mérőszám érhető el a $v_{ker}=72-143$ mm/s és $p_{spec}=6,88-20,31$ MPa mérési intervallumokban. Ezzel meghatároztam a saját fejlesztésű HPGR berendezés fő üzemparamétereinek hatását a keletkezett termékek tulajdonságfüggvényiére.

Megállapítottam, hogy az ütközés igénybevétele esetén a megvizsgált rotor kerületi sebességek tartományában, egy adott feladási tömegáram (3,25 t/h) mellett a magasabb rotor kerületi sebesség minden esetben finomabb mullit töretet eredményezett egyszemcse (HSI) és szemcse-szemcse (VSI) igénybevételek esetén is, illetve adott rotor kerületi sebesség mellett (47,1 m/s) mindig az alacsonyabb kaszkád arányú feladás alkalmazása vezet finomabb törethez, vagyis jobb aprítási hatékonysághoz.

Megállapítottam, hogy a szemcse-szemcse kölcsönhatáson alapuló igénybevételi környezet mind a négy megvizsgált szűken osztályozott mullit termékfrakció esetében kedvezőbb szemcsealakformálást biztosított, ezáltal magasabb halmazsűrűség növekmény érhető el ezen aprítási móddal, mint a hasonló üzemparaméterek mellett egyszemcse igénybevétellel előállított frakciók eseténben.

Summary

Based on the literature, it can be concluded, that negligible scientific paper deals with the comminution of highly abrasive materials that possesses high mechanical strength by confined particle bed comminution. During my doctoral research, the examination of the comminution condition's effect on the product properties with special regard to the particle shape was carried out for fused products with high aluminum-oxide content. The main objective of my investigation and research after the literature review was focused to the following three main areas:

1. Static confined particle bed compression experiments were carried out in piston press equipment to examine the effect of piston pressure and particle bed height on the dispersity properties of the product fractions.
2. Utilized my results from the static confined particle bed comminution experiments, a laboratory scale HPGR machine was developed and built, where the corundum product fraction yield, particle shape and bulk density can be controlled.
3. Vertical and horizontal shaft impact mill experiments were carried out to evaluate the possibilities of particle shaping during particle size reduction on 1-3 mm mullite particles.

In my first experiment, I carried out my research work with a piston press using a systematically constructed experimental and measuring system, during which I examined the effects of altering the particle-bed thickness (h) and the piston pressure (p) on the dispersity properties of the products in corundum. For the measurements, I consciously selected and prepared the feeding model material into a 1–3 mm corundum fraction, producing it by single-particle breakage and a linear sieving machine.

I used a Camsizer X2 device, which uses a dynamic image analysis method, to determine the particle size and shape distribution of the particles by dry dispersion. According to my preliminary results, the particle sphericity (SPHT) correlates more strongly with bulk density than with the particle length-width (b/l) ratio of the given narrowly classified fraction. Accordingly, I used the SPHT parameter to describe the particle shape.

I introduced novel dynamic metrics to describe the particle shape and bulk density changes of fractionated products produced by particle-bed comminution with different breakage parameters.

Subsequently, using my experiences and the measurement results of my experiments performed with the piston press, I developed a semi-industrial-sized, high-pressure grinding roller pair suitable for conducting scientific studies, with which continuous comminution of <5 mm corundum particles in a confined particle bed can be performed. The basis of the equipment was a high-pressure roller compactor. Through experimental studies, I have clarified the technical and scientific relationships that exist between the technological parameters of continuous, high-pressure, confined-particle-bed comminution and the yield of the target product and its fractions, as well as the change in particle shape and bulk density. To illustrate this, I have introduced the variable Ω , which is an efficiency measure characterizing breakage and particle shape formation.

Finally, I examined the effect of two basic comminution operating parameters (V_{cir} - rotor circumferential speed and $\dot{m}$ - feed mass flow on selected and prepared 1–3 mm mullite particles in VSI (Vertical Shaft Impactor) and HSI (Horizontal Shaft Impactor) equipment.

In line with the above, my scientific work has laid down the fundamentals of product design for particulate materials with high alumina content. As a result, the following findings can be stated:

The relationships between the particle shape parameters (b/l and SPHT) and the bulk density for different corundum product fractions was determined. The functional relationship between the average sphericity value and the bulk density values characteristic of the product fractions was determined.

In static particle bed compression, the average particle shape of the narrow particle size fractions and through this the bulk density of the given corundum fraction can be controlled by the thickness of the particle bed and the applied piston pressure.

The static confined particle bed comminution method with a lower particle bed height than its necessary for the ideal particle bed comminution defined by Schönert (1996), can lead to an effective comminution mode, that due to the breakage mode of the particles, their shape can improve the bulk density of the fractionated products compared to the bulk density of the fractionated corundum products manufactured by single particle breakage.

With my static confined particle bed comminution experiments it was found that the non-ideal particle bed height (transient between the single particle - particle bed) result in a transient breakage mode, that can increase the average particle sphericity and thus the bulk density of product fractions, depending on the particle bed height and piston pressure.

Utilized my results from static confined particle bed comminution experiments of corundum, a comminution equipment development was carried out to achieve a method of product property regulation under continuous operation for the 0-1 mm corundum particles.

A calculation method based on breakage probability was developed, which allows the piston pressure value used during static confined particle bed comminution to be compared with the specific cylinder wall pressure used during dynamic confined particle bed comminution.

With dynamic confined particle bed comminution, the 5 mm thick particle bed can be compressed to different degrees, which was negatively influenced by increasing the cylinder wall peripheral speed, and positively by the applied specific cylinder wall pressure in all cases. In addition, increasing the applied cylinder wall peripheral speed, in all cases examined, it reduced the relevance of the applied specific cylinder wall pressure, resulting in lower comminution efficiency.

For the comprehensive evaluation of particle shape of the product fractions, the Ω parameter was introduced, which can be used to evaluate the effect of the comminution equipment's operating parameters on the particle shape of the fraction and the yield of individual product fractions, thereby determining the optimal equipment settings for the given process can be carried out. I found that in dynamic confined particle bed comminution, in the case of 0-0.15 and 0.15-0.3-mm product fractions, the largest amount and most spherical particles are formed under the effect of $v_t=72$ mm/s and $p_{spec}=20.31$ MPa, while in the case of 0.3-0.5 and 0.5-1 mm product fractions, the same effect can be ensured by applying $v_t=143$ mm/s and $p_{spec}=6.88$ MPa.

Considering the high R^2 value of the functions fitted to the measurement points, I determined what Ω value can be achieved on the developed HPGR equipment, using a 1-3 mm corundum feed and a 5 mm particle bed thickness, in the measurement intervals $v_t=72-143$ mm/s and $p_{spec}=6.88-20.31$ MPa. With this, I determined the effect of the main operating parameters of the self-developed HPGR equipment on the property functions of the products.

The impact loading in the examined range of rotor peripheral velocities at a given feed mass flow rate (3.25 t/h), the higher rotor peripheral velocity always resulted in a finer mullite

product in the case of single particle (HSI) and particle-to-particle (VSI) stress, and at a certain rotor peripheral velocity (47.1 m/s), the use of a lower cascade ratio loading always leads to a finer product and better comminution efficiency.

The stress environment based on particle-to-particle interaction provided more favorable particle shape formation in the case of all four narrowly classified mullite product fractions examined, thus a higher bulk density increase can be achieved with this comminution method, than the fractions produced with single-particle stressing under similar operating parameters.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok a tudományos témavezetőimnek Dr. Rácz Ádámnak és Prof. Dr. Mucsi Gábornak a doktori kutatásom során nyújtott segítségükért, valamint amiért már a kutatásom megkezdése előtt is bátorítottak a PhD fokozat megszerzésére a munkám mellett. Az elmúlt évek során nyújtott segítőkész támogatásuk nélkül a disszertációm nem valósulhatott volna meg a jelenlegi formájában. Különösképpen hálás vagyok az elmúlt közel 5 évért Dr. Rácz Ádám tanáromnak, hogy tovább dolgozhattunk együtt az Msc-s diákévem után, ennek köszönhetően munkámból hivatássommá vált az előkészítéstechnika.

Ezúton szeretném megköszönni a vállalati témavezetőmnek, Puskás Ferencnek, hogy az innovatív szemléletmódjának köszönhetően, minden vállalati segítséget megadva igyekezett a doktori kutatásom támogatásában.

Köszönetet mondok Antal Gábornak a hidraulikus-pneumatikus rendszerrel kapcsolatos szakmai segítségéért.

Szeretném megköszönni a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítés és Környezettechnológia Intézet igazgatójának Dr. Nagy Sándor Mártonnak, hogy támogatott az intézeti háttér biztosításával a disszertációm elkészítésében. Ezúton mondok köszönetet az intézet minden további tagjának, akik a kutatásom során segítséget nyújtottak számomra.

Végül, de nem utolsó sorban, köszönetet mondok családomnak szerető támogatásukért.

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból

finanszírozott szakmai támogatásával készült.



Szakirodalom jegyzék

A method for fine and very fine comminution of brittle material_behavior materials; Patent number: DE2708053A1 (1977)

Abouzeid. Abdel-Zaher M. A., Seifelnassr. A. A. S., Zain. G. és Mustafa. Y. S. (2018): Breakage Behavior of Quartz Under Compression in a Piston Die, Mining, Metallurgy & Exploration <https://doi.org/10.1007/s42461-018-0027-5>.

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

Al-Rousan. T., Masad. E., Tutumluer. E. és Pan. T. (2007) Construction and Building Materials 21, 978–990.

Ali. A.Y. és Bradshaw. S.M. (2011): Confined particle bed breakage of microwave treated and untreated ores, Minerals Engineering 24 (2011) 1625–1630.

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

APLINGO. A. és BWALYA. M. (1997): EVALUATING HIGH PRESSURE MILLING FOR LIBERATION ENHANCEMENT AND ENERGY SAVING, Minerals Engineering, Vol. 10. No. 9, pp. 101~1022. 1997.

Arbiter. N, Harris. C. C. és Stambolzis. G. A. (1969): Trans. SME/AIME 244, 118.

Austin. L.G., Weller. K.R. és Lim. I.L. (23–28 May 1993): Phenomenological Modelling of the High Pressure Grinding Rolls. In Proceedings of the XVIII International Mineral Processing Congress, Sydney, Australia, pp. 87–95.

Barrios. G.K.P., Jiménez-Herrera. N. és Tavares. L. M. (2020): Simulation of particle bed breakage by slow compression and impact using a DEM particle replacement model, Advanced Powder Technology Volume 31, Issue 7, July 2020, Pages 2749-2758.

Baumgardt. S., Buss. B., May. P. és Schubert. H. (1975): On the comparison of results in single grain crushing under different kinds of load, Proc. 11th Int. Miner. Process. Congress, Cagliari, 3.

Bengtsson. M. (2021): Empirical energy and size distribution model for predicting single particle breakage in compression crushing, Minerals Engineering 171 (2021) 107094

Bengtsson. M. és Evertsson. M. C. (2006): Measuring characteristics of aggregate material from vertical shaft impact crushers, Minerals Engineering 19 (2006) 1479–1486, doi:10.1016/j.mineng.2006.08.003

Bergstrom. B. H., Sollenerger. C.L. és Mitchel Jr. W. (1961): Trans. SME/AIME 220, 367.

Bond. F. C. (1946): Crushing tests by pressure and impact, Mining Technology, Technical Publication No. 1895. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 169, 58-65.

Briggs. C. és Evertsson. M. C. (1998): SHAPE POTENTIAL OF ROCK, *Minerals Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 125-132,*

Bulled. D. és Husain. K. (2008): The development of a small-scale test to determine work index for High Pressure Grinding Rolls, SGS MINERALS SERVICES TECHNICAL PAPER 2008-49, In Proceedings 2008, Ottawa, ON, Canada.

Butler. P. B., Haworth. M. E. Elban. W. L. és Coyne Jr. P. J. (1990): Particle Morphology Characterization of Quasi-Static Powder Compacted Sucrose, Powder Technology, 62 (1990) 171 – 181.

Campos. T.M., Bueno. G., Barrios. G.K. és Tavares. L.M. (2019): Pressing iron ore concentrate in a pilot-scale HPGR. Part 1: Experimental results. Minerals Engineering, 140, 105875. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.105875

Campos. T.M., Bueno. G., Rodriguez. V.A., Böttcher. A.C, Kwade. A., Mayerhofer. F. és Tavares. L.M. (2021): Relationships between particle breakage characteristics and comminution response of fine iron ore concentrates, Minerals Engineering 164 (2021) 106818.

Campos. T.M., Petit. H.A., Freitas. R.O., Tavares. L.M. (2023): Online prediction of pressing iron ore concentrates in an industrial HPGR. Part 1: Modeling approach, Minerals Engineering Volume 201, October 2023, 108206. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108206>

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

Chelgani. S.C., Nasiri. H. és Tohry. A. (2021): Modeling of particle sizes for industrial HPGR products by a unique explainable AI tool- A “Conscious Lab” development, Advanced Powder Technology Volume 32, Issue 11, November 2021, Pages 4141-4148. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2021.09.020>

Chen. K. és Yin. W. (2022): Differences in Early Rejection of Gangue for Low-Grade Iron Ores with Different Textures from HPGR; Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review; <https://doi.org/10.1080/08827508.2022.2155154>

Cleary. P.W. és Sinnott. M.D. (2021): Axial pressure distribution, flow behaviour and breakage within a HPGR investigation using DEM, Minerals Engineering Volume 163, 15 March 2021, 106769. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106769>

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

Csóke. B., Hatvani. Z., Papanastassiou. B. és Solymár. K. (2004): Investigation of grindability of diasporic bauxites in dry, aqueous and alkaline media as well as after high pressure crushing. International Journal of Mineral Processing. Volume 74, Supplement, 10 December 2004, Pages S123-S128

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

Dicke. R. és Van Der Meer. F.P. (2008): Humboldt Wedag high pressure grinding rolls in ore dressing. 11th International Mineral Processing Symposium, Belek-Antalya, Turkey, p. 75

Djordjevic. N. és Morrison. R. (2006): Exploratory modelling of grinding pressure within a compressed particle bed, *Minerals Engineering* 19 (2006) 995–1004.

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

Esnault. V.P.B., Zhou. H. és Heitzmann. D. (2015): New population balance model for predicting particle size evolution in compression grinding, *Minerals Engineering* Volume 73, 15 March 2015, Pages 7-15.

EVERTSSON. C.M. és BEARMAN. R. A. (1997): INVESTIGATION OF INTERPARTICLE BREAKAGE AS APPLIED TO CONE CRUSHING, *Minerals Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 199-214, 1997.

FANDRICH. R. G., BEARMAN. R. A., BOLAND. J. és LIM. W. (1997): MINERAL LIBERATION BY PARTICLE BED BREAKAGE, *Minerals Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 175-187, 1997.

Feige. F. (1993): Current state of development in high compression. *Zement-Kalk-Gips* 11, 305–312.

Folien_MVT_2neu Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie Zerkleinerung
Prof. Dr. J. Tomas 15.03.2014

Franchich. R. G., Clout. J. M. F. és Bourgeois. F. S. (1998): *Miner. Eng.* 11, 861

Fuerstenau. D. W., Gutsche. O. és Kapur. P. C. (1996): Confined particle bed comminution under compressive loads, *Int. J. Miner. Process.* 44-45 (1996) 521-537.

Genc. Ö., Ergün. L. és Benzer. H. (2004): Single particle impact breakage characterization of materials by drop weight testing, *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 38, 241-255.

Guevara. F. és Menacho J. (1993): Modelación mecánica y metalúrgica del molino de rodillos de alta presión. Centro de Investigación Minera y Metalúrgica, Santiago de Chile, 547-563

Gutsche. O. és Fuerstenau. D.W. (2004): Influence of particle size and shape on the comminution of single particles in a rigidly mounted roll mill, *Powder Technology* 143– 144 (2004) 186– 195.

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.

Heiskanen. K. és Nagaraj. D. R. (2012): Obituary Professor, Dr. Habil. Klaus Schönert 1927–2011, *International Journal of Mineral Processing* 102–103, 161,

Hickel. G. C., Boaventura. G. C., Souza. R. A., Calcada. L. M., Casali. J. M., Betioli. A. M. és Oliveira. A. L. (2018): Influence of crusher type in the shape of fine crushed aggregate grains, *IBRACON Structures and Materials Journal*, Volume 11, 902-930, doi:10.1590/s1983-41952018000400013

Hosten. C. és Cimilli. H. (2009): The effects of feed size distribution on confined-bed comminution of quartz and calcite in piston-die press, *Int. J. Miner. Process.* 91 (2009) 81–87.

<https://www.nae.edu/190090/KLAUS-SCHOENERT-19272011>

Hurley. R., Marteau. E, Ravichandran. G és Andrade. J. É. (2014): Extracting inter-particle forces in opaque granular materials: Beyond photoelasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 63(2014)154–166

Jiang. H, Zhou. Y.D. és Zhang. C.H. (2021): Interpretation of breakage characteristics of particle beds from confined compression tests, *Powder Technology* 378 (2021) 317–326.

Jiang. H., Zhou. Y-D., Wang. J-T. és Zhang. C-H. (2021): Micromechanical investigation of particle breakage behavior in confined compression tests, *Computers and Geotechnics* 133 (2021) 104075.

Jiang. H., Zhou. Y. D., Chi. C.J. és Zhang. C.H. (2018): Transparent confined compression tests on particle beds: Observations and implications, *Powder Technology* 336 (2018) 339–349.

Kalala. J.T., Dong. H. és Hinde. A.L. (2011): Using piston-die press to predict the breakage behaviour of HPGR. Vancouver, BC, Canada.

KANDA. Y., OYAMADA. T., KANEKOT. K. és SANOS. S. (1996): TECHNICAL NOTE THE COMPRESSIVE CRUSHING OF QUARTZ IN A POWDER BED - THE EFFECT OF FEED SIZE ON GRINDABILITY, *Minerals Engineering*, Vol. 9. No. 4. 475-480.

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 Engineering Michigan Technological University, DOE Award Number: DEFC26-01NT41062, Via the internet, January 2023, <https://www.osti.gov/servlets/purl/887498>

Kaya. E., Hogg. R és Kumar. S.R. (2002): Particle Shape Modification in Comminution, *KONA Powder and Particle Journal* 20:188-195, DOI:10.14356/kona.2002021

Kellerwessel. H. (1990): High pressure material bed comminution in practice. *Zement-Kalk-Gips* , 2, 57–64.

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.

Kenny. W. J. és Piret. E. L. (1961): *Trans. AICHE* 7, 199.
<https://doi.org/10.1002/aic.690070207>

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

Khanal. M., Schubert. W. és Tomas. J. (2007): Discrete element method simulation of bed comminution, *Minerals Engineering* 20 (2007) 179–187.

Klymowsky R., Patzelt N., Knechtz J., Burchardt E., Selection and Sizing of High Pressure Grinding Rolls, in: A.L. Mular, D.N. Halbe, and D.J. Barratt (Eds.), *Mineral Processing Plant Design, Practice, and Control Proceedings*, 2002, pp. 636–668.

Kobayashi. R. (1970): On mechanical behaviours of rocks under various loading-rates, *Rock Mech. Japan* 1, 56–58.

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>

Kou. S.Q., Liu. H.Y, Lindqvist. P.-A., Tang. C.A. és Xu. X.H. (2001): Numerical investigation of particle breakage as applied to mechanical crushing Part II: Interparticle breakage, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38 (2001) 1163–1172.

Krekel. J. és Polke. R. (1992): *Chem.-Ing.-Techn.* 64 (6), 528-535.

Kumar. A., Wang. C., Gong. D., Saud. C., Pamparana. G. és Klein. B. (2023): Development of Locked-cycle piston press test procedure to simulate closed circuit HPGR comminution, *Minerals Engineering Volume* 201, October 2023, 108160.

Li. L., Wie. B., Zhang. Q., Zhang. J., Zhang. X., Wang. C., Li. N. és Liu. Z. (2022): Evaluating the performance of an industrial-scale high pressure grinding rolls (HPGR)-tower mill comminution circuit; *Minerals Engineering*; <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107973>

Lieberwirth. H. és Kühnel. L. (2021): Particle Size Effects on Selectivity in Confined Bed Comminution, *Minerals* 2021, 11, 342. <https://doi.org/10.3390/min11040342>

Liu. H.Y, Kou. S.Q és Lindqvist. P.-A. (2005): Numerical studies on the inter-particle breakage of a confined particle assembly in rock crushing, *Mechanics of Materials* 37 (2005) 935–954.

Liu. L. X. és Powell. M. (2016): New approach on confined particle bed breakage as applied to multicomponent ore, *Minerals Engineering* 85 (2016) 80–91.

Ma. G., Zhou. W. és Chang. X-L. (2014): Modeling the particle breakage of rockfill materials with the cohesive crack model, *Computers and Geotechnics* 61 (2014) 132–143.

Madloul. N.A., Saidur. R., Hossain.M.S. és N.A. Rahim. (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.

Márkus. I. R. és Rácz. Á. (2022): ASSESING SINGLE PARTICLE BREAKAGE CHARACTERISTICS OF ANDESITES FROM TÁLLYA, Új eredmények a műszaki föld- és környezettudományban 2022, 344-350.

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

- Michaelis. H.V.O.N. (26–30 October 2009): How energy efficient is HPGR? In Proceedings of the World Gold Conference, Gauteng, South Africa,
- Morley. C. (2006): High-Pressure Grinding Rolls—A technology review. In Advances in Comminution; Kawatra, S.K., Ed.; SME: Littleton, CO, USA, pp. 15–40.
- Müller. F. (1989): Hochdruckzerkleinerung im Gutbett bei Variation von Feuchte und Beanspruchungsgeschwindigkeit, dissertation, TU Clausthal.
- Mütze. T. és Husemann. K. (2008): Compressive stress: Effect of stress velocity on confined particle bed comminution, Chemical Engineering Research and Design 86 (2008) 379–383
- Mütze.T. (2015): Energy dissipation in particle bed comminution, Volume 136, 10 March 2015, Pages 15-19.
- Mütze.T. (2016): Modelling the stress behaviour in particle bed comminution, Volume 156, 10 november 2016, Pages 14-23.
- Nagataa. Y., Tsunazawab. Y., Tsukadac. K., Yaguchid. Y., Ebisue. Y. és Mitsushashie. K. Tokorof C. (2020): Effect of the roll stud diameter on the capacity of a high-pressure grinding roll using the discrete element method, Minerals Engineering 154, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106412>
- Napier-Munn T. J. (2015): Is progress in energy-efficient comminution doomed? Minerals Engineering, v. 73, p. 1-6.
- Napier-Munn. T. J., Morrell. S., Morrison. R. D. és Kojovic. T. (1996): Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization, University of Queensland, Brisbane.
- Numbi. B.P. és Xia. X. (2015): Systems optimization model for energy management of a parallel HPGR crushing process. Applied Energy, 149, 133-147.
- Oettel. W., Husemann. K. (2004): The effect of a grinding aid on comminution of fine limestone particle beds with single compressive load, Int. J. Miner. Process. 74S (2004) S239–S248.
- Oettel. W., Nguyen. A.-Qu., Husemann. K. és Bernhardt. C. (2001): Comminution in confined particle beds by single compressive load, Int. J. Miner. Process. 63 Ž2001. 1–16.
- Ozcan. O. és Benzer. H. (2013): Comparison of different breakage mechanisms in terms of product particle size distribution and mineral liberation, Minerals Engineering 49 (2013) 103–108.
- Pamparana. G. és Klein. B. (2021): A methodology to predict the HPGR operational gap by using piston press tests, Minerals Engineering 166 (2021) 106875
- Pamparana. G., Klein. B. és Bergerman. M.G. (2022): Methodology and Model to Predict HPGR Throughput Based on Piston Press Testing, Minerals 2022, 12(11), 1377; <https://doi.org/10.3390/min12111377>
- 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>

Perkins. R., Green. S. és Friedman. M. (1970): Uniaxial stress behaviour of porphyritic tonalite at strain rates to 103 /second, Int. J. Rock Mech. Mining Sci. 7, 527–535.

Peukert. W. (2004): Material properties in fine grinding, International Journal of Mineral Processing 74S (2004) S3-S17.

Plath. H. (2005): High pressure grinding rolls for copper–gold ores and other mineral applications. McGill Professional Development Seminar Notes.

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.

Powell. M.S., Hilden. M.M., Evertsson. C.M., Asbjörnsson. G., Benzer. A.H., Mainza. A.N., Tavares. L.M., Davis. B., Plint. N. és Rule. C. (2017): Optimisation opportunities for high pressure grinding rolls circuits. In We Are Metallurgists, Not Magicians! Australian Institute of Mining and Metallurgy (Organisation): Carlton, Australia, Volume 1, pp. 483–498.

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

Rodriguez. V.A., Barrios. G.K.P. és Tavares. L. M. (2022): Coupled DEM-MBD-PRM simulations of high-pressure grinding rolls. Part 2: Investigation of roll skewing, Minerals Engineering Volume 178, 15 March 2022, 107428. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107428>

Rodriguez. V.A., Barrios. G.K.P., Bueno. G. és Tavares. L. M. (2022): Coupled DEM-MBD-PRM simulations of high-pressure grinding rolls. Part 1: Calibration and validation in pilot-scale, Minerals Engineering Volume 177, February 2022, 107389. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107389>

Rosario. P. P. (2010) Comminution Circuit Design and Simulation for the Development of a Novel High Pressure Grinding Roll Circuit, 10.14288/1.0071477 <https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/24/1.0071477/1>. Letöltve: 2024.04.13. Doktori Értekezés.

Rumpf. H. (1967): Staub Reinhalt. Luft 27 (1), 3-13.

Rumpf. H. (1973): Powder Technology. 7, 145.

Santosh. T., Eswaraiyah. C., Soni. RK: és Kumar. S. (2022): Size reduction performance evaluation of HPGR/ball mill and HPGR/stirred mill for PGE bearing chromite ore; Advanced Powder Technology; <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103907>

Saramak. D. (2011): Technological issues of high-pressure grinding rolls operation in ore comminution processes. Archives of Mining Sciences, 56, 517-526

Saramak. D. és Naziemiec. Z. (2013): Determination of the nip zone angle in high-pressure grinding rolls. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* 49(1):243-254 DOI:10.5277/ppmp130122

Schönert K., Lubjuhn. U., Throughput of High Compression Roller Mills with Plane and Corrugated Rollers, in: 7th European Symposium on Comminution, Ljubljana, 1990, pp. 149–158.

Schönert. K. (1966): Einzekorn-Druckzerkleinerung and Zerkleinerungskinetik Untersuchungen an Kalkstein-, Quarz- and Zementklinkerkornern des Großenbereiches 0,1-3 mm, Diss., TH Karlsruhe

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

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

Schönert. K. (1991): *Aufbereit.-Tech.* 32) 487.

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.

Schönert. K. (2003): Bruchvorgänge und Mikroprozesse des Zerkleinerns, in: H. Schubert, (Ed.), *Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

Schönert. K. és Flügel. F. (1980): Zerkleinerung spröder Minerale im hochkomprimierten Gutbett. European Symposium, Particle Technology, Preprints Vol. A, Dechema, Frankfurt, pp. 82-95.

Schönert. K. és Knobloch. O. (1984): Cement grinding in the twin-roll mill. *Zement-Kalk-Gips* 11, 563–568.

Schubert. H. (1987): *Aufbereit.-Tech.* 5, 237.

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 Höfter, 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

Shen. S., Han. Y., Hao. X., Chen. P., Li. A., Wang. Y., Zhang. J., Feng. W., Fei. J. és Jia. F. (2023): Analysis of the breakage characteristics of rice particle beds under confined compression tests, *Powder Technology Volume* 418, 15 March 2023, 118319.

Tamás. L és Rácz. Á. (2022) Material bed compression experiments and the examination of the bulk density of the product, *Geosciences and Engineering*: 10: 15 pp. 97-109.

- Tamás. L és Rácz. Á. (2023): Effect of material bed compression on white fused corundum product particle shape and bulk density, Open Ceramics Volume 16, December 2023, 100489.
- Tarján. I., Csőke. B., Faitli. J., (1999) The Investigation of Airing Out at Compacting Fine Granular Challenges of an Interdisciplinary Science. (Ed. Lakatos, I.) Akadémiai Kiadó Bp., 275-284
- Tavares. L. M. (2007): Breakage of Single Particles: Quasi-Static, Chapter 1, Handbook of Powder Technology, Volume 12, 33-51.
- Tavares. L. M. és King. R. P. (1998): Int. J. Miner. Process. 54, 1.
- Thivierge. A., Bouchard. J. és Desbiens. A. (2022): Unifying high-pressure grinding rolls models, Minerals Engineering Volume 178, 15 March 2022, 107427. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107427>
- Thomazini. A.D., Trés. E.P., Macedo. F.A.D., Athayde. M., Bueno. G., Fernandes R.B. és Nunes. R.A.P. (2020): Development of a novel grinding process to iron ore pelletizing through HPGR milling in closed circuit. Mining, Metallurgy & Exploration, 37, 933–941.
- Torres. M. és Casali. A. (2009): A novel approach for the modelling of high-pressure grinding rolls. Minerals Engineering 22, 1137–1146
- Tromans D., 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>
- Tsoungui. O., Vallet. D. és Charmet. J.C. (1999): Numerical model of crushing of grains inside two-dimensional granular materials, Powder Technology 105 1999. 190–198.
- Unland. G. (2007): The Principles of Single-Particle Crushing, Chapter 4, Handbook of Powder Technology, Volume 12, 151.
- Unland.G, és Sczelina.P. (2004): Coarse crushing of brittle rocks by compression International Journal of Mineral Processing 74(26) DOI:10.1016/j.minpro.2004.07.030
- 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.
- Van Schoor. J. C. R. (2012): Evaluation of the batch press as a laboratory tool to simulate high and medium-pressure roller crushers, <https://repository.up.ac.za/handle/2263/37315>, Letöltve: 2024.04.13. MSc Diplomamunka.
- Vizcarra T.G., Wightman E.M., Johnson N.W. és Manlapig E.V. (2010): The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores, Minerals Engineering 23 (2010) 374–382.
- Von Seebach H. M., E. Neumann és L. Lohnherr. (1996): State-of-the-art of energy-efficient grinding systems. Zement-Kalk-Gips 49(2):61–67.
- Wang. C. (2013): COMPARISON OF HPGR - BALL MILL AND HPGR - STIRRED MILL CIRCUITS TO THE EXISTING AG/SAG MILL - BALL MILL CIRCUITS,

<https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/24/1.0073557/1> Letölve: 2024.04.13. MSc diplomamunka.

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

Yang. Y és Cheng. Y.M. (2015): A fractal model of contact force distribution and the unified coordination distribution for crushable granular materials under confined compression, Powder Technology 279 (2015) 1–9.

Yashima. S., Kanda. Y. és Sano. S. (1987): Powder Technology. 5, 277.

Yashima. S., Morohashi. S. és Saito. F. (1979): Science Reports of Research Institutes, Tohoku University, 28, 116.

Zhu De-qing, Yu Wei, Zhou Xian-lin és Pan Jian. (2014): Strengthening pelletization of manganese ore fines containing high combined water by high pressure roll grinding and optimized temperature elevation system. Journal of Central South University, 21(9): 3485–3491. DOI: 10.1007/s11771-014-2326-4

Zou. Y., Zhang. C., Gou. D., Cheng. G. és Yang. R. (2023): DEM analysis of wear evolution and its effect on the operation of a lab-scale HPGR mill, Minerals Engineering Volume 204, December 2023, 108401. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108401>

Mellékletek

M.1. Az alkalmazott laboratóriumi és félüzemi berendezések bemutatása

Laboratóriumi dugattyúsprés

A törési kísérleteket a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítés és Környezettudományi Intézetében kifejlesztett és legyártott laboratóriumi dugattyúsprés berendezésén folytattam le. A berendezésben kettő hidraulikus dugattyú található, melyből a felső 200 kN préselő kifejtésére képes, az alsó pedig az anyagkiemelést segíti elő. A hidraulikus körön beállított nyomásértékkel szabályozható a törés során létrehozott törőerő, illetve az igénybevétel sebessége, tehát a dugattyúmozgás sebessége is tetszőlegesen változtatható az 5-35 mm/s tartományban. Az 1.M.1. táblázat tartalmazza a legfontosabb geometriai és üzemparamétereket, melyeket a szemcseágyas törés során figyelembe kell venni.

Dugattyú átmérő	25 mm
Dugattyú nyomósebesség	34,5 mm/s
Nyomás Ø 25 mm	125-250 MPa
Szemcseágy vastagság	5-25 mm

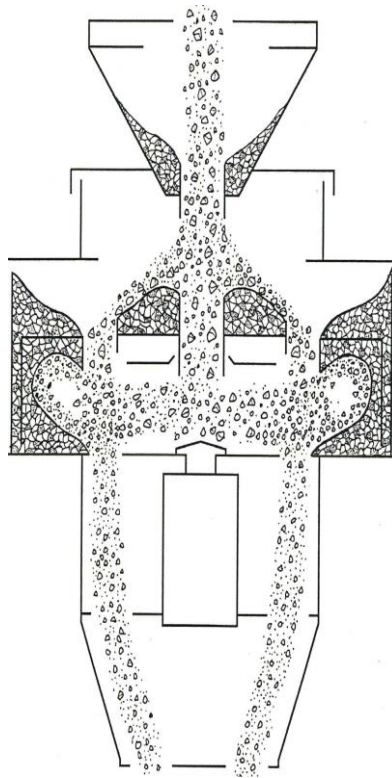
1.M.1. táblázat. Az alkalmazott geometriai és üzemparaméterek a laboratóriumi dugattyúspréssel kivitelezett szemcseágyas aprítás során



1M.1. ábra. Laboratóriumi dugattyúsprés

Vertikálistengelyű röpitőtörő (Barmac 2400 DUOpactor)

A röpitőtörő berendezéseknél megkülönböztettünk vertikális és horizontális tengellyel meghajtott berendezéstípusokat. A vertikális tengelyű Barmac által gyártott 2400 DOUpactor törőgép a „rock-on-rock” törési módot biztosító berendezés, melyben szemcse-szemcse és szemcseágyas törés érhető el, akár 100 m/s sebességű kompressziós igénybevétel segítségével. A berendezésben kialakuló anyagáramok útját az 1M.2. ábra szemlélteti. Látható, hogy az adagolóvályún keresztül folyamatosüzemben, axiálisan táplálva jut el a főanyagáram a rotorba, ahol három kiadagoló nyíláson át kezdetben a páncélzatnak, majd az ott felépülő szemcseágyaknak ütközve jön létre a szemcsék igénybevétele. Abban az esetben, ha a feladási tömegáram túllépi az adott beállításokhoz tartozó maximális feladható értéket a tisztán rotoron át megvalósított adagolással, úgynevezett kaszkád üzemmód felé kezd el tolni a berendezés üzemviszonya. Ennek a folyamatnak a során egy másodlagos anyagáram jön létre, mely egy szemcsefüggőként zuhan a rotorból kilépő szemcsék elé, ezzel túltöltve az őrlőteret szemcsékkel, növelve az igénybevételek számát, mely energetikailag hatékonyabb fajlagos aprítási munkát fog eredményezni.



1M.2. ábra. Barmac 2400 DUOpactorban az anyagáramlást bemutató ábra

A 1M.3. ábrán (b) látható, a rotor kilépőnyílásain kihordott anyag, illetve az ebből felépült szemcseágy az őrlőtérben, mely nagyban redukálja a gép fajlagos kopását. A (j) ábrarészen látható, a kaszkád üzemmódban kialakult anyagkúp a rotor felső részén.



1M.3.ábra. (b) a rotorban és az őrlőtérben kialakult szemcseágy, (j) a rotor felső részén kialakult szemcseágy a kaszkád üzem következtében

Horizontális tengelyű röpitőtörő (AJG RTE - 40/25)

Mint a berendezés neve is mutatja, ebben az esetben az energiaátadás a rotorra egy horizontálisan elhelyezkedő tengely segítségével történik meg. A törőgép kialakításából adódóan, a páncélzatra nincs lehetősége szemcseágnak felrakódnia, vagy csak nagyon speciális körülmények között. Ennek következtében a gépre a szemcse – felület ütközés közben kialakuló igénybevétel jellemző. Az igénybevételi sebesség, tehát a rotor kerületi sebesség hasonló tartományban biztosít mérési lehetőséget, mint a Barmac 2400 DOUpactor esetén lehetséges. A berendezés páncélzatának egy része, melyen a feladott szemcsék ütközéses igénybevétele történik meg, a 1M.4. ábrán látható.

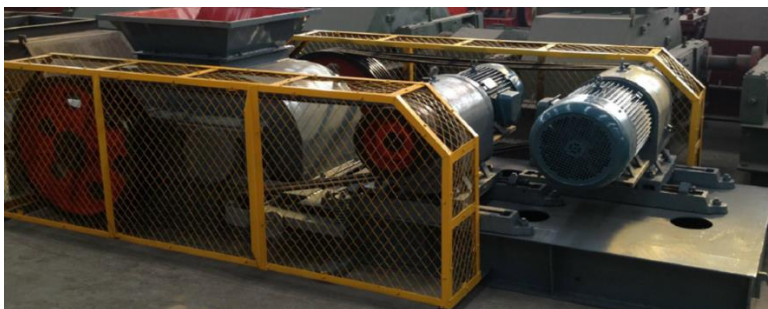


1M.4.ábra. AJG RTE – 40/25 horizontális tengelyű röpitőtörő páncélzatának egy része

Üzemi hengerestörő és pofástörők

Az üzemi méretű hengerestörő és pofástörő berendezések a Refra-System Kft. telephelyein találhatóak meg, ahol a korund és mullit minták előállítására használtam őket, ahogy azt a 3.3. fejezetben közöltem.

Az üzemi méretű hengerestörő esetén az aprító igénybevételnek kitett szemcsék behúzásra kerülnek az egymással ellenétes forgási iránnyal mozgó hengerpár közé. A hajtómotorok 11kW és 17 kW beépített névleges teljesítménnyel rendelkeznek, a hengerek átmérője pedig 600 mm és 500 mm hosszúságúak. A törés során alkalmazott feladási tömegáram 2 t/h volt, mely biztosította, hogy a feladás egyszemcsetörési igénybevételt szenvedjen el. Szintén ennek a törési módnak a létrehozására szolgált a beállított 0,5 mm-es résméret is. A hengerpalástok felülete sima, anyaguk ötvözetlen acél. A berendezés a 1M.5. ábrán látható.



1M.5. ábra. Üzemi méretű hengerestörő

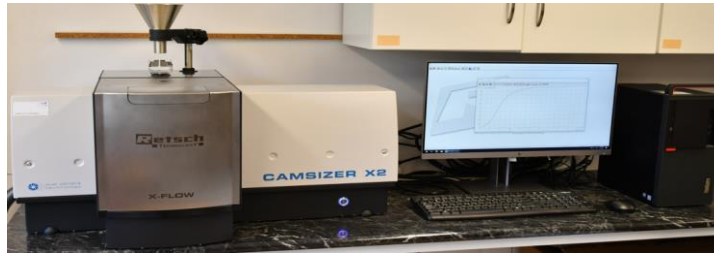
Az üzemi méretű pofástörő berendezések a 300 kg tömegű olvasztott korund és mullit tömbök durva előtörésére lettek alkalmazva. A két berendezést az Aprítógépgyár Rt. építette, típusaik szerint egyingás PEU IV. és VI-os pofástörő gépek.

RETSCH CAMSIZER X2 dinamikus képelemző

Mind a kompressziós egyszemcseigénybevétellel előállított, mind a különböző szemcseágynyomással és ütközéssel letört szemcsefrakciók szemcsealakelemzéséhez a CAMSIZER X2 dinamikus képelemző berendezést használtam, a korund és mullit minták esetében is. A berendezést száraz üzemmódban használtam, olyan különleges munkafájl alkalmazása mellett, amivel 15 μm -es osztályszélességgel vizsgálhattam meg, az adott frakció szemcséinek a különböző szemcsealakeíró paraméterét.

A mérőberendezés működését tekintve, a méréseim során a feladott szemcséket egy légáramban diszpergáltam, amit kettő nagysebességű kamera 300 kép/másodperc fényképezett és egy computer értékelt ki folyamatosan a mérés során, ezután összegezte azt egy mérési eredmény fájlban.

A szemcsealakeíró paraméterek meghatározásához, az X_{cmin} érték szolgált alapul, mely a berendezés kézikönyve szerint, azaz érték, mely leginkább összevethető a szitaanalízis eredményével. Az X_{cmin} meghatározása során, az X_c húr a diszpergált szemcse kamerák általi pásztázási irányára merőleges, a szemcse kontúrvonalait alkotó két határpont közti maximális távolságot méri a berendezés, majd ebből a program meghatározza az X_{cmin} értékét. Az X_{cmin} értéke tehát, az összes mért X_c érték közül a legkisebb értékű eredmény lesz. Felhasználtam továbbá a $X_{\text{Fe}_{\text{max}}}$ mért értékét is a szemcsehosszúság-szélesség (b/l) meghatározására. Az $X_{\text{Fe}_{\text{max}}}$ a szemcse leghosszabb mért Feret-átmérője. A mérőberendezés mely az 1M.6. ábrán látható számos alakleíró paraméter meghatározására képes, mely mérési és számítási metódus alapját a mintát alkotó szemcseszám, a szemcsefelület vagy a szemcsetérfogat is képezheti.



1M.6.ábra Retsch CAMSIZER X2 dinamikus képelemző

Retsch AS 200 TAP laboratóriumi szitaberendezés

A berendezés szitaanalízis kivitelezésére alkalmas laboratóriumi méretben és minőségben, melynek eredményeiből meghatározható a feladott anyag szemcseméret-eloszlásfüggvénye. A berendezésbe behelyezett szitasor, ellipszis alakú horizontális irányú ciklikus mozgást végez, melynek során meghatározott ciklusonként egy ütés éri a szitákat. A méréseim során a szitasor 280 fordulatot tett meg percenként, míg az ütések száma 150 darab volt percenként. A teljes szitasorra feladott anyagmennyiség minden elemzésnél 100 g volt, melynek szitamaradványait minden esetben tömegállandóságig szitáltam. A berendezés a 1M.7. ábrán látható.



1M.7. ábra. Retsch AS 200 TAP laboratóriumi szitaberendezés

MSZ 6506-84 szerinti halmazsűrűségmérő berendezés

A különböző korund és mullit frakciók halmazsűrűségének megállapítására az MSZ 6506-84 szerinti szabványosított eljárást alkalmaztam. A mérés során, egy kúpos adagolóból legalább 1200 g tömegű száraz mintát adagolunk ki egy 20 mm átmérőjű kiömlőn keresztül egy gyűjtőtartályba. A gyűjtőtartály $76 \pm 0,05$ mm-el a kúpos adagoló kiömlőnyílása alatt helyezkedik el, azzal megegyező függőleges tengelyvonalon. Az adagoló mechanikus zárszerkezetét megnyitva, a feladott anyag megtölti az alatta elhelyezett gyűjtőtartályt,

melyről a hengeres gyűjtőtartályt kitöltő szemcsealmazon kívül felhalmozódott anyagkúpot egy élvonalzó segítségével eltávolítottam. A gyűjtőtartály 100 cm³-es térfogatán felül felhalmozódott anyagkúpot, egy élvonalzóval 4 kézmozdulattal, kettő egymásra merőleges tengely szerint mozgatva távolítottam el a felesleges anyagmennyiséget. A gyűjtőtartály tartalmát 0,1 g pontosságú mérleg segítségével mértem le. Fontos megjegyezni, hogy a mérés során kerülni kell mindennemű vibráció kialakulását, mert az anyagtömörödést okozna, ami mérési hibához vezet.

Saját fejlesztésű nagynyomású őrlőhengerpár (HPGR)

A berendezés a benne kivitelezhető folyamatos üzemű zárt szemcseágyas aprítása miatt alkalmas a nagykeménységű koptató anyagok szemcseméret csökkentésére, mert fajlagosan kevesebb feladott szemcse találkozik a munkafelületekkel, kisebb berendezés kopást eredményezve. Az aprítógépben két egymással ellentétes körpályán forgó hengerpalást található, amelyek között az őrlősrésben tömött feladással történik meg a szemcsék aprítása. A két hengerpalást közül az egyik horizontálisan fixált, míg a másik ebben a síkban elmozdulásra képes. A berendezésben a szemcseágyat komprimáló támasztóerőt egy hidraulikus-pneumatikus támasztórendszer biztosítja, mellyel maximálisan 25 MPa fajlagos hengerpalástnyomás érhető el.



1M.8. ábra. Saját fejlesztésű nagynyomású őrlőhengerpár

A berendezés fő jellemzői:

- Henger átmérője és szélessége: $D_0=200$ mm; $L_0=20$
- Tengelyátmérő: 50 mm

- Csapágyszélesség: = Fix-henger: 24 mm (6214 2RS), 26 mm (6309 2RS)

= Elmozduló henger: 24 mm (6214 2RS)

- Hajtás jellemzői:

= Hajtómotor: $P = 2,2 \text{ kW}$; $n_{\max} = 1420 \text{ min}^{-1}$,

= Redukált maximális fordulatszám (hajtott tengely) = 17 min^{-1} ,

- Hidraulikus egység:

=Támasztóhenger átmérője: $d_{\text{Cyl}} = 90 \text{ mm}$

=Maximális hidraulikus nyomás: $p_{\text{Hydr,max}} = 160 \text{ bar}$

- Technológiai jellemzők:

=Maximális nyomóerő: $F_{0\max} = 100 \text{ kN}$

=Maximális nyomaték: $M_{\max} = 1000 \text{ Nm}$

=Maximális gyakorlati kapacitás: $0,122 \text{ t/h}$, ha ($L_0=20 \text{ mm}$) Résméret
= 5 mm , palást kerületi sebesség = $0,143 \text{ m/s}$.