

MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KAR
MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

**ÉRCBÁNYÁSZATI MEDDŐ-KOMPONENSEK
FIZIKAI FELTÁRÁSÁNAK KUTATÁSA
NEDVES ŐRLÉSSEL**

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

KÉSZÍTETTE:

Mannheim Viktória

okleveles előkészítéstechnika-mérnök, gépészmérnök

DOKTORI ISKOLA ÉS DOKTORI PROGRAM VEZETŐ:

Dr. h. c. mult. Dr. Kovács Ferenc

AZ MTA RENDES TAGJA

EGYETEMI TANÁR, TANSZÉKVEZETŐ

TUDOMÁNYOS TÉMAVEZETŐ:

Prof. Dr. Csóke Barnabás

a műszaki tudomány kandidátusa
EGYETEMI TANÁR, TANSZÉKVEZETŐ

MISKOLC, 2004

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSEK, INDEXEK	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	6
2. A FÖLDRAJZI ELŐFORDULÁS ÉS A TECHNOLÓGIAI ELŐZMÉNYEK	9
2. 1. AZ ÉRCVAGYON FÖLDTANI ELŐFORDULÁSA ÉS FELTÁRÁSA	9
2. 2. AZ ÉRCCELŐKÉSZÍTŐ ÜZEM BEMUTATÁSA ÉS TECHNOLÓGIAI FOLYAMATA	10
3. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK.....	11
3.1. TÖRÉSMECHANIKA.....	11
3.2. MECHANOKÉMIA, MECHANIKAI DISZPERGÁLÁS ÉS RÉSZECSCKE KÖLCSÖNHATÁS	12
3.3. FELTÁRÓDÁS, FELTÁRÁS.....	15
3.4. KÍSÉRLETI BERENDEZÉSEK JELLEMZÉSE.....	16
3.4.1. <i>Keverő-golyósmalmok és rezgő golyósmalmok.....</i>	<i>16</i>
3.4.2. <i>Nedves őrlés keverő-golyósmalomban.....</i>	<i>19</i>
3.5. AZ ŐRLÉSI FOLYAMAT MODELLEZÉSE.....	24
3.5.1. <i>Modellezés alapjai.....</i>	<i>25</i>
3.5.2. <i>Aprítási folyamat jellemzése empirikus törési függvényekkel.....</i>	<i>27</i>
3.6. HASONLÓSÁGI VIZSGÁLATOK: DIMENZIÓANALÍZIS ÉS SCALE UP	29
3.6.1. <i>Kisminta.....</i>	<i>30</i>
3.6.2. <i>Kisminta-, és hasonlósági vizsgálatok elmélete.....</i>	<i>31</i>
4. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK	33
4. 1. ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREK	33
4. 2. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSÉRE ALKALMAZOTT MÓDSZEREK	34
5. A GYÖNGYÖSOROSZI MEDDŐMINTA ELJÁRÁSTECHNIKAI ANYAGVIZSGÁLATA	36
5.1. MINTAVÉTELEZÉS	36

5.2. A MINTAANYAG SZEMCSENAGYSÁG-ELEMZÉSE	36
5.3. A MINTAANYAG SŰRŰSÉGE	37
5.4. KÉMIAI ÉS ÁSVÁNYTANI ÖSSZETÉTEL	38
5.5. ŐRÖLHETŐSÉGI VIZSGÁLATOK.....	39
5.5.1. <i>Elterjedt őrlhetőségi vizsgálatok</i>	40
5.5.2. <i>A minták Bond-munkaindexe</i>	45
5.5.3. <i>A minták Hardgrove-indexe</i>	48
5.6. ŐRÖLHETŐSÉG KEVERŐMALOMBAN.....	49
6. A GYÖNGYÖSOROSZI MEDDŐMINTA FIZIKAI FELTÁRHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA.....	56
6.1. ŐRLÉSI VIZSGÁLATOKRA ALKALMAZOTT KEVERŐ-GOLYÓSMALOM	56
6.2. ÖSSZEHASONLÍTÓ ŐRLÉSI VIZSGÁLATOKRA ALKALMAZOTT REZGŐMALOM.....	57
6.3. A KÍSÉRLETEK MINTAANYAGA	58
6.4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK.....	61
6.4.1. <i>Őrlemények szemcseeloszlása, fajlagos felülete</i>	61
6.4.2. <i>Feltárttság</i>	63
6.5. AZ ALKALMAZOTT ŐRLŐMALKOK MŰKÖDÉSÉNEK ÉRTÉKELÉSE A KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ALAPJÁN	67
7. EMPIRIKUS MODELL A KEVERŐMALOM ŐRLEMÉNYE SZEMCSEMÉRET- ELOSZLÁSÁNAK BECSLÉSÉRE	69
8. DIMENZIÓANALÍZIS KEVERŐMALOMBAN TÖRTÉNŐ NEDVES ŐRLÉSRE	74
8.1. DIMENZIÓANALÍZIS ALKALMAZÁSA KEVERŐMALOMRA	74
8.2. SCALE-UP KEVERŐ-GOLYÓSMALOMRA.....	81
9. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK.....	83
10. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	85
11. BEFEJEZÉS	88
12. IRODALOMJEGYZÉK	89

JELÖLÉSEK, INDEXEK

Jelölések

A	porágy keresztmetszete	$[m^2]$	n	egyenletességi tényező	$[-]$
A_0	U-cső belső keresztmetszete	$[m^2]$	n	keverőtengely fordulatszám	$[1/min]$
a_c	centrifugális gyorsulás	$[m/s]$	P_m	malomteljesítmény	$[kW]$
C	üzemi és anyagállandó	$[-]$	$P_{m,0}$	malomteljesítmény üresjárásban	$[kW]$
c_m	szilárdanyag-tömegkoncentráció	$[-]$	P	hajtómotor teljesítménye	$[kW]$
c_V	szuszpenzió térfogati koncentráció	$[-]$	P_0	hajtómotor teljesítménye üresjárásban	$[kW]$
d_g	örlőtestek átmérője	$[mm]$	r_g	örlőgolyók sugara	$[mm]$
d_h	bengeres hűtőköpeny átmérője	$[mm]$	r_k	keverőtárca sugara	$[mm]$
d_k	keverőtárca átmérője	$[mm]$	S_K	külső fajlagos felület	$[m^2/g]$
dm	tömeghányad	$[\%]$	S_O	„összes” fajlagos felület	$[m^2/g]$
dm_g	örlőtestkopás	$[kg]$	S_m	fajlagos felület	$[m^2/kg]$
dm_o	összes kopás	$[kg]$	s_i	keverőtárca szélessége	$[mm]$
D_m	malomátmérő	$[mm]$	T	hőmérséklet	$[K]$
d_g	örlőgolyó átmérője		t	örlési idő	$[min.]$
d_k	keverőtárca átmérője	$[mm]$	x	szemcseméret	$[mm]$
E_m	fajlagos energia	$[kJ/kg]$	x_0	feladási szemcseméret	$[mm]$
F	feltárási fok	$[\%]$	x_1	örlemény szemcsemérete	$[mm]$
g	nehézségi gyorsulás	$[m/s^2]$	x_b	feladási határszemcseméret	$[mm]$
h_0	mérőfolyadék szintje egyensúlyi helyzetben	$[m]$	x_{50}	medián	$[mm]$
h_i	mérőfolyadék szintje a mérés végén	$[m]$	x_{80}	80 %-os szemcseméret	$[mm]$
k	Közény-állandó		V	malomtér fogat	$[m^3]$
k_m	műszerállandó		V_g	örlőtestek (örlőgolyók) térfogata	$[m^3]$
k_p	porágyra jellemző állandó		V_i	igénybevett szemcsék térfogata	$[m^3]$
L	porágy vastagsága	$[m]$	V_f	közegterefogat	$[m^3]$
L_1	dugattyúbossz anyag nélkül	$[m]$	V_p	pórustérfogat	$[m^3]$
L_2	dugattyúbossz anyaggal	$[m]$	V_{sz}	szilárd anyag térfogata	$[m^3]$
L_m	malombossz	$[mm]$	V	szuszpenzió térfogata	$[m^3]$
M	hajtómotor forgatónyomatéka	$[Nm]$	v_k	keverőtárca kerületi sebessége	$[m/s]$
M_0	hajtómotor forgatónyomatéka üresjárásban	$[Nm]$	z	keverőtárca száma	$[-]$
m	üzemi és anyagállandó	$[-]$	η	merevségi tényező	$[Pas]$
m	feladott anyag tömege	$[g]$	ε	porozitás	$[-]$
m	minta tömege	$[kg]$	ρ_f	folyadék sűrűsége	$[kg/m^3]$
m_a	aprított anyag tömege	$[kg]$	ρ_g	örlőtestek sűrűsége	$[kg/m^3]$
m_g	örlőgolyók tömege	$[kg]$	ρ_{sz}	szilárdanyag sűrűsége	$[kg/m^3]$
m_{sz}	szilárdanyag tömege	$[kg]$	φ	Heywood faktor	$[-]$
M	szuszpenzió tömegárama	$[kg/h]$	φ_m	malom töltési fok	$[-]$
			φ_g	örlőtestek töltési foka	$[-]$

η	<i>dinamikai viszkozitás</i>	<i>[Pas]</i>
ω	<i>körfrekvencia</i>	<i>[1/s]</i>
τ	<i>nyírófeszültség</i>	<i>[Pa]</i>
τ_0	<i>nyírási határfeszültség</i>	<i>[Pa]</i>

Indexek

K	<i>külső</i>
\tilde{O}	<i>összes</i>
km	<i>késminta</i>

További kiegészítő jelölések az értekezésben találhatóak.

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A több mint százéves ércbányászati tevékenységből származó, jelentős mennyiségű meddőanyag a föld felszínén hányókban, iszaptavakban (lerakókban) nyert elhelyezést. A lerakók potenciális környezeti szennyező-források és értékes földterületeket foglalnak el. Más oldalról viszont a meddőhányók anyagának fémtartalma esetenként jelentős értéket képvisel, a nemfémes komponensek pedig építőipari célra rendszerint jól hasznosíthatók. Jellemző példa a Recsk és Gyöngyösoroszi bányarégió. E térségekben több mint 10 Mt nehézfém-tartalmú meddőhányó található [79]. A réz és pirit főkomponensek mellett az arzén, kadmium, ólom, cink és molibdén mennyisége is jelentős a hányók anyagában, a konkrét mennyiségeik azonban nem ismertek. Az időjárási viszonyok, valamint a baktériumok hatására a nehézasványok mobilizálódnak és ellenőrizetlenül kerülnek a környezetbe, veszélyeztetve az ivóvíz készleteket és a mezőgazdaság vízellátását. A hányók feldolgozásához, a hasznos komponensek kinyeréséhez tehát gazdasági és környezetvédelmi érdek egyaránt fűződik. Az értekezésben ismertetett kutatások a gyöngyösoroszi bányatérsegből származó meddőanyagra irányultak.

A hányókban a komponensek, ásványok és az ásványok bomlásából származó fémsók formájában, igen kis méretben ($< 50 \mu\text{m}$), egymással finoman összenőve fordulnak elő. Az eredeti érces és nemfémes ásványok leggyakrabban határozott síkfelület mentén érintkeznek (kéregszerű összenövés), vagy az egyik ásvány a másikat héjszerűen vonja be (héjszerű összenövés), ritkábban egyik ásványban a másik erek formájában (erezett összenövési típus), vagy hintve (hintett összenövési típus) beépül [5]. Az eredeti ásványok bomlásából származó másodlagos só-, ill. ásványkiválásokat (amelyek többnyire oxidok, hidroxidok, szulfátok) ezek az összenövési típusok és a póruskitöltés jellemzik. Más esetben a másodlagos komponensek kisméretű aggregátumokat képezve többféle módon - pl. adhézión, kapilláris, kémiai erő, szilárd kristályhidak, kristályrács átkapcsolódás révén -

kapcsolódnak egymáshoz és az eredeti alapanyaghoz. A primer ásványi komponensek fizikai feltárása őrléssel valósítható meg. A másodlagos komponensek részben fizikai úton nyírás (dörzsölés, koptatás) igénybevételével, részben kémiai eljárással (lúgzással) tárhatók fel [79].

A különlegesen finom és finoman összenőtt anyagok előkészítése ismert eljárások esetén is új megközelítést és új vagy továbbfejlesztett vizsgálati eljárásokat igényel.

A meddőhányók fémtartalmú alkotóinak kinyerése alapvetően két fő folyamatból áll [79]:

1. *A komponensek fizikai és/vagy kémiai feltárása:* a fizikai feltárást az anyag aprításával, a kémiai feltárást az anyag savas vagy lúgos oldásával (in situ hányó-lúgzással, ill. a hányó kitermelésével és az előkészítőműben zárt technológiai rendszerben való feldolgozásával) valósíthatjuk meg.
2. *A feltárt komponensek kinyerése:* a szilárd diszperz rendszerből a komponensek kinyerése mechanikai szétválasztási - főként gravitációs, mágneses, flotációs dúsítási – eljárásokkal, vagy kémiai (kolloidkémiai, biokémiai) feltárás esetén főként szelektív kicsapatással, kikristályosítással, folyadék-folyadék extrakcióval, ioncserével, elektrolízissel lehetséges.

A fentiek alapján az értekezés egyik fő célja a meddőhányóban előforduló komponensek fizikai feltáródásának és feltárhatóságának vizsgálata.

A <100 µm meddőanyagban a finoman összenőtt komponensek feltárására az ipari gyakorlatban két malom alkalmazása reális: a keverő-golyósmalom és a golyós rezgőmalom. Ezért az értekezésben összehasonlító vizsgálatokat végeztem arra vonatkozóan, hogy melyik malom felel meg jobban a felhasználási célnak. A kísérletek szerint a keverő-golyósmalom alkalmazása előnyösebb. Más oldalról viszont a keverő-golyósmalom szakirodalmának tanulmányozásából kitűnt, hogy a malom méretezéséhez és az őrlemény szemcseméret-eloszlásának becsléséhez, a ma rendelkezésre álló ismeretek nem elégségesek. Ezért nélkülözhetetlen feladat volt a megfelelő matematikai módszerek kidolgozása.

- A fentieknek megfelelően a harmadik fejezetben a keverő-golyósmalom szakirodalmi hátterének tanulmányozásával és olyan kísérleti berendezés megtervezésével, valamint kialakításával foglalkozom, amellyel a fizikai feltárást megvalósító őrlési folyamat vizsgálatát különböző technológiai körülmények között el lehet végezni.
- A negyedik fejezetben az értekezésben alkalmazott vizsgálati módszereket ismertetem.
- A következő fejezet a meddőanyag eljárás-technikai jellemzésével foglalkozik. Ebben a fejezetben a finom feladás őrlhetőségének becslésére módszert dolgoztam ki.
- Az anyagvizsgálatokat követően a meddőkomponensek fizikai feltárhatóságát vizsgáltam meg.

-
- A hatodik fejezetben a különböző őrlési idő mellett elvégzett kísérleti adatok felhasználásával empirikus törési függvényt vezettem be, valamint kidolgoztam a keverőgolyósmalom őrleménye szemcseméret-eloszlásának becslésére szolgáló számítási algoritmust.
 - Ezt követően a dimenzióanalízis módszerével összefüggést vezettem le a keverőgolyósmalom teljesítményszükségletének meghatározására, valamint a laboratóriumi méretből az üzemi méretre való átmenet számítási módszerére.
 - Végezetül a kutatómunka eredményeit összefoglaltam.

2. A FÖLDRAJZI ELŐFORDULÁS ÉS A TECHNOLÓGIAI ELŐZMÉNYEK

2. 1. AZ ÉRCVAGYON FÖLDTANI ELŐFORDULÁSA ÉS FELTÁRÁSA

A Mátra délnyugati részén, a Gyöngyösoroszi, Mátrakeresztes és Mátraszentimre községek által határolt háromszögben, mintegy 30 km² területen van hazánk legnagyobb teléres ólom-cinkérc előfordulása. Földtani viszonyok szerint a bányához kapcsolt területen - attól függően, hogy melyiket tekintik önálló telérnek – 15-22 feltárt vagy részben megkutatott, és 4-5 meg sem kutatott telér van. A kitermelt érc mennyisége 3,7 Mt (szárazon), amelyben 35 kt ólom és 102 kt cink található, vagyis az ólom- és cinktartalom a kitermelt érc 3,7 %-a [1].

Az előfordulás ércesedése a badeni (tortoniai) andezitsorozatban létrejött hidrotermális telérekhez kötődik. A rétegvulkáni andezitsorozat két tagozatból áll [1].

- *Az első tagozat* jellegzetes kőzetei a rétegvulkáni piroxénandezit és tufái, illetve a mélyebb övezetben a szubvulkáni régió kőzetei, amelyekhez – utóvulkáni működéssel – hidrotermális kvarc, polimetallikus ércképződés tartozik. A teléreket hordozó rétegvulkáni andezitsorozat erős hidrotermális elváltozáson ment át a Mátra nagy területein. Ezek az elváltozások: kovásodás, a kaolinosodás és a kálimetaszomatózis. A telérek közvetlen környékén jelentős további elváltozások: piritesedés, kalcitosodás, agyagásványosodás stb. vannak. Gyöngyösoroszi és környékének 31 telére ebben a sorozatban van.
- *A második tagozatban* a mátrai piroxénandezitet találjuk, amely az ércesedést lezárja (fedőandezit), bár a telérek hasadékrendszerre is követhető, csak kőzetelváltozást,
- propilitesedést okozott a vulkáni utóműködés. A vulkáni működést lezáró riolit a közvetlen területet nem érintette.

A telérek szerkezete:

A terület ércképződését meghatározó és befolyásoló szerkezetalakulás több szakaszú, a kialakult csapásirányok négy fő csoportba sorolhatók (melyekből az első és utolsó – az ellentétes irányokkal – újabb két csoportot ad): NyÉNy-KDK, ÉÉK-DDNy, ÉÉNy-DDK és ÉK csapásirányok.

Ércásványai elsődlegesen: matrait, sztáin, tetraedrit, arzenopirit, termésarany (bournonot, jamesonit, semseyit, boulangerit, miargirit); *másodlagosan:* kalkozin, kovellin, cerusszit, valentinit.

Nem érces kiegészítőásványok elsődlegesen: fluorit, inezit, rodokrozit; *másodlagosan:* epidot, kabazit, laumontit, thursonit, klorit, greenockit, kén, gipsz, illit, montmorillonit, kaolinit, jarozit, halloysit.

Az érceloszlás zónásság az érctelérek csapásában horizontálisan, és mélységben vertikálisan is változik. Általában a dúsérces harmadik szakasz ékelődik ki legelőbb, a karbonátos ötödik és az ametisztos hatodik szakaszok tartanak ki a végső kitöltésig. Több telér esetében elmaradt a mélyebb szint megkutatása [1].

2. 2. AZ ÉRCÉLŐKÉSZÍTŐ ÜZEM BEMUTATÁSA ÉS TECHNOLÓGIAI FOLYAMATA

Az ércelőkészítő üzem helyét a számításba vehető vízbeszerzési változatok alapján határozták meg a bánya és Gyöngyösorosi között. Az üzemet 1955. szeptember 6-án avatták fel.

A bányászati kutatások eredményeként növekvő érckészlet tette lehetővé az üzem bővítésének tervezését és számolni kellett a nagyobb réztartalommal is. Ezen előzmények alapján jött létre az üzembővítés tervfeladata, ami rezesérc-bunkerrel, rézszinportárolóval, nehézsuszpenziós üzemrésszel, vegyszer-előkészítő és FeSi-őrleő üzemmel, valamint egy flotációs és egy bővített vegyi laboratóriummal számolt a kapacitásbővítést jelentő golyósmalom és nagyobb flotációs cellák mellett.

A gyöngyösorosi érc dúsítására már FINKEY JÓZSEF is végzett kísérleteket, a technológiai folyamatot TARJÁN GUSZTÁV kísérletei alapján határozták meg, melyek szerint a kvarchoz kötött aranykihozatalt csak olyan finom őrléssel lehetett volna biztosítani, ami mellett a galenit túlőrleődik. A flotációs dúsítási technológia elemei: háromfokozatú előaprítás, egy- vagy kétfokozatú őrlés (kb. 92 %-ban 0,2 mm alá), és

szelektív galenit-szfalerit-piritflotálás. Foglalkozni kellett az agyagásványok törés közbeni leválasztásával (a törési teljesítmény növelésére), a kalkopirit galenitszínporból történő leválasztásával, az érc réztartalmának jobb hasznosítása érdekében, a nemesfém-kihozatal növelésével a kvarcban lévő arany esetében, valamint a marmatit- és wurtzitkihozatal növelésével [1].

Gyöngyösorosi bányászatának története eltér az ércbányászatban kialakult gyakorlattól. A bánya élete alatt elmaradt az időszak, amikor kihasználhatta volna kifejlesztett kapacitását. Az ércvagyon kutatása a kezdetektől a bezárás elhatározásáig tartott, és remélt ércvagyonának egy része a bezáráskor is feltáratlan volt. A bányában a termelés 1986. március 13-án szűnt meg [1].

3. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A *Bevezetésben* megfogalmazott célkitűzésekkel összhangban, a következőkben áttekintem a kutatási területet érintő szakirodalmi forrásokat.

3.1. TÖRÉSMECHANIKA

Ezt a kérdéskört elsősorban TARJÁN [5, 69], JUHÁSZ ÉS OPOCZKY [10, 70, 73], valamint PUSCH [73] munkásságai alapján tekintem át.

Ma már bizonyított, hogy az aprítás a részecskeméret csökkenése mellett a szilárd anyagban szerkezeti változásokat is előidéz. Az anyagszerkezeti változásokat az aprításnál három jelenség váltja ki: a szilárd test széttörése, a kémiai kötések felszakadása, a törés okozta plasztikus deformáció és felmelegedés, valamint a mechanikai és hőhatások következtében a kristályrácsban bekövetkező deformáció [5, 70].

Ha egy szilárd testet mechanikai hatás ér, a test alakváltozást szenved, majd ha az igénybevétel következtében fellépő feszültségek a törőfeszültséget elérik, akkor eltörnek.

A rideg anyagok esetében a törés akkor következik be, ha a testben legalább egy helyen a külső terhelés okozta feszültségek elérik a molekuláris szakítószilárdságot [70, 73].

A molekuláris elméleti szakítószilárdság (σ_{mol}) a rugalmassági modulus alapján durva megközelítéssel becsülhető [70, 73]:

$$\frac{E}{15} < \sigma_{\text{mol}} < \frac{E}{5}$$

ahol E [MPa] a Young-féle modulus.

A számított elméleti szakítószilárdság a rideg anyag valódi szilárdságát azonban két-három nagyságrenddel is meghaladja. A magyarázatot az anyag szerkezetében meglévő” mikrorepedések (hibahelyek) adják.

A törés energetikai probléma. A létrejött kezdeti repedés továbbterjedéséhez a rugalmas deformáció energiája, a törési felület határfelületi energiájával legalább egyenlő kell, hogy legyen.

A szükséges törési munka valójában sokkal nagyobb, mint a felületi szabadenergia. Az energiatöbbletrész a plasztikus deformáció energiáját fedezi, amely hővé alakul át.

A méret csökkenésével nő a szemcsék töréssel szembeni ellenállása (törési szilárdsága). Bizonyos kis méret alatt a részecske gyakorlatilag hibahelymentessé válik. A külső mechanikai igénybevétel hatására az ilyen méretű részecske már nem törik szét, hanem plasztikus (mikroplasztikus) deformációt szenved [70].

A finomórlés során végbemenő anyagszerkezeti változások és mechanokémiai reakciók szempontjából a plasztikus deformáció, ill. a mikroplasztikus állapot létrejötte igen fontos szerepet játszik.

3.2. MECHANOKÉMIA, MECHANIKAI DISZPERGÁLÁS ÉS RÉSZECSCHE KÖLCSÖNHATÁS

A *mechanokémia (mechanikai kémia)* az anyagok mechanikai és kémiai tulajdonságai közötti kapcsolatokkal és olyan anyagszerkezeti, fizikai-kémiai változásokkal foglalkozik, amelyek a szilárd anyagokban, mechanikai energia által előidézett deformáció, törés következtében alakulnak ki [70].

A *részecske-kölcsönhatás intenzitása és jellege* az anyag természetétől, mechanikai tulajdonságaitól (keménység és őrlhetőség), valamint a mechanikai igénybevétel, illetve az őrlőberendezés típusától függ.

A *mechanikai diszpergálási folyamatok célja* a technológiai rendeltetésnek megfelelő diszperz rendszer előállítása. A diszperz rendszerek előállításának legelterjedtebb módja a mechanikai energiával való diszpergálás, az *őrlés*. Az őrlés közvetlenül érzékelhető eredménye a szilárd anyagok szemcseméretének csökkenése. A modern technológiai folyamatokban a *finomórlésnek* nagy jelentősége van, hiszen a finomőrleményeknek igen nagy a felhasználási területe. A szilárd test finomórlése során nemcsak az anyag diszperzitásfoka, hanem kristályszerkezete is változik, azaz az őrleményben mechanokémiai átalakulások mennek végbe.

Az igénybevételtől, illetve a malom típusától függően előállíthatók nagy diszperzitásfokú őrlemények, amelyek kisebb mértékű szerkezeti változásokon mennek át, de megfordítva, viszonylag durva őrlemények is előállíthatók, melyek nagyobb mértékű kristályszerkezeti változásokon esnek át.

A *szilárd testek mechanikai tulajdonságai* és a részecskék kölcsönhatására való hajlamuk figyelembevételével az alábbi anyagokat különböztetjük meg [70]:

- könnyen őrlhető és aggregációra hajlamos anyagokat (pl. gipszkő, lágyan égetett mész),

- nehezen őrlhető és aggregációra, illetve agglomerációra hajlamos anyagokat (pl. cementklinker, egyes mészkőfajták), és
- nehezen őrlhető és aggregációra nem hajlamos anyagokat (pl. kvarc, korund) [10].

A szilárd anyagokban történő őrlést elsődleges (primer) és másodlagos (szekunder) mechanokémiai folyamatok jellemzik [10].

Az **elsődleges mechanokémiai folyamatok** [10] a rendszer szabadenergiájának növekedését hozzák létre és az őrlemény reakcióképességét, aktivitását megnövelik. Elsődleges folyamatnak tekinthetjük a diszperz rendszer részecskéinek a mechanikai igénybevétel okozta deformációját és eltörését, valamint a töréskor megjelenő lökészerű belső felmelegedésüket. Az elsődleges folyamatok közé sorolhatjuk azokat az átalakulásokat is, amelyek közvetlenül a deformáció és a hőlékések következtében mennek végbe a test belsejében (rácshibák keletkezése és elmozdulása, polimorf átalakulások, egyes kémiai reakciók lezajlása stb.). Abban az esetben, ha az elsődleges folyamatok a rendszer fizikai-kémiai tulajdonságaiban mérhető változásokat idéznek elő *mechanikai aktiválásról* beszélünk. A mechanikai aktiválás olyan kedvező anyagi tulajdonságokkal rendelkező, a technológiai rendeltetésnek legjobban megfelelő aktivált diszperz rendszerek (őrlemények) előállítását teszi lehetővé, amely más módszerrel nem valósítható meg.

A **másodlagos mechanokémiai folyamatok** [10] olyan átalakulások, amelyek a mechanikai energiával aktivált szilárd anyagokban spontán mennek végbe és a rendszer szabadenergiájának csökkenését, ill. a kötési energia növekedését, tehát az őrlemény aktivitásának csökkenését idézik elő. A másodlagos mechanokémiai folyamatok részben már az őrlés alatt végbemehetnek az őrleményben, részben pedig őrlés után, ha a rendszer az ilyen átalakulásokra nézve kedvező körülmények közé kerül. Másodlagos folyamatok a diszperz rendszer részecskéinek kölcsönhatása (ami a rendszer durvulását eredményezi); a részecskefelület és az idegen molekulák közötti kölcsönhatás; az őrlemény szemcséi közötti kémiai reakciók; a rácshibák számának csökkenése és esetleg maga a képlékeny alakváltozás is, ha az a szabadenergia csökkenését eredményezi [10].

A részecskeméret növekedéssel járó másodlagos folyamatok között két fokozatot különböztetünk meg [10]:

1. AGGREGÁCIÓ

A diszperz rendszer részecskéinek adhéziós (főleg van der Waals-féle) erők hatására történő és részecskeméret-növekedéssel járó, gyenge, reverzibilis összetapadása, amely a diszpergálási folyamatot kedvezőtlenül befolyásolja, de nincs lényeges hatással az őrlemény minőségére. Viszonylag rövid őrlés, illetve mechanikai aktiválás után lép fel.

2. AGGLOMERÁCIÓ

A diszperz rendszer részecskéinek finomórlés, illetve mechanikai aktiválás során, kémiai kötések okozta tömör irreverzibilis összetapadása, amely az őrlemény egyes tulaj-

donságait (aktivitását, hidratációképességét, reakcióképességét, oldhatóságát, minőségét stb.) általában kedvezőtlenül befolyásolhatja.

A *szilárd anyag őrlhetőségi tulajdonságain* az anyag keménységén és ezzel összefüggő koptató hatásán kívül az aggregációra, illetve agglomerációra való hajlamát is értjük, amely nagy diszperzításfokú őrlmények előállítására esetén önmagában meghatározza a szükséges őrlőberendezés típusát és az őrlési technológiát. Az aggregáció, illetve agglomeráció az őrlőtestek által közvetített energia túladagolásának, az általuk a szemcsekre gyakorolt „összenyomó hatásának”, valamint a szemcsék lokális felmelegedésének következménye.

A **diszperzításfok** őrlési idővel történő változását három szakaszra bonthatjuk (3.1. ábra). A tényleges mechanikai diszpergálási folyamatoknál a három szakasz tökéletes szétválasztása nem lehetséges. A gyakorlat azt mutatja, hogy egy bizonyos *diszperzításfok* elérése után az anyag további finomodása lelassul, sőt a szemcseméret újránövekedése, azaz a diszperz rendszer durvulása következik be. A szakaszok a következők [10, 70]:

1. RITTINGER-SZAKASZ

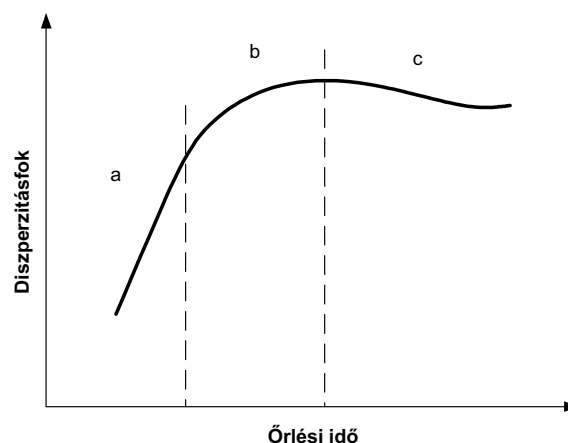
Az aprításra felhasznált munka arányos a keletkezett felülettel és a részecskék kölcsönhatása elhanyagolhatóan kicsi. Ebben a szakaszban az őrlhetőséget majdnem kizárólag az őrlendő anyag egyedi tulajdonságai befolyásolják (3.1. ábra. a szakasz).

2. AGGREGÁCIÓ SZAKASZA

Ebben a szakaszban, elsősorban a részecskék kölcsönhatása következtében megszűnik az őrlésre fordított munka és a keletkezett felülettöbblet közötti arányosság, de a diszperzításfok további növekedése még mindig jelentős (3.1. ábra. b szakasz).

3. AGGLOMERÁCIÓ SZAKASZA

A diszperzításfok növekedése minimumra csökken, majd teljesen megszűnik, sőt egyes anyagok esetén a diszperzításfok csökkenése következik be. Többnyire ebbe a tartományba esnek az anyag kristályszerkezeti, mechanokémiai változásai is (3.1. ábra. c szakasz).



3.1. ábra *A diszperzitásfok változása az őrlési idő függvényében*

A finomőrléssel előállított termékek tulajdonságait az elsődleges és a másodlagos folyamatok sebessége és mértéke határozza meg. Miután az őrléssel, illetve a mechanikai aktiválással leggyakrabban az a célunk, hogy az anyagot minél aktívabb állapotba hozzuk, és mivel éppen ennek az aktív állapotnak szükségszerű következményeként lépnek fel a másodlagos folyamatok, ezért az egyik legfontosabb őrléstechnikai feladatnak az őrlés alatti másodlagos folyamatok visszaszorítását kell tekintenünk. Így a mechanokémiai törvényszerűségek ismeretében az őrlemény mechanikai aktiválását és magát az őrlési folyamatot – az elsődleges folyamatok elősegítésével és a másodlagos folyamatok visszaszorításával- irányítani lehet [10].

3.3. FELTÁRÓDÁS, FELTÁRÁS

Az ércek előkészítésénél az aprítás elsődleges feladata a *feltárás* [69]: az anyagalmazban eredetileg egymással összenőve található ásványegyedek megszüntetése, azok egymástól való szabaddá tétele. Megfelelő mérvű feltárás ugyanis előfeltétele a szorosan vett előkészítésnek: az ásványok valamilyen fizikai sajátságuk alapján különböző termékekbe való szétválasztásának.

Az anyagalmaz feltárt szemcséiben csupán egyetlen ásványfajta van jelen, két vagy több ásvány van az összenőtt szemcsékben. A *feltárás foka* egy bizonyos ásványra az ásvány feltárt szemekben jelenlévő mennyiségének százalékos viszonya a feltárt és összenőtt szemekben jelenlévő teljes mennyiséghez, és fordítva, az összenövés foka az összenőtt szemekben jelenlévő ásvány-mennyiség viszonya az összenőtt és feltárt szemcsékben együttesen jelenlévőhöz.

Egy bizonyos anyagalmaz különböző ásványaira más és más lesz a feltárás (illetve összenövés) foka, mégpedig a nagyobb mennyiségű ásvány feltárási foka mindig nagyobb, mint a kisebb mennyiségű ásványé [5, 69].

Ha az egymással összenőtt ásványok szilárdsága erősen eltér, vagy a közöttük lévő kapcsolat lényegesen gyengébb, mint a szemcsék saját kohéziója, a széttörés leginkább az érintkezés mentén fog bekövetkezni. A finomabbra aprítás fokozatosan tökéletesebb feltárásra vezet.

Ha a nyersanyagban egyes ásványszemcsék csak lazán vannak kapcsolódva, mint pl. a csak részben megkeményedett (cementálódott) konglomerátumok vagy az atmoszferiliák által megtámadott kőzetek esetében az anyagnak az érces behintés szemcsenagyságára való felaprítása gyakorlatilag teljes feltárást eredményezhet.

A közel hasonló szilárdságú ásványok (mint pl. a kalkopirit és szfalerit) feltárása viszont úgyszólván tisztán a szemcsenagyságuk csökkentésével lehetséges. A nyersanyag e két szélső határérték közé esik, s aprításkor a törés kisebb vagy nagyobb mértékben a szemcsék összenövésének határán következik be, ahol a szomszédos ásványok fizikai tulajdonságaiban (keménység,

szívósság, hasadás stb.) jelentkező ugrásszerű eltérések miatt a kohézió rendszerint kisebb, mint az ásványszemcsék belsejében [5, 69].

A feltáró őrlés során szintén fontos a másodlagos folyamatok visszaszorítása a megfelelő feltártság elérése érdekében, a lehető legkisebb energia-felhasználás mellett.

3.4. KÍSÉRLETI BERENDEZÉSEK JELLEMZÉSE

A fizikai feltárás vizsgálatára - a korábban jelzett okok miatt - egy laboratóriumi keverő-golyósmalmot és egy golyós rezgőmalmot alkalmaztam. A továbbiakban, e két berendezésben történő őrlés kérdésével foglalkoztam.

3.4.1. Keverő-golyósmalmok és rezgő golyósmalmok

Keverő-golyósmalmok

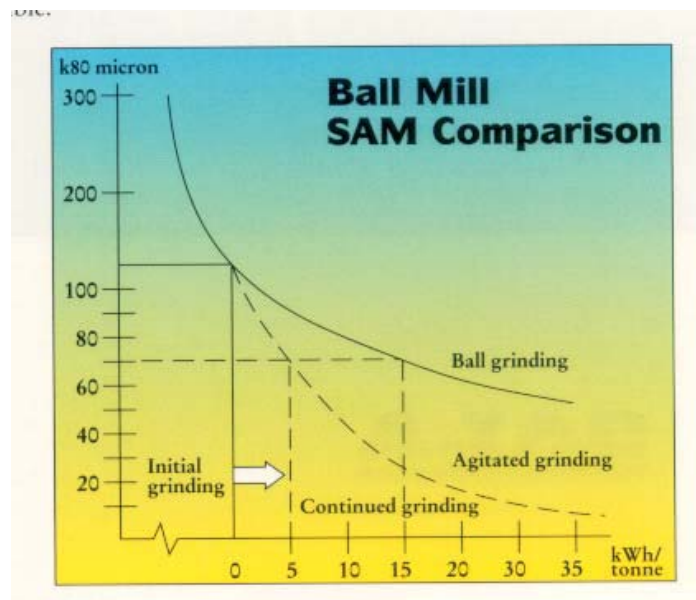
Az első keverő-golyósmalom kialakítása 1928-ban KLEIN ÉS SZEGVÁRI [35] tervei alapján történt. Az általuk megalkotott ún. „lassújárású keverő-golyósmalom” alapját egy vertikális hengeres őrlőtér jelentette, amelyben keverőelemként egy centrálisan kialakított üreges keverőtengelyre szerelt keverőtárcsák szolgáltak, és a malomátmérő és a malomhossz méretek megegyeztek. A kavicskeverékből álló őrlőtestek töltési foka ebben a malomban még rendkívül magas (90 %) volt. A SZEGVÁRI [34, 35] által, 1950-ben továbbfejlesztett vertikális, gyorsabb járású keverő-golyósmalom geometriai méreteiben (kisebb malomátmérő és nagyobb malomhossz) és a keverőtengely kerületi sebességében (nagyobb kerületi sebesség) tér el elődjétől. A centrális tengelyen elhelyezett keverőelemként, keverőpálcák szolgálnak. 1958-ban a HOCHBERG ÉS BOSSE [36] munkássága alapján elkészült gyorsjárású, tömött keverőtárcsás „homokmalom” hódította meg a világot, amelyet festékpigmentek előállításához alkalmaztak. Őrlőtestként, kis szemcseméretű (0.42 - 0.84 mm) Ottawa-homok szolgált, amelynek töltési foka a malomban 50 % volt. A homokmalom volt, az 1963-ban elsőként kialakított mai „gyorsjárású keverő-golyósmalmok” alapja [37].

A napjainkban alkalmazott gyorsjárású keverő-golyósmalmok elődjétől a keverő beépítési módjában, az őrlőtér és kihordás kialakításában különböznek a különlegesen finom (ultrafinom) őrlésre megfelelő tárcsás keverőmalmok, amelyekben a malomba helyezett őrlőtestek mozgását az őrlőtérbe centrálisan beépített tárcsás vagy lyuktárcsás keverőszerkezet végzi. Az őrlőtestek az aprításhoz szükséges mozgási energiájukra a keverőszerkezet forgatásával tesznek szert, a keverő és az őrlőtestek, valamint az őrlőtestek között fellépő súrlódó erő közvetítésével [2]. Keverő-golyósmalmokat elsősorban festék- és kerámiai anyagok finomőrléséhez, valamint az élelmiszer-, gyógyszer- és alapanyagiparban alkalmaznak. Alkalmazásuk mechanikai sejtfeltáráshoz a biotech-

nológiában, illetve nagykoncentrációjú szén-víz és szén-olaj szuszpenziók gyártásánál is elterjedt [18, 38, 39].

A számos alkalmazási területnek megfelelően a keverő-golyósmalmok műszaki kivitelezésének is számos formája lehetséges. Az őrlőtér és a keverőszerkezet különböző kialakítási lehetőségeiknek függvényében ENGELS [35, 40] három csoportba osztotta a piacon elérhető berendezéseket a keverőelemek kialakítása szerint, amelyek az alábbiak: teljes őrlőtérű (lyuktárcsás, tömör tárcsás vagy réstárcsás keverőelemekkel) körőrlőtérű (tüskés keverőelemek) és pálcás őrlőtérű (pálcás keverőelemek) keverő-golyósmalmok. A keverő-golyósmalmokat elsősorban nedves őrlési folyamatokhoz alkalmazzák, de az utóbbi években igen elterjedt a nedves és száraz üzemmódban is működő, 10 μm alatti termék előállítására alkalmas SALA „keverő-golyósmalom” (rövidítése: SAM, gyártó: SALA International AB, Svédország) [53].

Az **őrlőtestek** többnyire 0,2-3,0 mm közötti golyók, amelyeket főként üvegből, acélból, homokból, műanyagból vagy kerámiából készítenek. Őrlőtestként azonban a feladott anyag durvább szemcséi (autogén keverő-golyósmalmok) vagy idegen anyag szemcséi is szolgálhatnak. Az őrlőtestek töltési foka a leggyakrabban 40-70 %. A malmok üzemelhetnek folytonosan vagy szakaszosan vagy osztályozóval zárt vagy nyitott folyamatban, továbbá száraz vagy nedves üzemmódban [3],[6].



3.2. ábra A fajlagosan befektett energia alakulása SALA keverőmalom és golyósmalom esetén [26]

Keverő-golyósmalom és hagyományos golyósmalom összehasonlítása:

- Mivel a meddőanyagban a komponensek egymással finoman összenőve fordulnak elő, ezért a meddő-komponensek fizikai feltárása mindenképpen különlegesen finom őrlést igényel.

- Az igen finom őrlmények előállítására a hagyományos golyósmalom energetikailag nem elég hatásos, működését a törés nélküli szemcsesúrlódás, kinetikus és potenciális energia-vesztések, felmelegedés, erős zajhatás és alacsony energetikai hatásfok jellemzi [53].
- A keverő golyósmalmok ultrafinom őrlésre megfelelő őrlőberendezések, amelyeknek alkalmazása relatív egyszerű felépítésük és az egyszerű őrlőberendezésekkel szemben kedvezőbb energia-felhasználásuk folytán került az utóbbi években előtérbe. [22], [25].
- Az őrlőtestek és a keverőszerkezet egyidejűleg történő működése kétség nélkül megnöveli az aprítási eredményt és megrövidíti a fizikai feltáráshoz szükséges őrlési időt.
- Keverő golyósmalmokkal, a nagyobb centrifugális erők következtében, lényegesen finomabb szemcseméret-eloszlásokat érhetünk el, mint a hagyományos golyósmalmokban [2].
- A gazdasági szempontokat is figyelembe véve megemlítendő, hogy a keverő-golyósmalmok beruházási költsége körülbelül feleannyi, mint a hagyományos golyósmalmoké [38].

Ahhoz, hogy a keverőmalomban történő hatásos, kutatási célnak megfelelő őrlést kísérleti úton is bebizonyíthassam, elengedhetetlen volt számomra egy, a keverő-golyósmalomban elvégzett őrlési sorozat kivitelezése. Majd az itt kapott eredményeknek egy rezgőmalomban is elvégzett hasonló körülmények közötti kísérleti sorozattal való összehasonlítása.

Rezgő golyósmalmok

A rezgőmalmok őrlőtestekkel és az őrlendő anyaggal töltött, rugókon nyugvó tartálya függőleges síkban kis sugáron és nagy rezgésszámmal körpályán rezeg [5]. A tartály rezgése az őrlőtesteket is függőleges síkban mozgatja, amelynek következtében a kis röppályákon mozgó őrlőtestek között levő őrlendő anyag igen nagy számú, kis energiájú ütést szenved. Az őrlőtestek egymáshoz és a tartály falához ütközve a közöttük levő anyagot -elsősorban ütés által- finomra felőrlik. Megfelelően aprított ($< 100 \mu\text{m}$) anyag feladása esetén irodalmi adatok szerint $1-10 \mu\text{m}$ felső szemcsehatár is elérhető, a szokásos finomság $20-40 \mu\text{m}$). Az őrlőtestek saját tengelyük körüli forgásának és a teljes töltés lassú körben mozgásának dörzsölő hatása viszonylag kicsiny az őrlés munkájában.

A rezgést ki nem egyenlített forgó tömeg létesíti. Jó őrlési munka a rezgőmalmokban a 'statisztikus rezonancia' állapotában jelentkezik, amikor az őrlőtestek eldobása és ütközése a tartálymozgás azonos szögállásához tartozik, úgyhogy az őrlőtestek az ütközés pillanatában azonnal el is dobódnak, összhangban a malomrezgés frekvenciájával. Az őrlőtestek ütmunkája a statisztikus rezonancia helyein maximumot ér el, s e maximumok között zéróra csökken. A legnagyobb aprítási, illetve aktiválási hatás nagy ($7-10 \text{ mm}$ és ennél nagyobb) amplitúdóval érhető el. Ilyen esetben a dob fordulatszámának szintén megfelelően nagynek kell lennie, hogy a folyamatos őrlés esetén az anyag áthaladását a malmon keresztül biztosítsa. Folyamatos üzemnél a nagy aktiválási hatás eléréséhez biztosítani kell azt a feltételt, hogy a malomban tartózkodó anyagmennyiség és a tartózkodási idő hányadosa lehetőség szerint minél kisebb legyen [7,10, 43, 44].

3.4.2. Nedves őrlés keverő-golyósmalomban

A keverő-golyósmalomban történő nedves őrlési folyamatokat befolyásoló jellemzők közül, MÖLLS és HÖRNLE [41], (1972) összesen 44 fontosabb jellemzőt emeltek ki, amelyek az őrlés során változtathatók, beleértve a kihordásnál elhelyezett szita jellemzőit is. Az említett geometriai, üzemi és anyagjellemzőket a 3.1. táblázat ismerteti. A leírt paraméterek között vannak olyanok, amelyek a nedves őrlés folyamán optimálhatóak és a továbbiakban állandó értéken tarthatók (pl. a keverőtengely kerületi sebessége és malomfáltól való távolsága) és természetesen vannak olyan jellemzők, amelyeknek optimálása – adott malom esetén - nem lehetséges (pl. a keverőelemek átmérője) [2, 3].

A keverő-őrlés fő műszaki paramétereit számos eljárástechnikai körülmény, jellemző befolyásolja. A befolyásoló tényezők három csoportba sorolhatók [41]:

1. *őrlőtér méretviszonyai*: az őrlőtér és a keverő geometriája, az őrlőtér falainak kialakítása;
2. *üzemi paraméterek*: feladás tömegárama, keverőtárca kerületi sebessége, mozgatás módja, szilárdanyag-koncentráció (nedves őrlés), valamint a malom őrlőtest-töltési fok,
3. *az őrlőtestek és az őrlendő anyag tulajdonságai*: az őrlendő anyag és az őrlőtestek méreteloszlása, sűrűsége, keménysége, rugalmassági modulusa [2, 3].

Nedves őrlés során a malmokban a szemcseaprításra fordított energiát az alábbi folyamatok emésztik fel:

- súrlódási folyamatok, elsősorban az őrlőtestek közötti relatív mozgások során fellépő súrlódási folyamatok,
- folyadéksúrlódás és
- az őrlőtestek és az őrlendő anyag között fellépő súrlódás és részecskeütközések [12].

Keverő-golyósmalmokban a keverőelemek és az őrlőtestek között fellépő energiavesztést a következő főbb paraméterek befolyásolják:

- őrlőtestek tulajdonságai (méret, sűrűség, mennyiség),
- az energia-bevezetés módja,
- az őrlőtér falának felületi kialakítása,
- kerületi sebesség és
- szuszpenzió-viszkozitás [12].

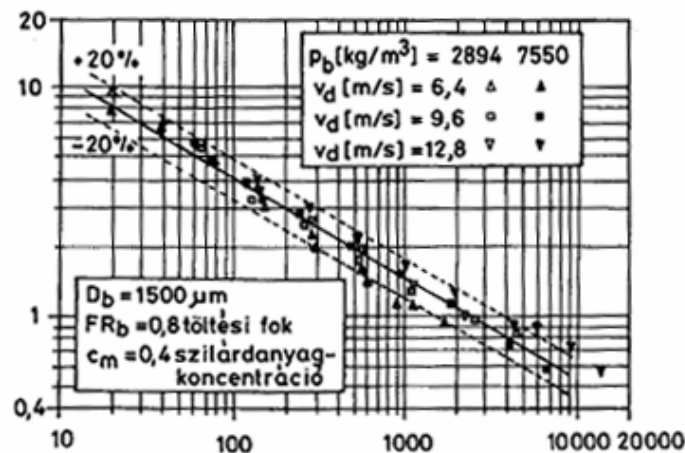
Geometriai jellemzők	Üzemi jellemzők	Anyagjellemzők
<u>Keverő</u> <ul style="list-style-type: none"> • alak • átmérő • malomfaltól való távolság • keverőelemek távolsága <u>Őrlőtér</u> <ul style="list-style-type: none"> • átmérő • keresztmetszet • magasság • térfogat • térbeli helyzet <u>Őrlőtest</u> <ul style="list-style-type: none"> • átmérő • alak <u>Szita</u> <ul style="list-style-type: none"> • alak • felület • szitanyílás mérete • póruszélesség • pórusalak 	<u>Keverő</u> <ul style="list-style-type: none"> • kerületi sebesség • szabad mozgási pálya <u>Őrlőtest</u> <ul style="list-style-type: none"> • töltési fok <u>Őrlemény</u> <ul style="list-style-type: none"> • tartózkodási idő • feladási tömegáram • szilárd anyag tömegkoncentráció • diszperziós közeg • feladás módja • nyomás 	<u>Keverő</u> <ul style="list-style-type: none"> • anyagtulajdonságok <u>Őrlőtér</u> <ul style="list-style-type: none"> • anyagtulajdonságok <u>Őrlemény</u> <ul style="list-style-type: none"> • szemcseméret • szemcsealak • végső diszperzitás • végső szemcseméret • sűrűség • keménység • viszkozitás • hőmérséklet • kopás <u>Őrlőtest</u> <ul style="list-style-type: none"> • egységesség • anyagtulajdonságok – keménység – sűrűség – rugalmasság • felület • sűrűség • homogenitás <u>Szita</u> anyagtulajdonságok

3.1. táblázat Nedves őrlést befolyásoló jellemzők keverő-golyósmalomban Mölls és Hörnle szerint [41]

JOOST ÉS SCHWEDES [19, 25] őrlési vizsgálatok eredményei alapján megállapították, hogy az aprítási eredményt elsősorban a *bevezetett fajlagos energia* határozza meg. A fajlagos energia szoros kapcsolatban áll az *őrlőtestek töltési fokával*. A szilárd részecskék őrlőtestek közötti aprítása valójában csak az őrlőtér egy kis térfogatában történik, az ún. „őrlésaktív térfogatban”. Az őrlőtestek töltési foka az őrlésaktív térfogatok relatív mennyiségének és ezzel együtt az összes bevezetett energia meghatározó mértéke. Az őrlőtestek töltési foka keverő-golyósmalmokban általában 40-80 %. Ennél kisebb töltési fok az őrlőtestek közötti távolságot megnövelve, kisebb terhelési intenzitást eredményez [35]. Csökkenő töltési fokkal csökken az őrlésaktív térfogatok relatív mennyisége, nő az azonos aprítási eredmény eléréséhez szükséges energiaszükséglet és ezzel egyidejűleg durvább terméket kapunk. Viszont a bevezetett fajlagos energia, mint meghatározó tényező, nem elegendő ahhoz, hogy

leírjuk vele a töltési foknak az aprítási eredményre gyakorolt hatását. Az aprítási eredmény az őrlemény szemcseméret-eloszlásával és az ebből származtatott paraméterekkel (pl. maximális szemcseméret, mediánérték) jellemezhető.

Az aprítási eredmény 5,5 és 200 l közötti malomtérfogatnál független a malom geometriai méretétől és a bevezetett üzemi paraméterektől [25]. Az ezektől eltérő malomtérfogatok esetén az említett paramétereket mindenképpen figyelembe kell venni.



3.3. ábra A mediánérték (x_{50} - μm) változása a fajlagos őrlési energia (E_M - kJ/kg) függvényében keverőmalomban történő őrlésnél [6]

Fajlagos energia és őrlési finomság keverő-golyósmalomban

Az **aprítási törvények** [42] az őrléskor befektetett mechanikai energia és a szemcseméret közötti összefüggéseket írják le. Az őrlemény finomsága, azonos őrlőtestek (azonos őrlési feltételek) alkalmazása mellett a fajlagos energia függvényeként írható le. A fajlagos energia növelésével egyre finomabb őrleményt kapunk az őrlés során, és az őrlemény szemcseméret-eloszlási görbéje egyre inkább az origó felé tolódik el a feladáshoz képest.

CHARLES [4, 5] szerint az átlagos szemcseméret és az aprítási eredmény az alábbi összefüggésekkel adható meg:

$$\bar{x} = C \cdot E_M^{\frac{1}{m-1}} \quad (3.1)$$

$$dE_m = C \cdot \frac{dx}{x^m} \quad (3.2)$$

STEHR és WEIT [3], [4], [14] munkássága alapján a 3.2. egyenlet integrálása után ($m \neq 1$ esetén) az alábbi összefüggéshez jutunk:

$$E_M = \frac{C}{m-1} \cdot \left(\frac{1}{x_1^{m-1}} - \frac{1}{x_0^{m-1}} \right) \quad (3.3)$$

(Az egyenletekben \mathbf{x}_l az őrlemény, \mathbf{x}_θ a feladott termék szemcsemérete, \mathbf{C} és \mathbf{m} az üzemi körülményekre és az anyagra jellemző állandók, m értéke 1,5-2).

Fajlagos őrlési energia meghatározása és befolyása az őrlés eredményére

STEHR [6] megállapítása szerint, keverő-golyósmalomban a fajlagos energiát az üzemi paraméterek közül a keverőtárcsa kerületi sebessége (v_k), a szilárd anyag tömegkoncentrációja (c_m) és a szuszpenzió-átáramlás befolyásolja.

Az őrlőtérbe bevezetett fajlagos energia értékét, nyomatókmérés adataiból, folyamatos őrlésre az alábbi összefüggéssel határozhatjuk meg [2], [19], [25]:

$$E_M = \frac{P - P_0}{\dot{m} \cdot c_m} = \frac{(M - M_0) \cdot 2\pi \cdot n}{\dot{m} \cdot c_m} \quad (3.4)$$

Szakaszos őrlés esetén pedig [2], [16], [19], [45]:

$$E_{M(t)} = \frac{\int_0^t (M(t) - M_0) \cdot 2\pi \cdot n \cdot dt}{m_a} \quad (3.5)$$

(Az egyenletekben \mathbf{P} a malomtérbe (őrlőtér) bevezetett teljesítmény, \dot{m} a szuszpenzió tömegáram, M és M_0 a hajtómotor forgatónyomatéka és annak értéke üresjáratban és m_a az aprított anyag tömege).

KWADE [3], [16] szerint az energia felhasználás az előírt termékfinomsággal és az anyag keménységével arányosan növekszik. Keményebb anyag aprításához nagyobb fajlagos energia szükséges és nagyobb fajlagos energiával finomabb termék érhető el [2], [22]. A fajlagos energia meghatározható a **terhelési intenzitás** (BI) és a **terhelési gyakoriság** (BH) (más néven terhelési szám) szorzataként is [6]. A fajlagos energia BUNGE [13] szerint:

$$E_M = BI \cdot BH \quad (3.6)$$

$$BH = \omega \cdot t \quad (3.7)$$

KWADE [3], [16] feltételezte, hogy a terhelési intenzitást a keverőtárcsa kerületi sebessége, az őrlőtestek mérete és az őrlőtestek sűrűsége határozza meg:

$$BI = d_g^3 \cdot \rho_g \cdot v_k^2 \quad (3.8)$$

Másoldalról a fajlagos őrlési energia keverő-golyósmalomban és centrifugális erőterben egyenlő, az őrlőgolyóknak a keverőtengely és a malomfal közötti helyzeti energia-különbséggel, amely átalakul kinetikus energiává. Következésképpen a fajlagos energia a keverőtárcsa átmérőjével (d_k), az őrlőtestek tömegével (m_g) és a centrifugális gyorsulással arányos (a_c) [4]:

$$E_M \propto d_k \cdot V_g \cdot (\rho_g - \rho_f) \cdot a_c \cdot \frac{1}{V_i} = d_g^3 \cdot (\rho_g - \rho_f) \cdot v_k^2 \cdot \frac{1}{V_i} = \frac{BI}{V_i} \quad (3.9)$$

Minden előírt őrlési finomsághoz az igénybevétel intenzitásának egy meghatározott optimális értéke tartozik [4], [16], [24]. Az intenzitást befolyásoló üzemi jellemzőket bármilyen körülmények között úgy kell megváltoztatni, hogy az intenzitás értéke mindig optimális értéken maradjon. Ha a terhelési intenzitás az optimális értéktől - túl alacsony vagy túl magas - növekszik az energiafelhasználás [6]. A golyók optimális és leghatékonyabb intenzitása a kívánt termékfinomságtól függ. Azonos fajlagos energia mellett és nagyobb őrlőtér esetén kapjuk a legfinomabb terméket (kisebb mediánérték), mert ebben az esetben kisebb terhelési intenzitás lép fel (vagyis az optimum mélyebben van) [24].

Egyéb paraméterek: Az őrlőtestek mérete és keménysége

Az aprítási eredményt befolyásoló tényezők között nem hanyagolható el az őrlőtestek mérete és keménysége. STEHR [17], MANKOSA [18], STADLER [12] és BUNGE [13] kutatási eredményei azt mutatják, hogy az aprítási eredmény és a fajlagos energia közötti kapcsolatot az őrlőtestek különböző geometriai, anyagi és fizikai tulajdonságai határozzák meg. A legfontosabb jellemző az *őrlőtestek mérete*. Az őrlőtest méretének a feladásra kerülő szilárd anyag szemcseméretéhez (a továbbiakban feladási határszemcseméret) kell igazodnia, mert a termék maximális szemcseméretét elsősorban az őrlőtestméret határozza meg. Kisebb őrlőtestméret megnöveli az őrlőtestek közötti érintkezések számát, nagyobb terhelési gyakoriságot és finomabb őrleményt eredményezve [2], [3], [4], [16], [24].

Egy meghatározott termékfinomság eléréséhez szükséges fajlagos energia függ az őrlőtestek geometriai és fizikai tulajdonságaitól és az őrlemény anyagi jellemzőitől is. Nagyobb szilárdságú anyag őrlése és/vagy finomabb őrlemény előállítása a fajlagos energiafelhasználás növelésével jár. Ahhoz, hogy egy meghatározott termékfinomság eléréséhez szükséges fajlagos energiaszükségletet minimalizáljunk, olyan őrlőtesteket kell alkalmaznunk, amely kemény és ezzel együtt, kicsi primer részecskékből épül fel.

Előzetes őrlési vizsgálatok azt mutatják, hogy túl kicsi méretű őrlőtestek (őrlőgolyók) ($d_g < 0,2$ mm) alkalmazásával alig történik aprítás. Ilyen őrlőtestméretnél nagyon kicsi a terhelési intenzitás ahhoz, hogy az őrlemény szemcséi aprózódjanak. Aprítás csak nagyobb méretű őrlőtesteknél ($d_g > 0,4$) következik be, mert ebben az esetben már elegendően nagy a terhelési intenzitás.

Az őrlemény mediánértékét (x_{50}) vizsgálva megfigyelhető az, hogy növekvő őrlőtest átmérővel ez az érték egy minimum értékig csökken; a minimumpontnál az őrlőtest mére-

te optimális. Vagyis az optimális érték eléréséig azonos fajlagos energia befektetés mellett, kisebb őrlőtestátmérővel, kisebb mediánérték érhető el. Az őrlőtest méretének további növelésével ismét növekszik a mediánérték. Így az aprítás céljának és az igényelt termékminőségnek megfelelően kiválasztható az az optimális őrlőtest átmérő, amelynél a szükséges fajlagos energia minimális [25, 35].

Növekvő őrlőtest átmérővel az őrlőtérben az őrlőtestpályák összeszűkülnek a malomtérben és az egyes őrlőtestek nem haladnak át a korábban említett magas energiasűrűségű területeken [16].

A korábbi fejezetre (3.4.1. fejezet) hivatkozva már tudjuk azt, hogy a termékfinomságot és a fajlagos energiát nemcsak az őrlőtest mérete, hanem annak sűrűsége és a keverőtárcsa kerületi sebessége is befolyásolja. Az őrlőtest sűrűségének a szuszpenzió viszkozitásához kell igazodnia. A keverőtárcsa kerületi sebességének növekedésével nemcsak az őrlőtestek érintkezési gyakorisága, hanem a sebességkülönbségtől függő nyíróerők is növekednek.

WEIT és KARBSTEIN munkássága [24] szerint azonos üzemi paramétereknél a fajlagos energia és a termékfinomság közötti kapcsolat független az őrlőtestek méretétől.

A fentiekből adódóan megállapítható, hogy a keverő-golyósmalomban történő őrlés esetén különleges jelentősége van az őrlőtestek helyes kiválasztásának. Meghatározott termékfinomság az őrlőtestméret és a töltési fok optimális értékének kiválasztásával érhető el.

Fontos szempont az *őrlőtestek keménysége* is (általában a Vickers keménységgel jellemezhető). Azonos fajlagos energia bevezetés mellett, keményebb őrlőtestek alkalmazásával finomabb terméket kapunk [4], [16], [19], [25]. Kísérleti úton megállapításra került, hogy azonos keménységű kerámia őrlőtestekkel, azonos fajlagos energiánál finomabb termék érhető el, mint hasonló keménységű acélőrlőtestek esetén [19], [25].

Mivel az aprítás a keverőmalomban lényegében az őrlőtestek között történik, ezért nem csak a szilárd anyag részecskék, hanem az őrlőtestek felülete is károsodik, kopik. A két őrlőtest közötti felületet a köztük lévő őrleményszemcsék terhelik (ún. háromszemcsés abrazív kopás jön létre). Az *őrlőtestek kopása* nem kerülhető el, de az a megfelelő őrlőtestek kiválasztásával csökkenthető. Kopási vizsgálatok során fontosabb tényező az elkopott tömeg, mint a kopás minősége. Az elkopott tömeg nem áll közvetlen kapcsolatban az őrleménnytömeggel, így ez viszonyítási számként való használatra nem alkalmas [20].

A dimenzó nélküli relatív őrlőtestkopás az összes kopásnak (dm_g) az őrlőtestek tömegére (mg) vonatkoztatott hányadosából adható meg. Ez a jellemző független az őrlőtest sűrűségétől. Növekvő töltési fokkal nő az őrlőtestek kopása és ezzel együtt az egyes kopási folyamatok száma is, de ugyanakkor csökken az összes kopás. Így a relatív őrlőtestkopás

értéke változatlan marad, vagyis az őrlőtestek töltési foka önmagában nem befolyásolja a relatív őrlőtestkopást [20].

3.5. AZ ŐRLÉSI FOLYAMAT MODELLEZÉSE

Az aprítási technológiai folyamat jellemzése, optimalítása és irányítása összetett feladat. Az aprítással előállított, a további felhasználásra alkalmas végterméket ugyanis rendszerint több - osztályozással egybekapcsolt - törési fokozattal állítják elő. A teljes aprítási - osztályozási folyamat

optimalására és tudatos szabályozására akkor van mód, ha a törési és szétválasztási eljárások leírására megfelelő matematikai modellek ismeretesek.

3.5.1. Modellezés alapjai

A modellezési módszerek alapja a különböző objektumok *hasonlóságának* felismerése. Az objektumok hasonlósága lehet teljes vagy részleges aszerint, hogy az objektumoknak összes, vagy csak a lényegesebb állapotátározó paramétereit vesszük-e figyelembe. Ha két objektum hasonló, az egyiket a modellezés objektumának, a másikat az objektum *modelljének* nevezhetjük.

A modellezési folyamat nem más, mint a modellezendő objektum tulajdonságainak vizsgálata a modell hasonló tulajdonságainak elemzése útján.

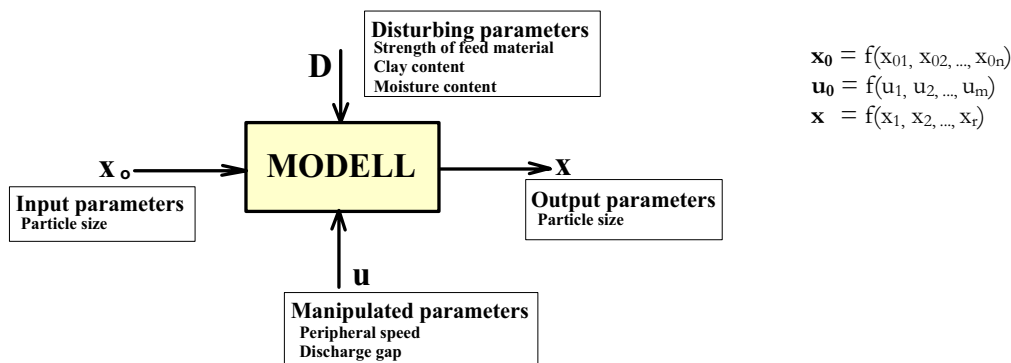
Matematikailag hasonló objektumok esetén a folyamatok különböző fizikai természetűek, de azonos egyenletekkel írhatók le.

A matematikai modellezés módszere azon alapul, hogy a modellezendő objektumban végbemenő, az objektum tulajdonságait jellemző valódi folyamat, meghatározott matematikai összefüggésekkel leírható törvényszerűségeknek alávett különböző elemi folyamatok eredője. Tehát a matematikai modell az objektumban végbemenő jelenségek lényegét tükröző matematikai leírás egyenletrendszeré, amelyhez adott egy megoldási algoritmus is.

A matematikai modell felírása a modellezett objektum formális leírásával kezdődik, amely során körülhatároljuk a modellezett objektumban végbemenő "elemi" folyamatokat. Az ilyen folyamatok tanulmányozása a matematika nyelvén, azaz egyenletek formájában való leírásuk lehetővé teszi, hogy ezeket az egyenleteket az elemi folyamatok viszonylag általános paraméterekkel jellemzett rendszerévé egyesítsük, és így a vizsgált objektum ma-

tematikai leírásához jussunk. A matematikai modellek gyakran nem teljesen analóg modellek, azaz a modellezés objektumának csak a legfontosabb tulajdonságait veszik figyelembe, ebben az esetben a leírás csak minőségi következtetések levonását engedi meg [57].

Minden modellezési folyamatot ábrázolhatunk a külső jellemzőkből kiindulva a 3.4. ábrán feltüntetett módon.



3.4. ábra: A modellezési folyamat vázlatja [72]

A folyamatot meghatározó paraméterek négy csoportba sorolhatók, amelyek meghatározzák annak lefolyását, és jellemzik állapotát bármely időpillanatban [72]:

- Bemenő paraméterek, x_{0i} ($i = 1, 2, \dots, n$), amelynek értékei alapvetően nem függenek a folyamat üzemétől, értékük mérhető, de megváltozásukra nincs mód.
- Módosított paraméterek, u_i ($i = 1, 2, \dots, m$), amelyeket meghatározott követelményeknek megfelelően befolyásolhatunk, ezáltal lehetővé teszik a folyamat irányítását.
- Zavaró paraméterek, D_i ($i = 1, \dots, l$), amelyek értéke időben véletlenszerűen változik és nem mérhető.
- Kimenő paraméterek, x_i ; ($i = 1, 2, \dots, r$), amelyek értékét a folyamat üzemeltetési körülményei határozzák meg.

A zavaró paraméterek hatásának eredménye bármely esetben az, hogy a folyamat kimenő paraméterei nem adhatók meg egyértelműen akkor sem, ha a bemenő és módosított paraméter értékeit ismerjük.

Az olyan folyamatokat, amelyekben a véletlen zavaró paraméterek hatása erős, rendszerint *sztochasztikus folyamatoknak* nevezik, míg a determinált folyamatok állapotparaméterei a bemenő és módosított jellemzők megadásával egyértelműen meghatározhatók.

A determinált folyamat célfüggvényét a bemenő, kimenő és módosított paraméterek függvényeként értelmezzük:

$$R = R(x_0, x, u)$$

Tehát az optimalizálási feladat csak akkor oldható meg, ha ismert a folyamat kimenő paramétereinek függése a bemenő és módosított paramétereiktől (3.5. ábra).

Modellek	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ matematikai modell: $\mathbf{x}=\Phi(\mathbf{x}_0, \mathbf{u})$ <ul style="list-style-type: none"> ○ egyenletekés függvények rendszere, valamint algoritmusok ➤ Fizikai modell <ul style="list-style-type: none"> ○ maga az objektum, vagy kisminta, valamint kísérleti tevékenység (procedúra) 	
A zavaró jellemzők hatása alapján a modell lehet:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ determinisztikus ➤ sztochasztikus a leírási mód szerint: <ul style="list-style-type: none"> ➤ fenomenológiai, ➤ félempirikus ➤ empirikus 	
<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="margin-right: 10px;">→</div> Célfüggvény </div>	
$\mathbf{R}=\mathbf{R}(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}, \mathbf{u})$ $\mathbf{R}=\mathbf{R}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u})$ $\mathbf{u}_{opt} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0, \mathbf{t})$ $\mathbf{u}_{opt} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0)$ $\mathbf{u}_{opt} = \mathbf{u}(\mathbf{x}_0, \mathbf{z}, \mathbf{t})$	szélsőérték dinamikus (nemstacionér) stacionér (statikus) helytől függő dinamikus

3.5.ábra Modellézés és optimalás [72]

A determinált folyamatok optimalása (a legkedvezőbb üzemeltetési körülmények megállapítása) az \mathbf{R} célfüggvény optimális szélsőértékének (\mathbf{u}_{opt}) és szélsőérték-függvényének meghatározásával elvégezhető.

A folyamatok matematikai leírásának jellegzetes egyenletcsoportjai az alábbiak:

- Elemi folyamatok egyenletei és általános törvényszerűségei,
- Mérlegegyenletek: anyag- és energiamérlegek,
- Elméleti, empirikus és félempirikus összefüggések (a folyamat különböző paramétereirei közötti összefüggések leírása),
- A folyamat paramétereire vonatkozó korlátozások.

Összefoglalva: a matematikai modell matematikai egyenletek rendszere, amely tükrözi a modellezési objektumban lejátszódó folyamatok lényegét, és amely lehetővé teszi, hogy meghatározott algoritmus segítségével előre jelezzük az objektum viselkedését a bemenő és módosított paraméterek változásakor.

3.5.2. Aprítási folyamat jellemzése empirikus törési függvényekkel

Fenomenológiai modell

A törés folyamatának mechanisztikus (fenomenológiai) modellbe való foglalásának gondolata EPSTEINTŐL (1948) származik [55]. A gépi aprítás jellemzése az egyedi szemcsék törésének statisztikai elemzésén alapszik: az egyedi szemcsék törését elemi törési folyamatnak nevezik.

A gépekben a törési esemény megismétlődik, következésképpen a töret az elemi törési folyamat - az egyedi szemcsékre nézve meghatározott valószínűséggel bekövetkező- megismétlődésének eredménye. A gépi törést tehát két - elsőként EPSTEIN által megfogalmazott- alapjelenség determinál: az igénybevételtől függő törés, amelyet adott anyagnál alapvetően az egyedi szemcsék törésével kapott termék szemcseméret-eloszlása jellemez; továbbá a géptől és a szemcsemérettől függő S törési valószínűség; ez utóbbi függvényt valószínűségi vagy szelekciós függvénynek (kinetikus modelleknél törési sebességnek) neveznek. BRAODBENT és CALLCOTT (1959) az y méretű szemcsék töretének szemcseméret-eloszlását $B(x,y)$ formában adják meg (ahol x a szemcseméret). A fenti modell a szemcse aprítógépekben való eltérő mozgásának figyelembevételével vált teljessé 1964-ben CALLCOTT és LYNCH munkássága alapján [55, 57], amelyet a C belső osztályozási (kihordási sebességi) függvény ír le.

A vázolt megfontolásokból származik a két legelterjedtebb fenomenológiai modell: a mátrix-modell és a kinetikus modell. A mátrix modell a törési folyamatot, olyan egymást követő törési eseményként írja le, amelyben minden egyes törési esemény feladása, a megelőző törési eseményből származó termék. A kinetikus modell szerint a törési események, a szemcseméret-változás időben folytonos folyamat. A durva és középaprítás területén a mátrix modellnek van jelentősége.

Empirikus modell

A gyakorlati alkalmazás szempontjából azonban nagy nehézségekkel jár a fenomenológiai modellek kialakításánál, hogy azok minden gépre, bármely anyag törésére alkalmas

formában álljanak rendelkezésre, továbbá hogy az egyedi szemcsékre alapozott - nyilvánvalóan csak korlátozott számban elvégezhető vizsgálatból- kell az üzemi gépi törés eredményére becslést tenni, amely a különösképpen a nagyméretű (pl. pofástörőnél és körtőnél gyakran 1...2 m) inhomogén kőzetdarabok törésénél kétséges.

Az empirikus függvények üzemi vagy fél-üzemi méréseken alapulnak. Az empirikus függvények alkalmazásáról, meghatározásának módjáról, kevés irodalmi forrást találunk. TARJÁN GUSZTÁV munkáiban [58] számos aprítógépre karakterisztikus töret-görbék (a töret maximális szemcseméretére, vagy a résméretre vonatkoztatott relatív szemcseméret függvényében) ad meg. További irodalom [56] pedig egy karakterisztikus függvény-görbét közöl, amelyet géptípustól és anyagtól függetlenül a körtörőre jellemzőnek tartanak. Az empirikus függvények azonban sem az anyagtól, sem pedig a gép üzemmódjától nem lehetnek függetlenek

Az aprítás teljes technológiai folyamatának optimalizálásáról számoltak be CSÓKE B. és KUTATÓTÁRSAI [71], akik egy kőbányánál a robbantási és törési technológia együttes optimalizálását oldották meg számítógépes szimuláció segítségével [71]. A szerzők egy teljes technológiai folyamat – amely ez esetben kőzetrobbantásból, törésből, majd osztályozásból állt – optimalizálásá-

nak gyakorlati megvalósítását ismertették cikkükben. A szerzők a robbantást és a törést leíró függvények paramétereit mérésekkel állapították meg. Összesen háromféle törőgépekre, *profás, körtörő, kúpos törőkre* vonatkozóan végeztek kísérleteket. A szerzők arra a kérdésre keresték a választ, hogy milyen robbantási feltételek és törési műveletek szükségesek az ügyfelek által a termék mennyiségére és minőségére vonatkozó követelmények gazdaságos teljesítéséhez..

Az aprítási folyamat optimalizálását mutatták be egy példán keresztül CSŐKE B. és RÁCZ J. [72]. Nagyon összetett ez a feladat, mert a különböző órlesi szakaszokban különböző mechanikai hatások érvényesülnek – mutatták rá. Az aprító-osztályozó folyamat tudatos szabályozása akkor lehetséges, ha az aprítási és a szétválasztási folyamatokat leíró matematikai modellek ismertek. A szerzők a vizsgált kalapácsos malomban történő őrlés leírására mátrixos modellt alkalmaztak, s a modellben szereplő törési és szelekciós függvényeket határozták meg mészkoőrlesi kísérleteikkel. A függvények becslésének pontosságát a szerzők kísérletekkel ellenőrizték. Az őrlemény tapasztalati és számított eloszlása közötti csekély eltéréssel igazolták modelljük alkalmazhatóságát. Azt is megállapították a szerzők, hogy a termék szemcseméret szerinti eloszlása és a szemcsék törési valószínűsége mind a betáplált őrlendő anyag méret szerinti eloszlásától, mind a kalapács kerületi sebességétől is függ.

Az empirikus törési függvények meghatározásakor tehát a munkahipotézisből [57] indulhatunk ki, hogy az aprítógépekre elsősorban a töret-függvény alakja a jellegzetes. A

matematikai alakjuk kiválasztásánál-megfogalmazásánál is tekintettel kell lenni a gép működésére. A gépre jellemző törési függvény paramétereit ugyanakkor az anyagtól és a gép fő műszaki paramétereitől egyaránt függenek; adott anyag esetén, pedig alapvetően csak a változó (változtatható) gépi paraméterektől. E megoldás lehetővé teszi, hogy az empirikus törési függvény adott gépre vonatkozó alakját, valamint a függvényparaméterek függését a fő gépi fizikai jellemzőktől, az adott üzemben (és az adott anyagra) korlátozott számú méréssel meghatározhassuk és a teljes technológiai folyamatot kellő pontossággal leírhatjuk (számítógépi algoritmussal szimulálhassuk) és optimalizálhassuk.

Az empirikus modellek megalkotásakor a feladat tehát a töret szemcseméret-eloszlását megfelelő pontossággal leíró függvény kiválasztása, továbbá e függvény-paramétereit és a gépi fizikai paraméterek közötti kapcsolat feltárása:

$$B = f(\xi)$$

ahol $\xi = f$ (szemcseméret, fizikai paraméterek, üzemjellemzők).

3.6. HASONLÓSÁGI VIZSGÁLATOK: DIMENZIÓANALÍZIS ÉS SCALE UP

A dimenzióanalízis akkor használható, ha nem ismert a folyamat modellje, de ismertek a jelenséget jellemző fizikai változók.

3.6.1. *Kisminta*

Az egyes fizikai jelenségek nagyon különböző méreteken mennek végbe. Az életben felvetődött feladatok megoldásakor gyakran viszonylag *kicsi*, más esetekben aránylag *nagy méreteken* lezajló folyamatokat kell tanulmányoznunk.

Ez utóbbi esetben lehetséges, nem az eredeti folyamatot, hanem annak kicsinyített mását, *mintáját* vizsgáljuk, és annak tanulmányozásával igyekszünk a feladatot megoldani.

Azonban egy nagyobb méretű jelenség helyett egy *kismintát* csak akkor tanulmányozhatunk, az egyik méretű jelenség esetén végzett megfigyelések, mérések eredményei alapján a másik jelenségre, annak lefolyására csak akkor következtethetünk, ha a két jelenség között *kölcsönös és egyértelmű kapcsolat* áll fenn. Arra a kérdésre, hogy a két vagy több különböző méreteken lejátszódó jelenség közötti kölcsönös és egyértelmű kapcsolatnak mik a feltételei, a *kisminta vizsgálatok elmélete* igyekszik feleletet adni.

A kisminták tanulmányozása, a kismintavizsgálati módszerek alkalmazása a műszaki tudományok területén nagymértékben elterjedt.

A kismintavizsgálati módszerek ma már a műszaki tudományok számos területén mindennapi feladat-megoldási segédeszközökként szerepelnek. Gyors és nagymértékű elterjedésük oka a felvetődő feladatok számának növekedése, alkalmazásának célszerűsége és gazdaságossága. Célszerű alkalmazásuk és lehetőségeik kihasználása elméletük, ill. alkalmazási területük ismerete nélkül nem képzelhető el [68].

Nagyon sok tudományág fejlődésének kezdetét nem ismerjük. Nem tudjuk megmondani, hogy ki, mikor vetette fel, fogalmazta meg azokat a gondolatokat, amelyek egy-egy tudományág fejlődésének kezdetét jelentik. A gyakorlati feladatok megoldására először *J. Smeaton* (1724-1792) végzett kisminta kísérleteket (elsősorban a hidromechanika területén). Az elmélet alapjának a hasonlóság fogalmát, valamint annak definícióját tekintették és az újabb invariánsok meghatározása inkább csak az alkalmazási terület kiszélesítését, mint az elmélet továbbfejlesztését jelentette. Az ebben a tárgykörben megjelent tanulmányok elsősorban az alaptételeket (geometriai, kinematikai, dinamikai, mechanikai hasonlóság fogalmát stb.) azok kifejezőmódjait rendszerezik és gyakorlati alkalmazási lehetőségekre mutatnak rá, meghatározva az invariáns csoportok alapján a különböző jellemző mennyiségek átszámítási tényezőit. Bizonyos mértékben megkönnyítette az invariáns csoportok meghatározását és általánosabbá tette használatukat a *dimenzióanalízis* tételeinek kidolgozása, amelyet *D. P. Rjabusinszkijnek* (1882) és *Buckinghamnek* (1867-1940) tulajdonítanak [68].

A **dimenzióanalízis** többek között megadja a meghatározott számú jellemző mennyiségből képezhető invariáns mennyiségcsoportok számát és a képzés módját. Az invariáns mennyiségcsoportok számát megkapjuk, ha a folyamatot jellemző, elsődlegesen fontos jellemző mennyiségek számából levonjuk az alapmértékegységek számát.

A kisminta vizsgálatok elméletének további fejlődését jelenti a *dimenziómátrix* fogalmának, valamint a képezhető invariánsok számára vonatkozó *Langhaar-féle szabály* bevezetése, amely szerint valamely jelenséget jellemző mennyiségekből alkotható invariáns csoportok számát a jellemzők számának és a dimenziómátrix rendszámának különbségéként kapjuk. A dimenzióanalízis tételeit, valamint az invariáns mennyiségcsoportok meghatározásának újabb módját *H. L. Langhaar* 1951-ben megjelent könyvében ismertette, rámutatva egyúttal használatuk lehetőségeire is [60].

3.6.2. Kisminta-, és hasonlósági vizsgálatok elmélete

A kisminta vizsgálatok elméletének egyik alapfogalma a rendszerek, folyamatok és jelenségek hasonlósága. *Hasonlónak* nevezzük azokat a folyamatokat, amelyekben az egymásnak megfelelő jellemző mennyiségek viszonya állandó.

A hasonlóság eseteit a 3.2. táblázatban foglaltam össze. A hasonlóság legegyszerűbb esete a *geometriai hasonlóság*. Ha az összehasonlított rendszerek mozognak, megvizsgálhatjuk, hogy azok *kinematikailag hasonlók-e*. Az erre vonatkozó arányszámokat választhatjuk. Ha λ és τ értékeit megválasztottuk, a hosszúságból és az időből összetett dimenziójú mennyiségek viszonya már nem állapítható meg önkényesen, az csakis meghatározott érték lehet. Az összehasonlított rendszereket megvizsgálhatjuk abból a szempontból is, hogy erőtanilag, *dinamikailag hasonlók-e*. A λ , π , τ mennyiségeknek az az egy közös tulajdonságuk van, hogy mindhármuk dimenziója 1. Ennek eredményeképpen bármilyen mértékegységben is fejezzük ki azokat a mennyiségeket, amelyeknek viszonyaként a λ , a π , és a τ mennyiségeket értelmeztük, ha mind a számlálóban, mind a nevezőben azonos mértékegységekben kifejezett mennyiségek szerepelnek, a törtek értéke változatlan marad. Vagyis, π és τ értéke változatlan, akár a kismintára, akár pedig a nagyméretű jelenségre vonatkozó mennyiségeket helyettesítjük a számlálóba és a nevezőbe. Ezért ezeket a mennyiségeket *invariánsoknak* nevezzük. A mennyiségcsoportok számértékének ez az invarianciája lehetővé teszi azt, hogy a különböző méretekben lejátszódó folyamatok egymásnak megfelelő jellemző mennyiségei közötti kapcsolatot matematikailag egyértelműen kifejezhessük. Ezért gyakran *kisminta törvényeknek* is nevezik ezeket a mennyiségcsoportokat.

Azokat a rendszereket, amelyekben a geometriai, a kinematikai, valamint a dinamikai hasonlóság követelménye egyidejűleg kielégített, *mechanikailag hasonló* rendszereknek nevezzük [60].

Hasonlóság típusa	Hasonlóság feltétele	Arányszám
Geometriai	$\lambda = \frac{l'}{l''}$	Az egymásnak megfelelő pontok távolságának viszonya (hosszúság)

Kinematikai	$\tau = \frac{t'}{t''}$	A mozgási folyamatok lefolyásának egymásnak megfelelő időtartama (idő)
Dinamikai	$\pi = \frac{P'}{P''}$	Azon mennyiségek viszonyozása, amelyeknek dimenziója a hosszúság, idő, erő vagy tömeg alapidimenziókból származtatható. (Például a sűrűségek viszonya).
Mechanikai	Mindhárom feltétel teljesülése egyidejűleg	

3.2. táblázat Folyamatok hasonlósági esetei [60]

A kismintabeli folyamat megtervezéséhez ismernünk kell a nagyméretű jelenség jellemzőit, és természetesen fordítva. A jellemzőkből alkotott *invariáns csoport* numerikus értékét a jellemző mennyiségek ismeretében meghatározhatjuk. A numerikus érték az invariancia következtében változatlan marad akkor is, ha a csoportot, a kismintát jellemző mennyiségekből képezzük. Mivel a kisminta tervezésekor bizonyos mennyiségek számértékét különböző körülmények megkötik vagy ismertté teszik, vagy a megfelelő érték kiválasztását megkönnyítik, a nagyméretű, valamint a kisméretű jelenség (kisminta) jellemzőiből képzett invariáns csoportokat számértékük egyenlősége alapján egymással egyenlővé téve az így kapott egyenletből az ismeretlen mennyiség vagy mennyiségek az ismert vagy felvett értékű egyéb mennyiségek függvényében kifejezhetők.

Invariáns csoportokat nemcsak két mennyiség viszonyaként, hanem több mennyiségből is alkothatunk. (Hidromechanikai kismintavizsgálatok során öt variáns csoport – a Newton-szám, a Froude-szám, a Reynolds-szám, a Weber-szám, és a Rayleigh-Cauchy-szám- szerepel leggyakrabban. A fizika egyéb területein szintén számos, a fent említettektől eltérő invariánssal dolgoznak).

3.6.3. Az elmélet hiányosságai és alkalmazásának nehézségei

A *kisminta vizsgálatok elmélete* általában logikusan felépített. Ennek ellenére vannak esetek, amikor az elmélet, belső ellentmondásai miatt, nem felel meg céljának, vagyis nem alkalmas arra, hogy segítségével különböző mértékben lejátszódó folyamatok egymásnak megfelelő jellemző mennyiségei közötti összefüggéseket egyértelműen kifejezhessük.

Az *elmélet ellentmondásai* akkor válnak nyilvánvalóvá, amikor olyan folyamatokat tanulmányozunk, amelyeknek jellemző mennyiségei egynél több, különleges kismintatörvény által támasztott követelmények egyidejű kielégítését teszik szükségessé. Ez az az eset, amikor azonos méretekben lejátszódó folyamatokat hasonlítunk össze. Így a kismintavizsgálatok elmélete sokszor éppen a nehezebb, bonyolultabb feladatok megoldására nem mutat irányt, éppen olyan feladatok esetén nem használható, amelyeknek megoldása bonyolultságuk miatt a szilárd elméleti alap megteremtését leginkább szükségessé tenné. A kismintatörvények alkalmazási nehézségeivel találkozunk olyan esetekben is, amikor a folyamatot jellemző mennyiségek közül egynek vagy többnek nemcsak a *nagysága*, hanem az *iránya* is fontos jellemző a jelenség lefolyása szempontjából [68].

4. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

4. 1. ANYAGVIZSGÁLATI MÓDSZEREK

A gyöngyösoroszi meddő komponensek fizikai feltárásának kutatása során számos anyagvizsgálati módszer alkalmazására került sor.

A gyöngyösoroszi flotációs meddőhányóból származó pirites, galenites, szfalerites komplex szulfidos anyag mintavételezése 3 helyen történt. A mintavételezési szempontokat a meddőhányó szerkezete, aljzata és felépítése határozza meg [52]. A gyöngyösoroszi meddőhányó morfológiájának feltérképezése és a technológiai rétegek kijelölése után, a fúrási háló megtervezése és a mintavételező fúrások elvégzése következett. A mintavételezéshez egy kézi működtetésű hidromotoros fúróberendezést használtunk, amely berendezést a Miskolci Egyetem Eljárástechnikai Tanszékének laboratóriumában egy OTKA kutatás keretében [78] alakítottak ki.

A feladásra kerülő *mintaanyag és az őrlemény szemcseméret eloszlásainak leírására szolgáló függvények felvétele* szitaelemzéssel és lézeres szemcseelemző berendezés segítségével történt.

A *minta sűrűségét* piknométeres mérési módszerrel mértem.

A *mintaanyag kémiai és ásványtani összetételének* meghatározására EDAX energiadiszperzív mikroszonda és röntgendiffrakciós készülék állt rendelkezésre.

Az eljárástechnikai vizsgálatokban a *feltártság megállapítására* elsősorban a mikroszkópi jellemzés alkalmas, amellyel a kívánatos őrlési finomság, és az őrlést követő feltártság jellemezhető. A gyöngyösoroszi minta fizikai feltáródásának vizsgálatára fény-, és elektronmikroszkópot használtunk. Így a fizikai feltárhatóságot mikroszkópi felvételek segítségével ellenőriztem elsősorban fénymikroszkóp alkalmazásával. A *fénymikroszkópos felvételek* LEITZ-

Metalloplan polarizációs mikroszkóppal készültek a Miskolci Egyetem Ásvány- és Kőzettani Tanszékén (Dr. Máday Ferenc) és a Berlieni Műszaki Egyetem Elektronmikroszkópi Központjában

(ZELMI). Az előbbi esetben a mikroszkópra egy fekete-fehér videokamera van csatlakoztatva. A kiértékeléshez UTHSCSA Image Tools képelemző programot használtunk. A vizsgálatok áteső fényben történtek, ami optimális a kisebb szemcseméret tartományba eső ásványiszemek mikroszkópi vizsgálatához.

A mintaanyag *fajlagos felületét* Griffin-készülékkel mértem meg.

A mintaanyag *apríthatóságát, őrlhetőségét* Bond és Hardgrove módszerrel is meghatároztam. E vizsgálatok megmutatták, hogy nincs megfelelő módszer a finom anyagok őrlhetőségének jellemzésére. Egyrészt a Bond és a Hardgrove módszer előírt durva szemcseméretet igényel, másrészt az őrlhetőség a berendezéstől is függ. Ezért az őrlhetőséget a keverőmalomra kialakított saját eljárással állapítottam meg. A módszer helyességének igazolására a meddőmintával párhuzamosan további három másik anyag őrlhetőségi vizsgálatát is elvégeztem, ami igazolta az azonos őrlési viselkedésüket a keverő-golyósmalomban.

A mintaanyagból képzett, és az őrlésre került *szuszpenzió dinamikai viszkozitásának* meghatározására rotációs viszkozimétert használtunk.

A *keverő-golyósmalom teljesítményszükségletét* nyomatéktávadó segítségével mértem meg.

4. 2. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSÉRE ALKALMAZOTT MÓDSZEREK

Az *őrlési adatok feldolgozását, értékelését* az értekezés célkitűzéseinek megfelelően az ásványelőkészítési értékelési-vizsgálati módszerekkel (szemcseméret-eloszlási függvények, jellegzetes szemcseparaméterek, aprítási fok stb. származtatásával és összevetésével) végeztem el. A matematikai modellek, függvények paramétereit nemlineáris paraméterbecslési eljárással határoztam meg. A *szemcsesajátóságok jellemzése* laboratóriumi, táblázatos és grafikus meghatározással is megtörtént.

A Brookfield RVDV-III.+ típusú *rotációs viszkoziméterrel végzett mérések* során kapott folyási paramétereket közelítő függvénnyel határoztam meg, ami után az abszolút viszkozitási tényező értékét matematikai formában írtam fel.

Ahhoz, hogy a kísérleti adatokból becslést tehessünk az üzemi berendezés méretére, megfelelő méretezési eljárás szükséges. Itt elsősorban a malomkapacitás és a teljesítményszükséglet, valamint a méret-, és az üzemjellemzők közötti összefüggéseket kell ismernünk. Ilyen összefüggéseket a szakirodalomban nem találtam. Szükséges volt tehát, ezen összefüggések feltárása. E célra a *dimenzióanalízis* módszerét alkalmaztam, amelynél feltételeztem,

hogy a

$$P = f(n, c_m, \varphi_m, d_k, d_g, \dots)$$

összefüggés létezik, de konkrét matematikai alakja nem ismert.

A laboratóriumi modell ipari (üzemi) méretekben történő megvalósítására *scale up* modellt alakítottam ki.

5. A GYÖNGYÖSOROSZI MEDDŐMINTA ELJÁRÁSTECHNIKAI ANYAGVIZSGÁLATA

5.1. MINTAVÉTELEZÉS

Az ércbányászati meddőhányók a bennük előforduló komponensek alapján két részre oszthatók; a kitermelés során keletkező (a feldolgozás szempontjából meddőnek minősülő kőzetekből létrehozott) és a feldolgozásból kikerülő, maradék anyagokból (flotálási maradékanyag) képződő depóniák (többnyire zagytározók). A hasznosíthatóság szempontjából a figyelmet elsősorban a feldolgozási maradék anyagokra célszerű fordítani. Ez utóbbi csak nagyobb arányban tartalmaz érces ásványokat, ami hasznosításukat is gazdaságosabbá teheti.

A feldolgozási folyamaton átesett ásványos anyagok hulladékából képzett zagytározók anyagára jellemző, hogy a hányókialakítás során a technológia változhatott, a hányó alkotóinak kémiai összetételében réteges szelekció mehet végbe és a biológiai folyamatok lokális dúsulásokat és szennyeződéseket eredményezhetett. A fenti megállapítások érvényesek a Gyöngyösorosziiban található ércbányászati meddőhányóra is [52].

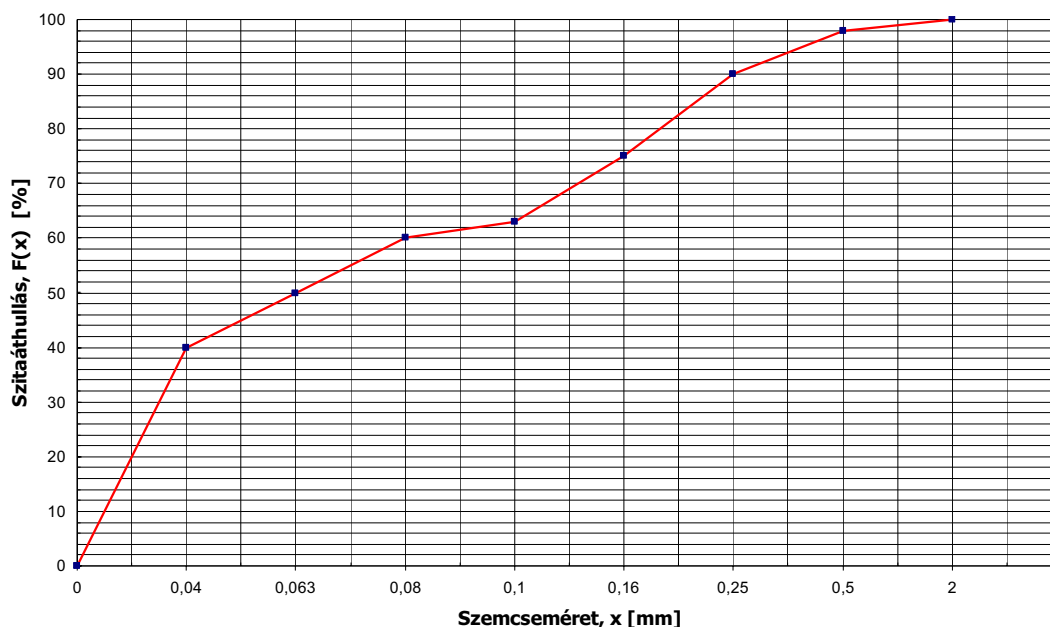
A *mintavételezésre* alkalmazott hidromotoros fúróberendezés, csatlakozó fúrórudazattal maximum 8 m mélységig alkalmas teljesszelvényű magfúrásra, ill. spirálfúrásra. A kialakított fúróberendezés meghajtó energiaforrását 11 LE Honda-motorral hajtott fogaskerék-szivattyú biztosítja. A magfúráshoz 60 mm átmérőjű keményfém-koronás magcső tartozik. A spirálfúrók átmérője 60 ill. 80 mm, a csatlakoztatható rudazatok hossza egyenként 0,8 m. A rudazat és a vett minta kiemelése kézi erővel és 5 t teherbírású golyós megfogású karos emelővel történt.

5.2. A MINTAANYAG SZEMCSENAGYSÁG-ELEMZÉSE

A minta előkészítését (szárítás, homogenizálás és mintakisebbités) követően a feladás szemcseméret-eloszlását *nedves szitaelemzéssel* állapítottam meg. A szemcsenagyság-eloszlás számítását az 5.1. táblázatban, ábrázolását az 5.1. ábrán tüntettem fel. A szemcseméret-eloszlási adatokból látható, hogy a feladott gyöngyösoroszi minta 50 %-os szemcsemérete 63 μm , 80 %-os szemcsemérete 175 μm .

Sorszám	Szemcsefrakció x [mm]	Tömeghányad dm [%]	Szitaáthullás F(x) [%]
1.	- 0.040	40	40
2.	0.040-0.063	10	50
3.	0.063-0.08	10	60
4.	0.08-0.10	3	63
5.	0.1-0.16	12	75
6.	0.16-0.25	15	90
7.	0.25-0.5	10	100
Összesen:		100.00	

5.1. táblázat Szemcsenagyság-eloszlás számítása nedves szítálás esetén



5.1. ábra Szemcseloszlás nedves szítálás esetén

5. 3. A MINTAANYAG SŰRŰSÉGE

A minta sűrűségét *piknométeres mérési módszerrel* határoztam meg. A sűrűségméréshez mintakisebbités útján nyert átlagmintát használtam.

A szilárd anyag sűrűségét az alábbi összefüggéssel [8] állapítottam meg:

$$\rho_{sz} = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 + m_2 - m_1} \cdot \rho_k \quad (5.1)$$

ahol

- m_1 -az üres piknométer tömege,
- m_2 -a piknométer és a szilárd anyag együttes tömege,
- m_3 -a piknométer, a szilárd anyag és a közeg együttes tömege,
- m_4 -a közeggel töltött piknométer tömege,
- m_5 -a desztillált vízzel töltött piknométer tömege és
- ρ_k -a közeg sűrűsége.

A közeg sűrűségének meghatározása:

A mérés során közegként denaturált szeszt alkalmaztam, amelynek sűrűségét a következő összefüggés adja meg:

$$\rho_k = \frac{m_4 - m_1}{m_5 - m_1} \cdot \rho_v \quad (5.2)$$

A sűrűséglemezés mérési eredményeit az 5.2. *táblázatban* foglaltam össze.

Piknométer sorszám	m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]	m_4 [g]	m_5 [g]
1	36,82	63,57	97,31	79,24	87,58
2	39,38	65,15	99,70	82,28	90,62

5.2. táblázat A piknométeres sűrűséglemezés mérési eredményei

A mérések során kapott közegsűrűség:

$$\rho_{k1} = 0,8357 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_{k2} = 0,8372 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_{k\text{átlag}} = 0,8364 \text{ g/cm}^3$$

A szilárd anyag sűrűsége:

$$\rho_{sz1} = 2,5776 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_{sz2} = 2,5813 \text{ g/cm}^3 \quad \rho_{sz\text{átlag}} = 2,579 = 2,58 \text{ g/cm}^3$$

A fenti számítások alapján a minta sűrűsége, $\rho_{sz} = 2580 \text{ kg/m}^3$.

5.4. KÉMIAI ÉS ÁSVÁNYTANI ÖSSZETÉTEL

A gyöngyösoroszi minta kémiai elemzésének adatait az 5.3. táblázat ismerteti. A kémiai elemzés a Bányászati Kémiai Kutató Laboratóriumban (mai nevén Alkalmazott Kémiai Kutatóintézet) tör-

tént, az elemzéseket Dr. Lakatos János végezte [79]. A vizsgálat eredményei azt mutatják, hogy a nehézfémek elsősorban a 40 µm alatti frakcióban dúsulnak. A kvarc és nemfémes ásványok egyenletesen oszlanak el a meddőanyagban.

x (mm)	Na	K	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe	Al	Sr	Ba	Cd	Cr	Mg	Ca	Si	Ti	As
Feladás	0,35	1,89	0,08	0,03	0,19	0,18	3,59	3,29	0,01	0,05	0,003	0,003	0,46	6,02	30	0,17	0,016
< 0,04	0,31	1,97	0,13	0,04	0,27	0,16	4,88	4,16	0,01	0,046	0,003	0,003	0,64	6,37	26,3	0,19	0,016
0,040-0,063	0,31	1,57	0,06	0,02	0,14	0,18	3,97	2,43	0,009	0,046	0,003	0,003	0,35	6,86	30,1	0,14	0,016
0,063-0,080	0,31	1,56	0,04	0,015	0,11	0,16	3,42	2,33	0,009	0,046	0,002	0,002	0,33	6,47	30,8	0,13	0,019
0,08-0,1	0,34	1,57	0,04	0,016	0,11	0,16	2,84	2,29	0,009	0,043	0,002	0,002	0,33	6,22	30,6	0,13	0,022
0,1-0,16	0,35	1,55	0,04	0,013	0,09	0,15	2,28	2,28	0,009	0,041	0,002	0,002	0,32	5,7	33,6	0,13	0,002
0,16-0,25	0,4	1,91	0,03	0,015	0,1	0,14	1,81	2,68	0,009	0,045	0,002	0,002	0,37	4,56	34,6	0,15	0,015
>0,25	0,58	2,32	0,04	0,02	0,13	0,11	3	4,42	0,01	0,063	0,004	0,004	0,48	2,47	30,9	0,3	0,011

5.3. táblázat A gyöngyösoroszi minta kémiai elemzésének adatai százalékosan [79]

A gyöngyösoroszi ércre elvégzett kémiai elemzés szerint számított ásványtani összetétel alakulását az 5.4. táblázat ismerteti [74]. Az elemzés szerint a meddőanyagban található főbb fázisok: kvarc (42,2 %), szilikátok (39 %), karbonátok (17,1 %) és szulfidok (1 %), amely kalkopirit, galenit, szfalerit, pirit és arzenopirit ásványokból áll.

Ásványcsoport megnevezése	Ásványok megnevezése képletesen	Tartalom, %
Oxidok	SiO ₂	42,20
	FeTiO ₃	0,600
Szilikátok	KAlSi ₃ O ₈	30,00
	NaAlSi ₃ O ₈	9,00
Karbonátok	CaCO ₃	15,00
	MgCO ₃	1,70
	MnCO ₃	0,40
Szulfidok	CuFeS ₂	0,083
	PbS	0,094
	ZnS	0,28
	FeAsS	0,03
	FeS ₂	0,51
Szulfátok	BaSO ₄ és SrSO ₄	0,10

5.4. táblázat A gyöngyösoroszi minta ásványtani elemzésének adatai százalékosan [74]

5.5. ŐRÖLHETŐSÉGI VIZSGÁLATOK

A mechanikai diszpergálásra kerülő anyagok jellemzéséhez elengedhetetlen az őrlendő anyag mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállásának, illetve őrlhetőségének ismerete. Az őrlhetőség anyagjellemző, amelynek meghatározása nehéz feladat. Az őrlhetőségi mérőszám azt mutatja meg, hogy egységnyi energiáfordítással milyen aprítási eredmény érhető el. Az aprítási eredmény vizsgálata előtt ismernünk illik azt, hogy mit értünk a mechanikai diszpergálás

eredménye alatt. A mechanikai diszpergálás eredményét a Rittinger-elv [10] jellemzi, amelyet a következő összefüggés ír le:

$$\Delta S = k \cdot W_B \quad (5.3)$$

ahol ΔS a képződő új felület, k arányossági tényező és W_B a fajlagos őrlési energia.

A mechanikai aktiválás eredménye nem csak a felület és a diszperzitásfok növekedésével, hanem a felületminőség változásával járó folyamat. Az őrlhetőségnek, mint anyagjellemzőnek értelmezését tovább vizsgálva megállapítható, hogy egyetlen mérőszámmal nem jellemezhető egy rideg anyag őrlhetősége, miután az a diszperzitásfokkal változik, és ez függ a részecskék egyedi tulajdonságaitól (keménység, porozitás stb.), valamint kölcsönhatásra való hajlamuktól. Csak ezen anyagtulajdonságok figyelembevételével fogadhatjuk el anyagjellemzőként az őrlhetőségi mérőszámot. De az őrlhetőség mérőszáma BEKE [75] szerint magába kell, hogy foglalja az őrlési eljárást és annak jellegzetességeit is. Az őrlhetőségi mérőszámok megállapításának célkitűzése, hogy jelezze az anyag őrlhetőségi tulajdonságait, megfelelő őrlési finomság és az őrlési folyamat szimulálása mellett.

5.5.1. Elterjedt őrlhetőségi vizsgálatok

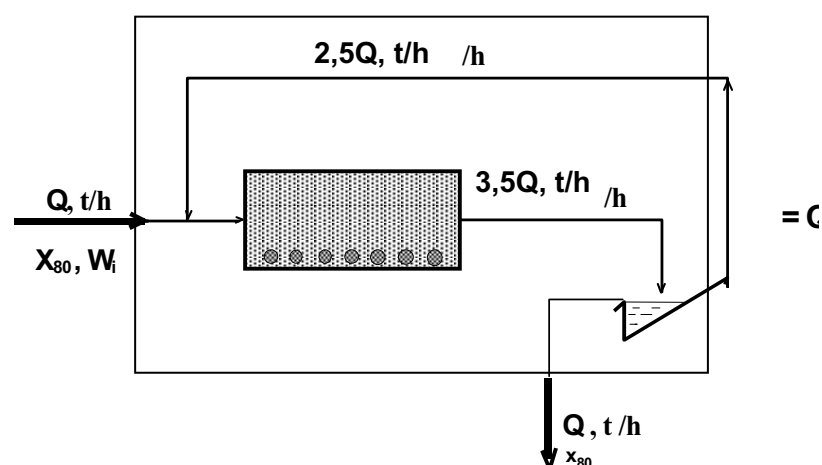
Az őrlhetőségi mérőszámok megállapítása a pontosan körülírt laboratóriumi körülmények között végzett őrlés alapján történik. Az a törekvés, hogy a laboratóriumi vizsgálatokból következtetni lehessen az üzemi őrlés energiaszükségletére, az őrlőberendezések kapacitására több őrlhetőségi vizsgálat (Hardgrove, Zeisel-, Bond-módszer, stb.) kidolgozására vezetett. Mind a mai napig az ásványiparban, ásványelőkészítésben a Bond-módszer a legelterjedtebb.

Ezen eljárások alkalmazási területéről és az őrlhetőségi mérőszámok használhatóságáról a következő megállapítások tehetők [47, 75]:

Bond-módszer:

BOND a zárt körfolyamatos nedves őrlés laboratóriumi golyósmalomban történő szimulálását dolgozta ki. és őrlhetőség W_j mérőszámát, mint anyagjellemzőt határozta meg. Az

őrlési folyamatot 2,44 x 2,44 m belső méretű malommal modellezte laboratóriumban. Az üzemi zárt körfolyamatos nedves őrlést (a kész finom termék aránya a visszajáró durva termékhez 1 : 2,5) az 5.2. ábra szemlélteti.



BOND szerint [8, 75] az üzemi őrlés fajlagos energia-szükséglete a következő összefüggéssel írható le:

$$W_B = W_i \left(\frac{1}{\sqrt{x_{1,80}}} - \frac{1}{\sqrt{x_{0,80}}} \right) \quad (5.4)$$

ahol $x_{0,80}$ a feladás, $x_{1,80}$ az őrlemény 80 %-os szemcsemérete (μm), W_i a Bond-féle „munkaindex“, vagyis a végtelen szemnagyságról $1 \mu\text{m}$ -re való őrlés fajlagos energia-szükséglete (kWh/t).

A laboratóriumi mérés adataiból a Bond-féle „munkaindex“ (a továbbiakban Bond-munkaindex) az alábbi összefüggéssel [8, 47] határozható meg:

$$W_i = \frac{4,9}{x_{\max}^{0,23} G^{0,82} \left(\frac{1}{\sqrt{x_{1,80}}} - \frac{1}{\sqrt{x_{0,80}}} \right)} \quad (5.5)$$

ahol x_{\max} az őrlési finomság (a laboratóriumi őrlésnél alkalmazott ellenőrző szita nyílásmérete, rendszerint $100 \mu\text{m}$), G őrlhetőségi tényező (g/fordulat), az egyensúlyi állapotban a

laboratóriumi malomban 1 fordulat alatt újonnan képződő $< x_{\max}$ szemcseméretű anyag tömege. A laboratóriumi mérés tehát a G tényező meghatározására irányul.

Hardgrove-módszer:

A Hardgrove-eljárást az Egyesült Államokban szenek relatív őrlhetőségi tényezőjének meghatározására 1937-ben vezették be szabványos módszerként [8, 75]. A Hardgrove-módszer gyakorlati alkalmazásánál a mintával meghatározott mennyiségű őrlési energiát közlünk, majd az őrlés eredményét szitalással állapítjuk meg. Nagyobb Hardgrove-szám könnyebb őrlhetőséget jelent.

Az előírás szerint a Hardgrove-index meghatározása során $50 \text{ g} - 50 \text{ g}$ mintát $0,63-1,25 \text{ mm}$ szemcsefrakciókból 60 malomfordulatig kell őrlni, majd ezt követően az őrleményt $0,074 \text{ mm}$ -es (az előbbi frakciót) szitafrakciókra kell bontani.

A Hardgrove-index értéke (a 0,63-1,25 mm feladási szemcsefrakcióra vonatkozóan) az alábbi összefüggéssel határozható meg [8, 75]:

$$^0H = 13 + 6,93 \cdot m_H, \quad (5.6)$$

ahol m_H a 0,074 mm-nél kisebb méretű szemcsék tömege

SMITH, R.W. [46] szerint a Hardgrove-indexből számított Bond-index (W_H) az alábbi empirikus formulával megbecsülhető (ún. "becsült Bond-index"):

$$\text{Hiba! A mezők szerkesztésével nem hozhatók létre objektumok.} \quad (5.7)$$

Őrölhetőség meghatározása a kísérleti keverőmalomban végzett őrléssel:

Az üzemi őrölhetőség megállapításához elengedhetetlen az őrléshez szükséges összes befektetett munka és az őrlési finomság közötti összefüggések ismerete. Az összes befektetett munka az alábbi összefüggéssel határozható meg:

$$W_f = \frac{P_m - P_{m,0}}{\dot{M}_{sz}} = \frac{(M - M_0) \cdot \omega}{\dot{M}_{sz}} = \frac{(M - M_0) \cdot 2\pi \cdot n}{\dot{M}_{sz}} \quad (5.8)$$

ahol P_m a malomteljesítmény, $P_{m,0}$ az üresjárású malomteljesítmény, M a hajtómotor forgatónyomatéka, n a keverőtengely fordulatszámja és \dot{M}_{sz} a szilárd anyag tömegárama.

Az őrölhetőségi vizsgálatok kivitelezését az alábbi lépésekből építettem fel:

- Az adott minták előkészítése a további vizsgálatokra: aprítás és mintakisebbités
- A minták szemcseeloszlási függvényeinek meghatározása osztályozással
- A minták Bond-munkaindexének meghatározása számítással, a mért eredményekből
- A minták Hardgrove-indexének meghatározása számítással
- Az üzemi és a laboratóriumi Rittiger-tényező meghatározása

A vizsgálatokat, a törvényszerűségek megbízható megállapításához (összevetéséhez), a meddő mellett további három mintaanyagot használtam (5.5. táblázat).

Minta megnevezése	A minta származási helye
mészke	Miskolc-Tapolca, Kőbánya (HOLCIM)
pumicit	Zempléni hegység, HOLCIM
andezit	Nógrádkövesd, Colas Északkő Kft.
ércbányászati meddő	Gyöngyösoroszi, meddőhányó

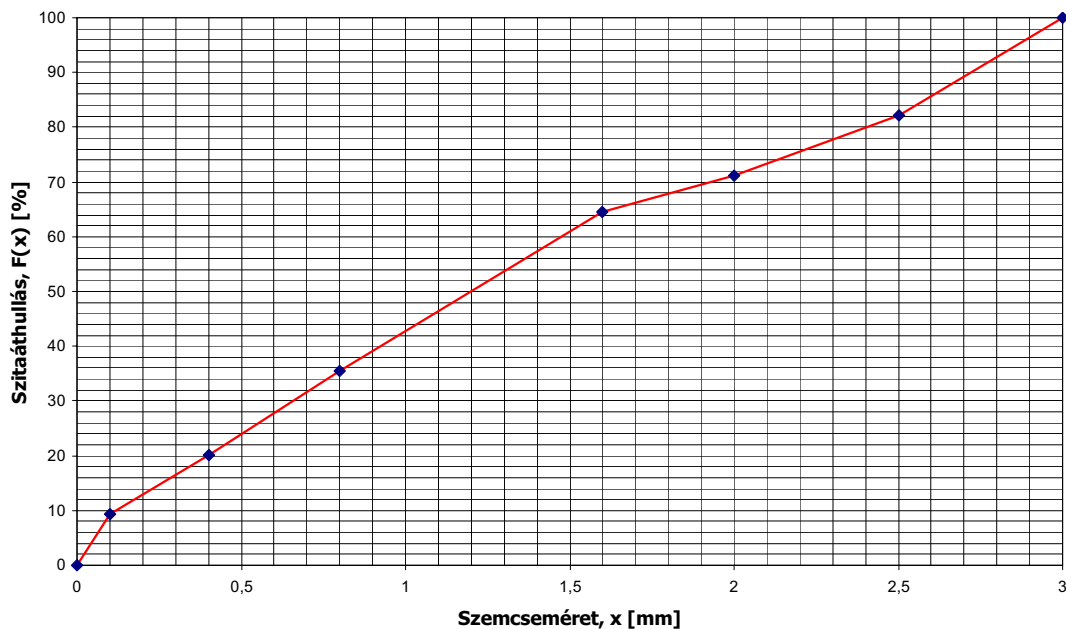
5.5. táblázat Mintaanyagok megnevezése az őrölhetőségi vizsgálatokhoz

a) Az adott minták előkészítése a további vizsgálatokra: aprítás és mintakisebbités:

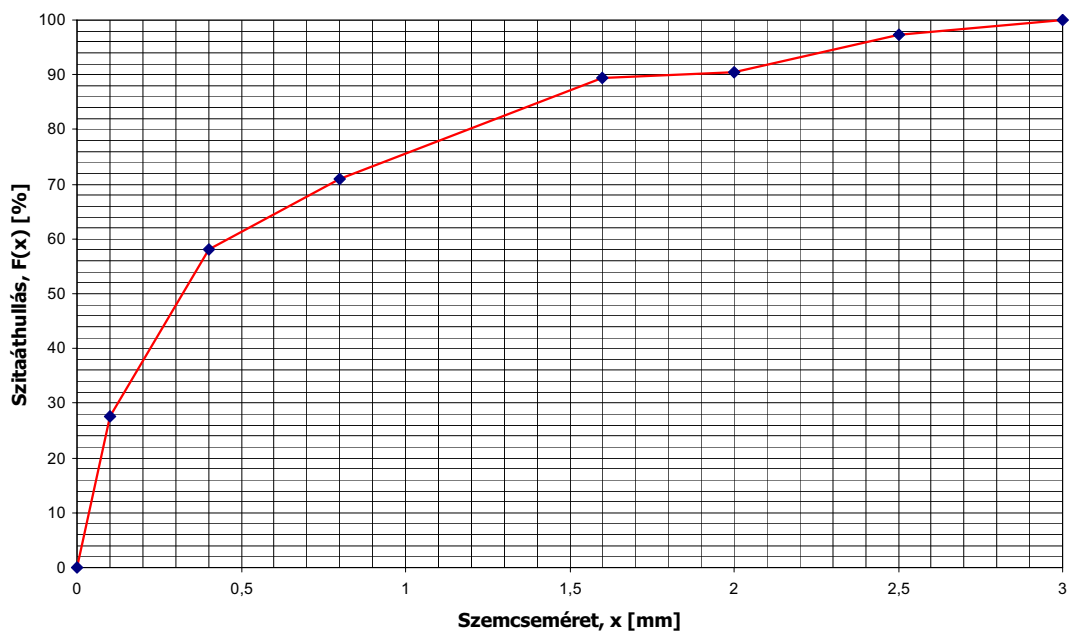
A mintaelőkészítés során az egyes mintákat hengeres törővel csökkenő résméreték ($R= 8; 6; 4; 2,5$ mm) mellett 3 mm alá törtem le. (A mészkő és a pumicit mintákat, tekintettel a nagy szemcseméretre előzetesen pofástörővel < 20 mm-re törtem le). A letört mintákból a laboratóriumi vizsgálatok céljára (valamint ellenőrzésre) szabványos mintacsökkentéssel mintát vettem. Ezekből azonos tömegű részmintákat állítottam elő szemcseméret elemzésre, őrlhetőségi vizsgálatokra és a további őrlési kísérletekhez.

b) A minták szemcse nagyság-eloszlási függvényeinek meghatározása osztályozással:

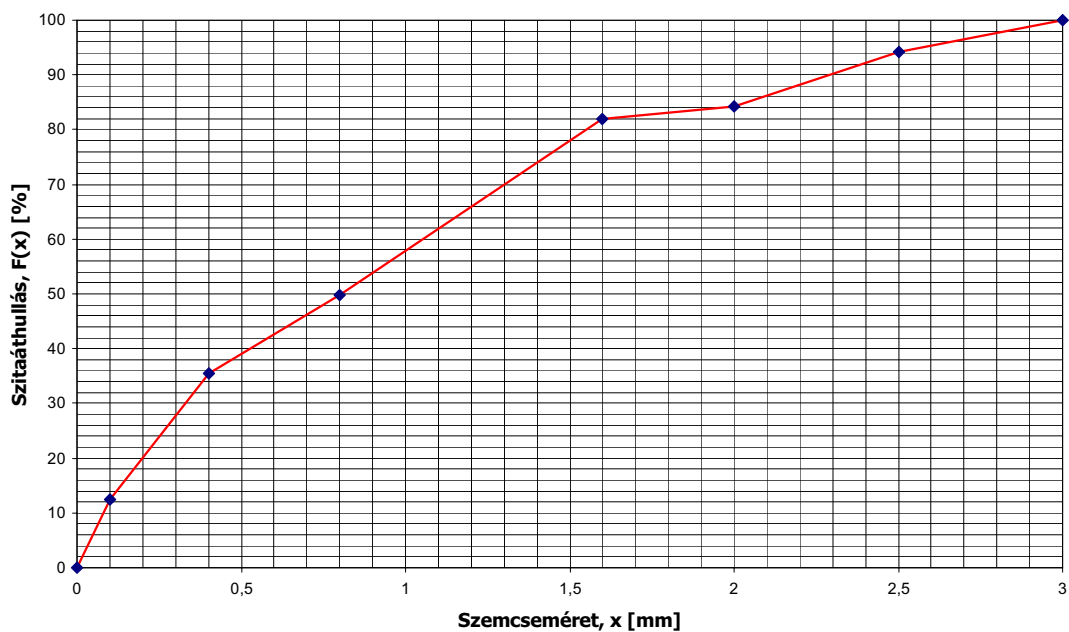
A szemcse nagyságelemzéseket valamennyi mintára vonatkozóan szabványos szitasorozattal 2,5 - 2,0 - 1,6 - 0,8 - 0,4 - 0,1 mm-es nyílásméreteknél, kézi szítással (szárazon) végeztem. Az egyes minták szemcse nagyságeloszlási görbéit az 5.3.-5.6. ábrákon tüntettem fel.



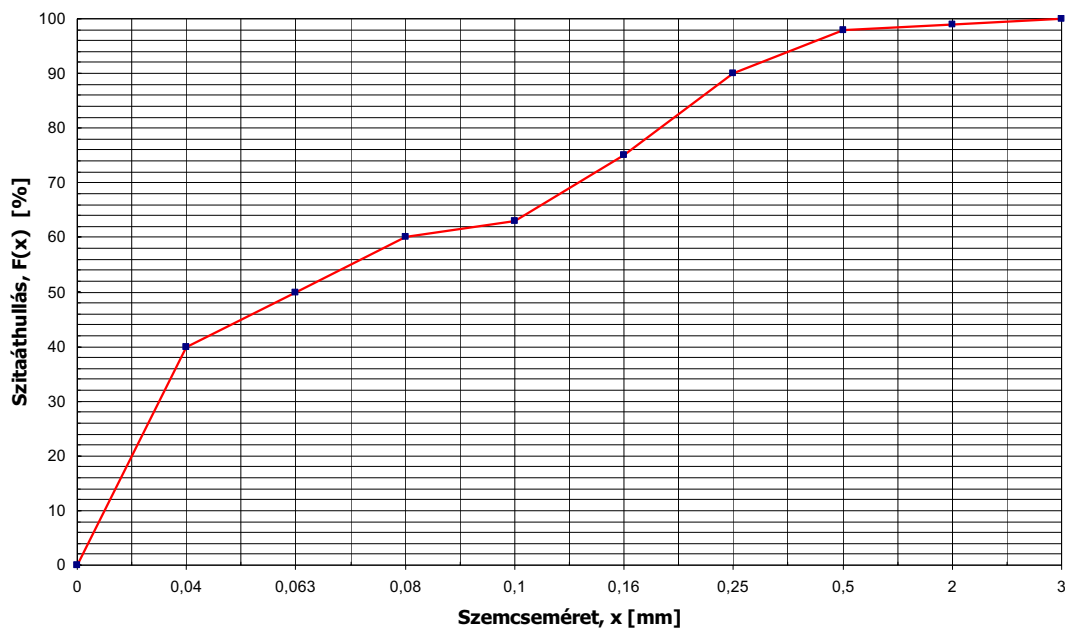
5.3. ábra A feladásra kerülő mészkő minta szemcseméret eloszlása



5.4. ábra A feladásra kerülő pumicit minta szemcseméret eloszlása



5.5. ábra A feladásra kerülő andezit minta szemcseméret eloszlása



5.6. ábra A feladásra kerülő ércbányászati meddő minta szemcseméret eloszlása

5.5.2. A minták Bond-munkaindex

A Bond őrlési vizsgálat speciális malomban (305 x 305 mm, fordulatszám $n = 70/\text{min}$, golyótöltet 20,1 kg - a golyóösszetétel az 5.6. táblázatban található -), előírt körülmények között, háromlépcsős körfolyamatos száraz őrléssel történt és a Bond-munkaindexet a mérés adataiból Karra (részben BOKCSŐ) algoritmussal határoztam meg [76, 78].

A malomba $0,7 \text{ dm}^3$ laza térfogatú anyag töltendő, és minden egyes lépcsőben a kiszitált kész ($< 100 \mu\text{m}$ -es) termék mennyiségét friss anyaggal kell pótolni. Tekintettel a háromlépcsős őrlésre, a harmadik lépcsőtől kezdve G értékét minden egyes mintaanyagra, a Bond-munkaindex meghatározására írt „basic“ számítógépes program segítségével állapítottam meg, a programban az algoritmus az egyensúlyi állapot bekövetkezéséig fut. A Bond őrlhetőségi vizsgálatok adatait az 5.7-5.10. táblázatokban tüntettem fel.

Az egyes Bond-őrlés során kapott őrlemények szemcseméret eloszlását ábrázolva megállapítottam azok 80 %-os szemcseméretét (5.7.-5.9. ábrák).

(Az andezit őrlemény szemcseméret eloszlását lézeres szemcseméret-elemző berendezés segítségével határoztam meg.

Őrlőgolyó	Darab	Tömeg
-----------	-------	-------

átmérője (mm)		(g)
30	65	7309
25,4	10	655
19	71	1967
15	101	1414
		20045

5.6. táblázat Bond-malom őrlőgolyó-méretösszetétele

P Őrlési periódus	f Fordulatok száma 1/min.	A 100 μm alatti anyag tömege (g)	V Veszteség (g)	B $m_t \cdot m_0$ (g)	C A-B (g)	G_i Őrölhetőségi koefficiens (g/min)
1	100	226,1	1,81	105,48	120,62	1,21
2	248	292,4	2,69	21,32	271,08	1,09
3	267,5	321,87	3,6	27,67	294,2	1,1

5.7. táblázat Mészkeő minta mérési adatai

Feladási tömeg $m_t = 1124,5 \text{ g}$ 100 μm alatti szemcsék tömeghányada $m_0 = 0,0938$

P Őrlési periódus	f Fordulatok száma 1/min.	A 100 μm alatti anyag tömege (g)	V Veszteség (g)	B $m_t \cdot m_0$ (g)	C A-B (g)	G_i Őrölhetőségi koefficiens (g/min)
1	100	412,72	14,84	211,89	200,83	2,01
2	53	241,51	3,8	118,01	123,5	2,33
3	66	216,22	4,26	67,71	148,51	2,25

5.8. táblázat Pumicit minta mérési adatai

Feladási tömeg $m_t = 767,72 \text{ g}$ 100 μm alatti szemcsék tömeghányada $m_0 = 0,276$

P Őrlési periódus	F Fordulatok száma 1/min.	A 100 μm alatti anyag tömege (g)	V Veszteség (g)	B $m_t \cdot m_0$ (g)	C A-B (g)	G_i Őrölhetőségi koefficiens (g/min)
1	100	190,16	9,13	137,37	52,79	0,53
2	550	550,27	12,64	24,85	525,42	0,96
3	257	322,11		70,19	251,92	0,98

5.9. táblázat Andezit minta mérési adatai

Feladási tömeg $m_t = 1101,57 \text{ g}$

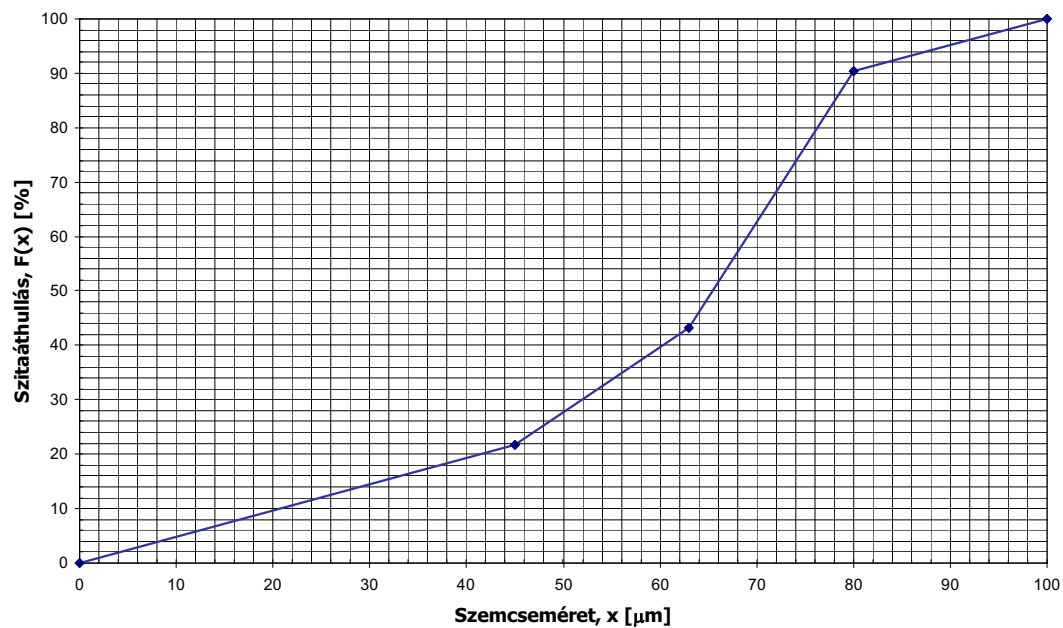
100 μm alatti szemcsék tömeghányada $m_0 = 0,1247$

P Őrlési periódus	F Fordulatok száma 1/min.	A 100 μm alatti anyag tömege (g)	V Veszteség (g)	B $m_t \cdot m_0$ (g)	C A-B (g)	G_i Őrölhetőségi koefficiens (g/min)
1	100	537,93	7,45	273,11	264,82	2,65
2	34	335,89	1,71	167,43	168,46	4,95
3	31	283,65		103,64	180,01	5,80

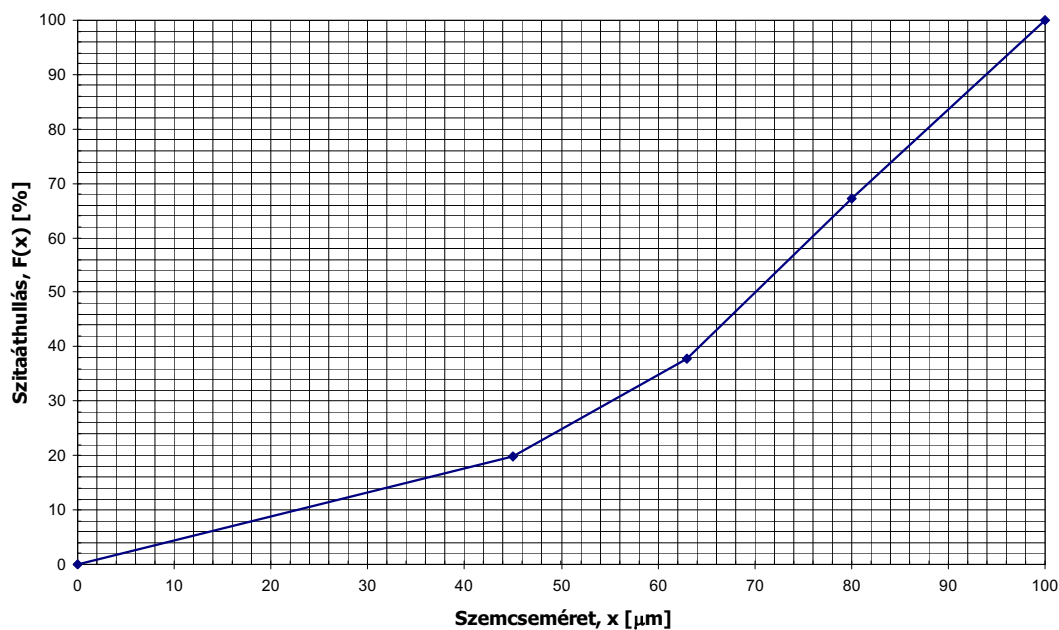
5.10. táblázat Ércbányászati meddő minta mérési adatai

Feladási tömeg $m_t = 889,6 \text{ g}$

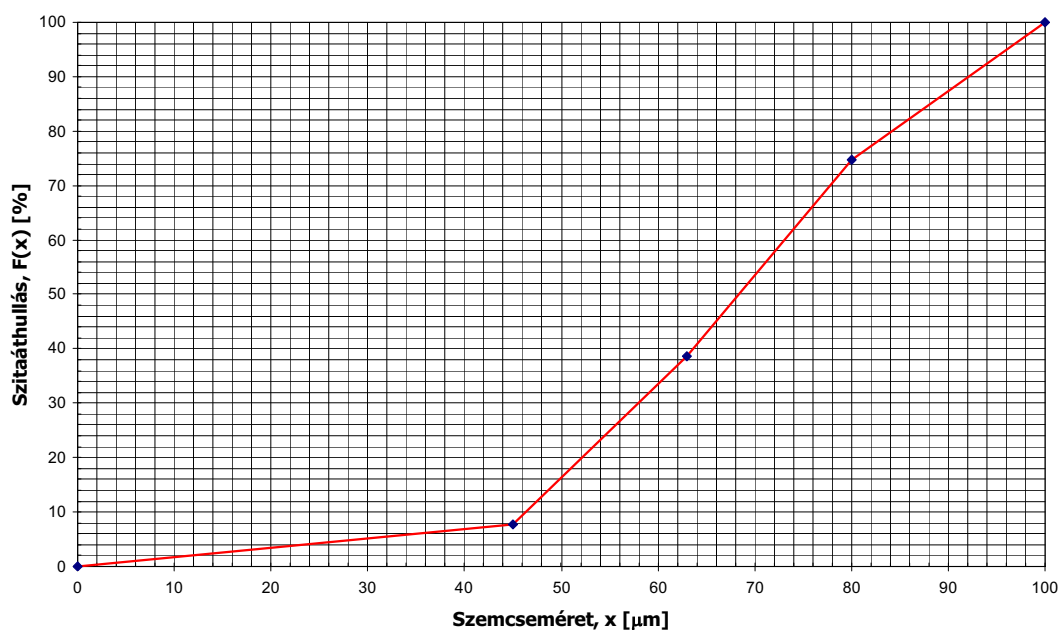
100 μm alatti szemcsék tömeghányada $m_0 = 0,307$



5.7. ábra Mész-kő őrlemény szemcseeloszlási függvénye



5.8.ábra Pumicit őrlemény szemcseeloszlási függvénye



5.9.ábra Gyöngyösoroszi meddő őrlemény szemcseméreteloszlási függvénye

5.5.3. A minták Hardgrove-indexe

A Hardgrove-index meghatározása során 50 g –50 g mintát a 0,63-1,25 mm és a 50-100 μm szemcsefrakciókból 60 malomfordulatig őröltem, majd ezt követően az őrleményt 0,071 mm-es (az előbbi frakciót) szitafrakciókra bontottam.

Az m_H érték szorzótényezőjét "k"-val jelölve, az alábbi képletből k tényező értéke az 50-100 μm -es frakcióra meghatározható.

$${}^0H = 13 + k \cdot m_H, \quad (5.9)$$

ahol m_H a 20 μm -nél kisebb méretű szemcsék tömege.

A mérések során számítással meghatározott paraméterek értékeit (Hardgrove- és becsült Bond-index) értékek az 5.11. táblázatban foglaltam össze.

Minta megnevezése	0H	W_H (kWh/t)	W_i^k (kWh/t)
mészke	73,74	12,79	14,45
pumicit	114,21	8,94	8,69
andezit	66,12	13,99	17,67
Gy.oroszi meddő	227,14	5,08	4,03

5.11. táblázat A Hardgrove eljárás eredményeit összefoglaló táblázat

A táblázatban használt jelölések:

- 0H - a számítással meghatározott Hardgrove-index (0.63-1.25 mm frakcióra)
- W_H - a Hardgrove-indexből becsült Bond-index
- W_i^k - a Karra algoritmussal meghatározott Bond-munkaindex

A mérés és számítással meghatározott őrlhetőségi jelzőszámok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az ércbányászati meddőanyagot illetően, egy relatív könnyen őrlhető anyaggal állunk szemben. Erre utal a Bond-féle „munkaindex” alacsony értéke és a kiugróan magas Hardgrove-szám. Ez utóbbi jelzőszám értéke a tiszta kvarcra vonatkozóan általában 45-55 között van, mivel a kvarc a nehezen őrlhető és aggregációra nem hajlamos anyagok csoportjába tartozik. Ennek okát abban vélem felfedezni, hogy a meddőanyag összetételét nagymértékben meghatározzák a benne előforduló és a kvarccal összenövéseket képező ásványok, illetve nehézfémek.

5.6. ŐRLHETŐSÉG KEVERŐMALOMBAN

A keverőmalomba a Bond és a Hardgrove malom feladásánál finomabb anyagokat adunk fel őrlni, és a golyósmalmokban a keverőmalmoknál lényegesen durvább őrleményeket állítunk elő. Szükséges tehát megvizsgálnunk, hogy a Bond és a Hardgrove eljárás egyáltalán alkalmas-e a keverőmalomban történő őrlés őrlhetőségének jellemzésére.

Ennek érdekében és a módszer helyességének igazolására a meddőmintával párhuzamosan további három másik anyag őrlhetőségi vizsgálatát is elvégeztem, az alábbiak szerint:

$$n = 1440 \text{ 1/min}$$

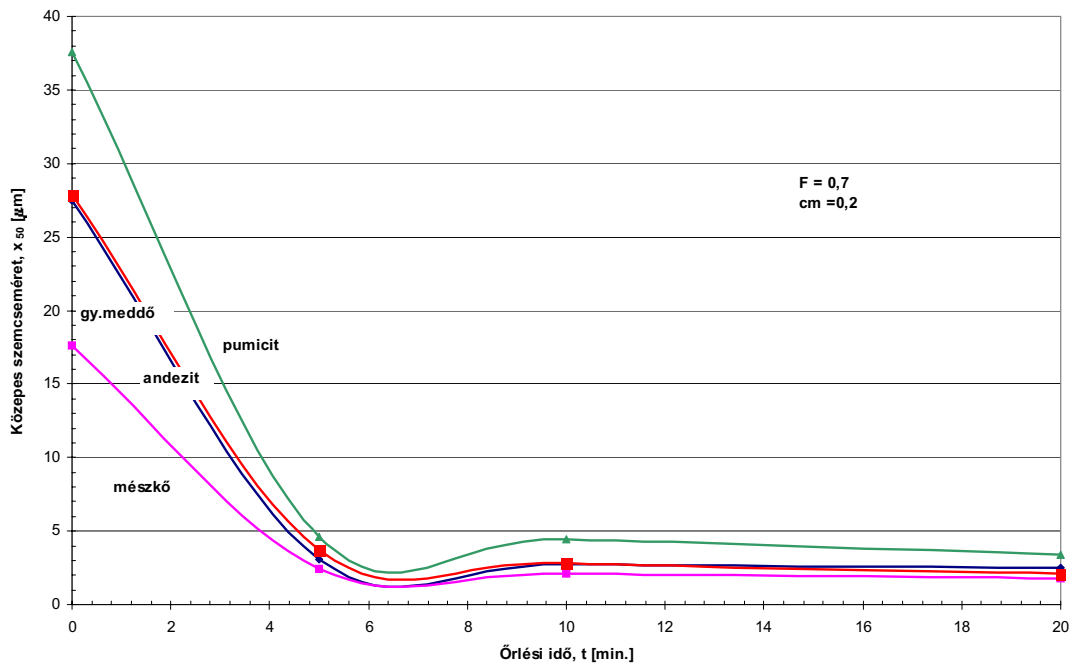
$$\varphi_m = 0,7$$

$$c_m = 0,2$$

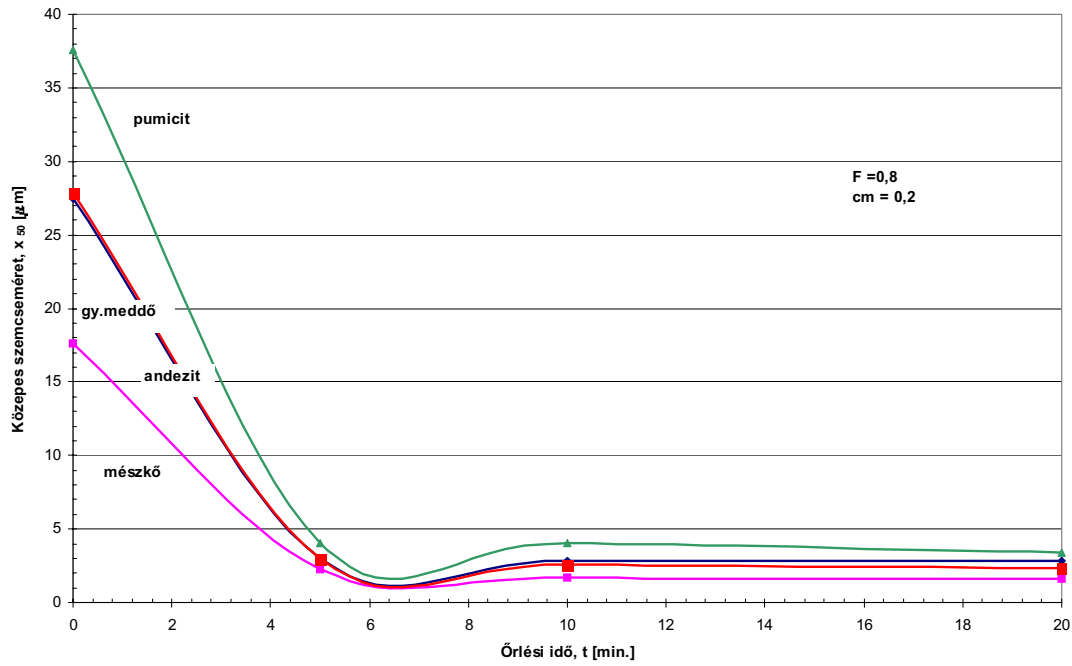
A kiértékeléshez MathCad programot készítettem, amellyel az 5.12.-5.15. táblázatokban lévő eredményeket határoztam meg.

A keverő-golyósmalomban történő *nyomatékmérést* az őrlési paraméterek változtatása mellett a fentiekben ismertetett négy mintaanyagokra végeztem: mészkő, pumicit, andezit és gyöngyösoroszi meddő. A nyomatékmérés után, a malomból kikerülő őrlemények közepes szemcseméretét a Berliini Műszaki Egyetem Nyersanyagelőkészítési Tanszékén található lézeres szemcseelemző (SYMPATEC HELOS H0541) segítségével határoztam meg.

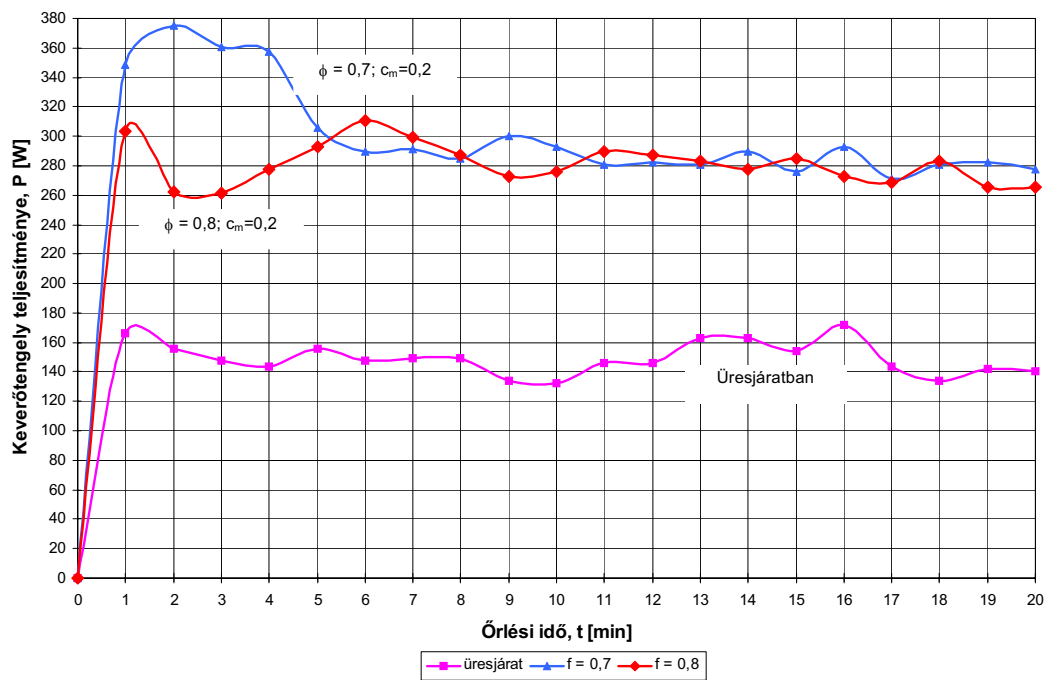
A nyomatékmérés nyomatékmérőcella segítségével történt, ami egy digitális kijelző készülékkel állt kapcsolatban az egyes „skálaosztások” leolvasásának céljából. A skálaosztás a nyomatékvértékre engedett következtetni. A nyomatékmérés során kapott teljesítményértékeket az 5.10.-5.15. ábrák mutatják az ércbányászati meddőanyagra vonatkozóan, különböző őrlési paraméterek mellett.



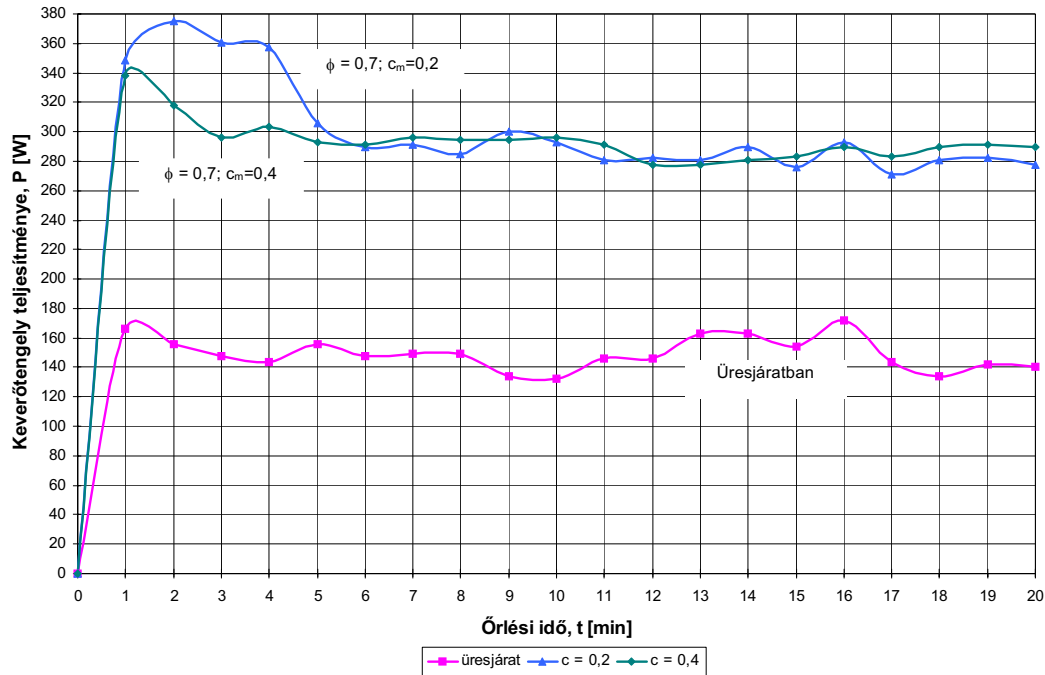
5.10. ábra Közepes szemcseméret változása az őrlési idő függvényében ($\varphi = 0,7$, $c_m = 0,2$)



5.11. ábra Közepes szemcseméret változása az órlési idő függvényében ($\varphi = 0,8, c_m = 0,2$)



5.12. ábra A keverőtengely teljesítménye az órlési idő függvényében, különböző töltési foknál



5.13. ábra A keverőtengely teljesítménye az örlési idő függvényében, különböző szilárd anyag tömegkoncentrációnál

t (min.)	W_f (kJ/kg)	W_f (kWh/t)	X_{50} (μm)	P_m (Nm/s)	$\dot{M} \cdot 10^{-4}$ (t/h)
0	0	0	17.62	0	0
5	1605.6	446	2.43	210	4.699
10	2887.2	802	2.07	188	2.35
20	5454	1515	1.76	178	1,175

5.12. táblázat A közepes szemcseméret és az összes befektetett munka értéke mészkő minta esetén

t (min.)	W_f (kJ/kg)	W_f (kWh/t)	X_{50} (μm)	P_m (Nm/s)	$\dot{M} \cdot 10^{-4}$ (t/h)
0	0	0	37.55	0	0
5	1522.8	423	4.59	196	4.63
10	3045.6	846	4.46	196	2.316
20	6328.8	1758	3.4	203.58	1.158

5.13. táblázat A közepes szemcseméret és az összes befektetett munka értéke pumicit minta esetén

t (min.)	W_f (kJ/kg)	W_f (kWh/t)	X_{50} (μm)	P (Nm/s)	$\dot{M} \cdot 10^{-4}$ (t/h)
0	0	0	27.87	0	0
5	1393.2	387	3.71	182	4.711
10	304.2	845	2.84	199	2.356
20	6267.6	1741	2.14	205	1.178

5.14. táblázat A közepes szemcseméret és az összes befektetett munka értéke andezit minta esetén

t (min.)	W_f (kJ/kg)	W_f (kWh/t)	X_{50} (μm)	$P_{m,0}$ (Nm/s)	$\dot{M} \cdot 10^{-4}$ (t/h)
----------	---------------	---------------	----------------------------	------------------	-------------------------------

0	0	0	42.00	0	0
5	2343.6	651	3.11	306.1	4.70
7	3128.4	869	3.05	291.0	3.35
10	4500	1250	2.76	292.6	2.34
12	5205.6	1446	2.75	282.0	1.95
15	6368.4	1769	2.58	276.0	1.56
17	7081.2	1967	2.48	271.4	1.38
20	8539.2	2372	2.47	277.5	1.17

5.15. táblázat A közepes szemcseméret és az összes befektetett munka értéke meddő minta esetén

A táblázatokban használt jelölések:

- W_f - az összes befektetett munka,
 X_{50} - közepes szemcseméret,
 P_m - a malomteljesítmény,
 $P_{m,0}$ - a malomteljesítmény üresjáratban,
 \dot{M} - a szilárd anyag tömegárama.

Vizsgáljuk meg, hogy a keverőmalmi munka ismeretében a számolt Bond-munkaindex, a korábbi mért értékeknek megfelel-e, azaz határozzuk meg a W_i^P mennyiségeket, az alábbi összefüggésekkel:

$$W_f \approx W_B^P \quad (5.10)$$

$$W_i^P = \frac{W_B^P}{\left(\frac{10}{\sqrt{x_{1,80}}} - \frac{10}{\sqrt{x_{0,80}}} \right)} \quad (5.11)$$

A mérési adatokból kapott W_i^P értékeket az 5.16 táblázat tartalmazza.

Minta megnevezése	$x_{0,80}$ (μm)	$x_{1,80}$ (μm)	W_B^P (kWh/t)	W_i^P (kWh/t)
mészkeő	80	5,28	1515	4734,4
pumicit	60	10,20	1758	9656,6
andezit	70	6,42	1741	6448,1
Gy.oroszi meddő	170	7,50	2372	8095,6

5.16. táblázat A keverőmalomban történő mérés eredményeit összefoglaló táblázat ($t = 20$ min)

$x_{0,80}$	- a keverőmalom feladásának 80 %-os szemcsemérete,
$x_{1,80}$	- a keverőmalom őrleményének 80 %-os szemcsemérete,
W_B^P	- a malomteltjesítményből meghatározott fajlagos energia ($= W_f$)
W_i^P	- a fajlagos energiából számított „üzemi” Bond őrlhetőségi tényező

Az 5.17. táblázatban a korábbi mérés W_i^K Bond-munkaindex adatait, valamint az előző táblázat W_i^P értékeit együtt tüntettük fel.

Minta megnevezése	W_i^P (kWh/t)	W_H (kWh/t)	W_i^K (kWh/t)
mészkeő	4734,4	12,79	14,45
pumicit	9656,6	8,94	8,69
andezit	6448,1	13,99	17,67
Gy.oroszi meddő	8095,6	5,08	4,03

5.17. táblázat Az „üzemi” Bond őrlhetőségi tényező összevetése a mért Bond és Hardgrove őrlési indexekkel

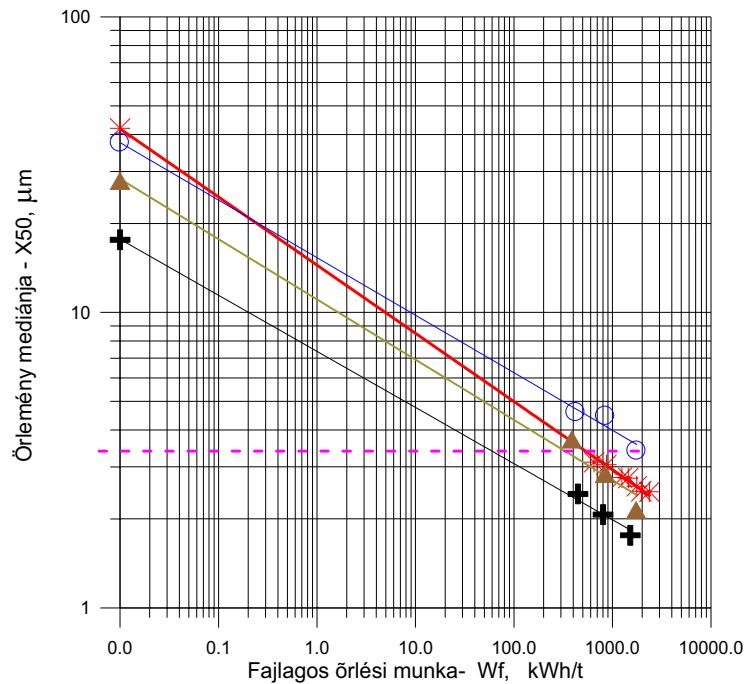
Az 5.17. táblázatból megállapítható, hogy a keverőmalom teljesítményéből számított „üzemi” Bond-index és a standard eljárással mért Bond index nagyságrendekkel eltér egymástól. Tehát a keverőmalmi őrlésre saját őrlhetőségi mérést kell lefolytani, az őrlési finomság és fajlagos őrlési munka összefüggését meghatározva kell a megfelelő tényezőt megállapítani.

Az előbb jelzett célok érdekében készült az 5.14. ábra, amelyen az őrlemények mediánját és a fajlagos őrlési munkát tüntettem fel, mészkeőre, pumicitre, andezitre és gyöngyösoroszi meddőre.

Az 5.10. ábra szerinti alappontokra hatványfüggvény illeszthető:

$$x_{50} = \frac{C_{kev}}{W_f^m}, \quad (5.12)$$

amelynek paramétereit az 5.18. táblázat tartalmazza.



5.14. ábra Örlési finomság a fajlagos örlési munka függvényében különböző mintaanyagokra

Mintaanyag megnevezése	C_{kev} -paraméter	m -paraméter	szórás/korrelációs index, σ/R
Pumicit	15,32	0,198	0,0470/0,997
Andezit	11,07	0,204	0,01505/0,992
Mész kő	7,38	0,190	0,00205/0,999
Gyöngyösoroszi meddő	14,45	0,230	0,0052/0,9995

5.18. táblázat A paraméterbecslési korrelációs eljárás paramétereit különböző mintaanyagokra

Megállapítható:

- Valamennyi anyag esetében az m paraméter (meredekség) 0,2 körüli érték.
- Következésképpen, sem a Bond, sem a Rittinger képletek nem alkalmasak keverőmalmi őrlés őrlhetőségének jellemzésére.
- Javasolom az 5.14 függvény C_{kev} paraméterének alkalmazását az őrlhetőség jellemzésére keverőmalomban, amelyet a jelen mérésnek megfelelő ($n = 1440$ 1/min, $\varphi_m = 0,7$ és $c_m = 0,2$) körülmények között veszünk fel.

A C_{kev} paraméterek alapján a keverőmalomban vizsgált anyagok őrlhetőségének sorrendje (a könnyebben őrlhetőtől a nehezebben őrlhető felé haladva): mész kő, andezit, meddő, pumicit. Ezzel szemben a mért Bond-index alapján a sorrend: meddő, pumicit, mész kő, andezit.

6. A GYÖNGYÖSOROSZI MEDDŐMINTA FIZIKAI FELTÁRTHATÓSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

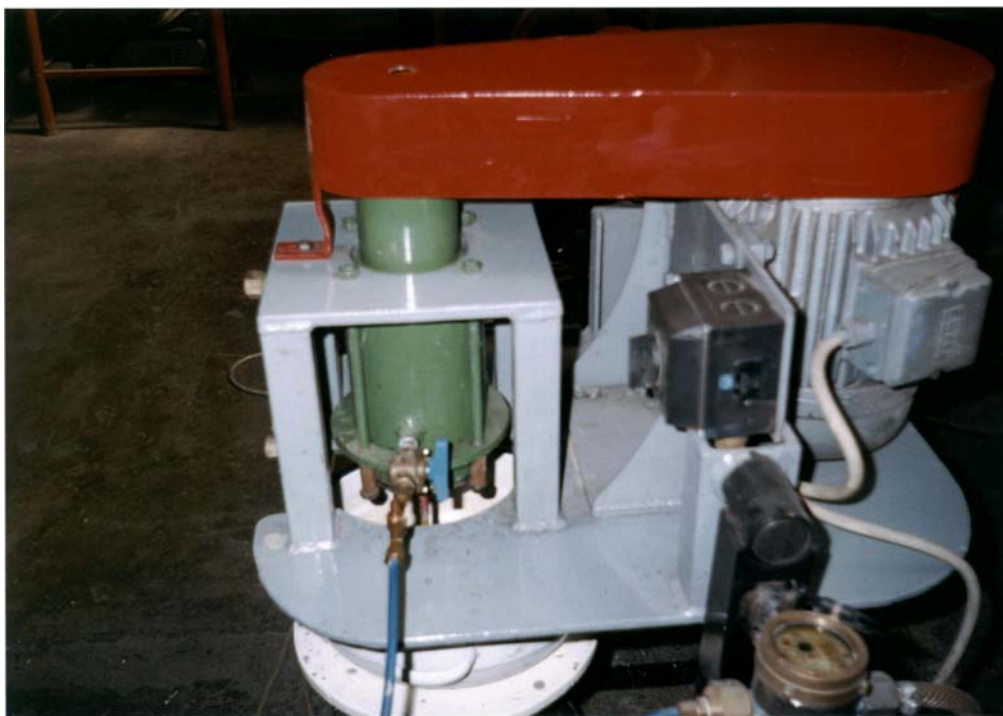
6.1. ŐRLÉSI VIZSGÁLATOKRA ALKALMAZOTT KEVERŐ-GOLYÓSMALOM

A fizikai feltárási vizsgálatokhoz kapcsolódó őrlési kísérleteket, mint jeleztük keverő- és rezgőmalomban célszerű lefolytatni. Ennek érdekében, mivel keverőmalom nem állt rendelkezésre, egy kísérleti berendezést terveztem meg. A terveim alapján elkészült laboratóriumi keverő-golyósmalmot a Miskolci Egyetem Eljárástechnikai Tanszék műhelyében gyártották le. Az őrlőberendezést kizárólag nedves őrlésre és meghatározott feladási szemcseméretre (<100-150 μm) terveztem.

A tervezési folyamatot megelőzően szakirodalmi kutatást végeztem, elsősorban a Berliini Műszaki Egyetem Központi Könyvtárában. A keverő-golyósmalom tervezését illetően, nagyon fontosak a geometriai méretek, különösen a malomhossz-és a malomátmérő arányát (L_m/D_m). A helytelen L_m/D_m arány számos kedvezőtlen folyamat kialakulására vezethet az őrlőtérben. A káros hatások közül talán a legfontosabb a túlságosan hosszú malom-kialakítás miatt fellépő agglomeráció.

A tervezett és legyártott *keverő-golyósmalom* vertikális elrendezésű, belső űrtartalma 0,7 l, átmérője 90 mm, hasznos hossza 140 mm. Az őrlés következtében fellépő nagy felmelegedés miatt a malmot hűteni kell (ennek érdekében a malom duplafallal rendelkezik).

A kísérleti keverő-golyósmalom mangánacélból készült, keverőtengelyére 70 mm átmérőjű, amelyre 6 mm vastagságú tömött keverőtárcsákat szereltünk fel.. Az őrlőgolyók anyaga ötvözetlen acél, közepes Vickers keménységgel (HV 420). Az őrlőgolyók között ébredő súrlódási erő a golyók forgását eredményezi.



6.1. ábra Laboratóriumi keverő-golyósmalom

Az őrlőtárcsával közvetlenül érintkező őrlőtestek sebessége nagyobb, mint a távolabb lévő őrlőtesteké. Az őrlőgolyók közötti sebesség-különbség nyíró- és súrlódóerőt eredményez. A forgó őrlőtestek - a szemcse és a golyók közötti súrlódási erő - a szemcséket a golyók közé szállítják. Az őrlőtestek közötti aprítás tehát, elsősorban a súrlódásból eredő - a szemcse és az őrlőtest érintkezési felületén fellépő - nyírófeszültség (és az csak kisebb részben a nyomásból és az ütésből származó húzófeszültség) által jön létre.

6.2. ÖSSZEHASONLÍTÓ ŐRLÉSI VIZSGÁLATOKRA ALKALMAZOTT REZGŐMALOM

Az összehasonlító őrlési vizsgálatokat a már korábban megismertetett keverő-golyósmalomban, illetve a Berliini Műszaki Egyetem Nyersanyagelőkészítési Tanszékén található laboratóriumi golyós rezgőmalomban végeztem el, egy többhónapos kutatómunka keretében. A golyós *rezgőmalom* (a továbbiakban „rezgőmalom”) két őrlőtartállyal rendelkezik, amelyeknek űrtartalma egyenként 0,97 l. A rezgés ki nem egyenlített forgó tömeg által jön létre, amelynek során az őrlőtestek az őrlendő anyagot ütés és dörzsölés által finomra őrlik.

Az őrlési vizsgálatokhoz alkalmazott őrlőberendezésekről készült fényképfelvételek a *6.1. és 6.2. ábrákon* láthatók.



6.2. ábra Laboratóriumi golyós rezgőmalom

6.3. A KÍSÉRLETEK MINTAANYAGA

Kísérleti anyagként mindkét őrlőberendezésben a gyöngyösoroszi meddőhányóból származó meddőanyagot használtam. A kísérleti anyag kémiai és ásványi elemzési adataiból kitűnt, hogy az anyag érces ásványként elsősorban piritet, szfaleritet és galenitet tartalmaz. A kísérleti anyag sűrűsége 2580 kg/m^3 (piknométeres sűrűségmérés alapján), feladási szemcsemérete $100\text{-}150 \mu\text{m}$.

A keverő-golyósmalomban (a továbbiakban keverőmalom) előzetesen végzett nedves őrlési vizsgálatokat (a továbbiakban „előzetes őrlési vizsgálatok”) különböző üzemi és őrlési paraméterek (fordulatszám, töltési fok, szilárd anyag tömegkoncentráció és őrlési idő) változtatása mellett folytattam le (6.1. táblázat). A vizsgálatok során a hordozó közeg víz és az őrlőtestek sűrűsége az acél sűrűségével (7800 kg/m^3) azonos, mivel polírozatlan felületű acélból készültek.

A malmokban végzett összehasonlító őrlési vizsgálatok során már valamennyi üzemi és őrlési paraméter értéke (fordulatszám, töltési fok, szilárd anyag tömegkoncentrációja) állandó volt, csak az őrlési idő változott 5 és 20 perc között. Az őrlőberendezések geometriai és üzemi paramétereinek jellemző értékét a 6.2. táblázat ismerteti.

MEGNEVEZÉS	KEVERŐMALOM
Malom töltési foka (φ_m)	0,7; 0,8
Őrlőtestek töltési foka (φ_g)	0,455

Szilárdanyag tömegkoncentrációja (c_m)	0,2; 0,4
Keverőtengely fordulatszáma (n)	1440, 2880 1/min.
Őrlési idő (t)	5, 10, 20 min.

6.1. táblázat Őrlési paraméterek az előzetes őrlési vizsgálatok során

Az összehasonlító őrlési vizsgálatokhoz, figyelembe véve az előzetes vizsgálatokat, az őrlési paraméterek értékét mindkét őrlőberendezésben azonosnak vettem fel. Az őrlési vizsgálatokhoz szükséges mennyiségi jellemzőket a 6.2.-6.5. táblázatokban ismertetett kiindulási adatok és a 6.1-6.6 összefüggések segítségével határoztam meg. Az őrlési vizsgálatok feltételeit megteremtő, számítás útján meghatározott mennyiségi jellemzőket a keverő- és rezgőmalomra vonatkozóan a 6.5. táblázat foglalja össze.

MEGNEVEZÉS	KEVERŐMALOM	REZGŐMALOM
Malom hasznos hossza L	140 mm	130 mm
Malom belső átmérője (őrlőtér átmérő) D_m	90 mm	80 mm
Malomhossz-malomátmérő arány (L_m/D_m)	1,56	1,63
Malomtérfogat (V_m)	$0,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$0,9696 \cdot 10^{-3}$
Keverőtárcsák száma z	5	-
Keverőtárcsák átmérője d_k	70 mm	-
Malomátmérő és keverőtárcsaátmérő egymáshoz viszonyított aránya (D_m/d_k)	1,28	-
Keverőtárcsák szélessége w_k	6 mm	-
Keverőtárcsák távolsága s_k	25-30 mm	-
Hajtómotor teljesítménye (P)	3 kW	1 kW
Keverőtengely fordulatszáma (n)	1440 1/min.	1500 1/min.
Keverőtengely kerületi sebessége (v_k)	5,25 m/s	-
Hengeres hűtőköpeny átmérője d_h	126 mm	-
Hűtővíz hőmérséklete (T_{viz})	288 K	Nincs hűtés
Őrlőtestek átmérője (d_g)	3,175 mm	3,250 mm

6.2. táblázat A kísérleti berendezések geometriai és üzemi paraméterei az őrlési vizsgálatok során

MEGNEVEZÉS	KEVERŐMALOM
Malom töltési foka (φ_m)	0,7
Őrlőtestek töltési foka (φ_g)	0,455

Szilárdanyag tömegkoncentrációja (c_m)	0,2
Keverőtengely fordulatszáma (n)	1440 1/min.
Őrlési idő (t)	5-20 min.

6.3. táblázat Őrlési paraméterek az összehasonlító őrlési vizsgálatok során

MEGNEVEZÉS	MÉRTÉK
Malom töltési foka (φ_m)	0,7
Őrlőtestek sűrűsége (ρ_g)	7800 kg/m ³
Őrlőtestek porozitása (ε)	0,35
Szilárdanyag sűrűsége (ρ_{sz})	2580 kg/m ³
Szilárdanyag tömegkoncentrációja (c_m)	0,2

6.4. táblázat Kiindulási adatok a mennyiségi jellemzők számításához

A szükséges golyótérfogat, a golyóhalmaz pórustérfogata:

A „tömör” golyótérfogat:

$$V_g = \varphi_m \cdot V_m \cdot (1 - \varepsilon) \quad (6.1)$$

Az őrlőgolyók szükséges tömege a malomban:

$$m_g = \rho_g \cdot V_g \quad (6.2)$$

A szuszpenzió által elfoglalt minimális golyóhalmaz pórustérfogata:

$$V = V_p = \varphi_m \cdot V_m \cdot \varepsilon \quad (6.3)$$

b, A szilárd anyag szükséges mennyiségének meghatározása:

A szilárd anyag térfogata:

$$V_{sz} = c_v \cdot V_p \quad (6.4)$$

A szilárd anyag tömege:

$$m_{sz} = \rho_{sz} \cdot V_{sz} \quad (6.5)$$

c, A közeg szükséges térfogatának meghatározása:

$$V_f = V_p - V_{sz} \quad (6.6)$$

Az összefüggés alapján kapott ideális töltési idő mindkét őrlőberendezésben azonos, de a kísérletek során a feladásnál ennél kisebb (kb. feleannyi) időt vett igénybe a malmok feltöltése az őrlési vizsgálatokhoz.

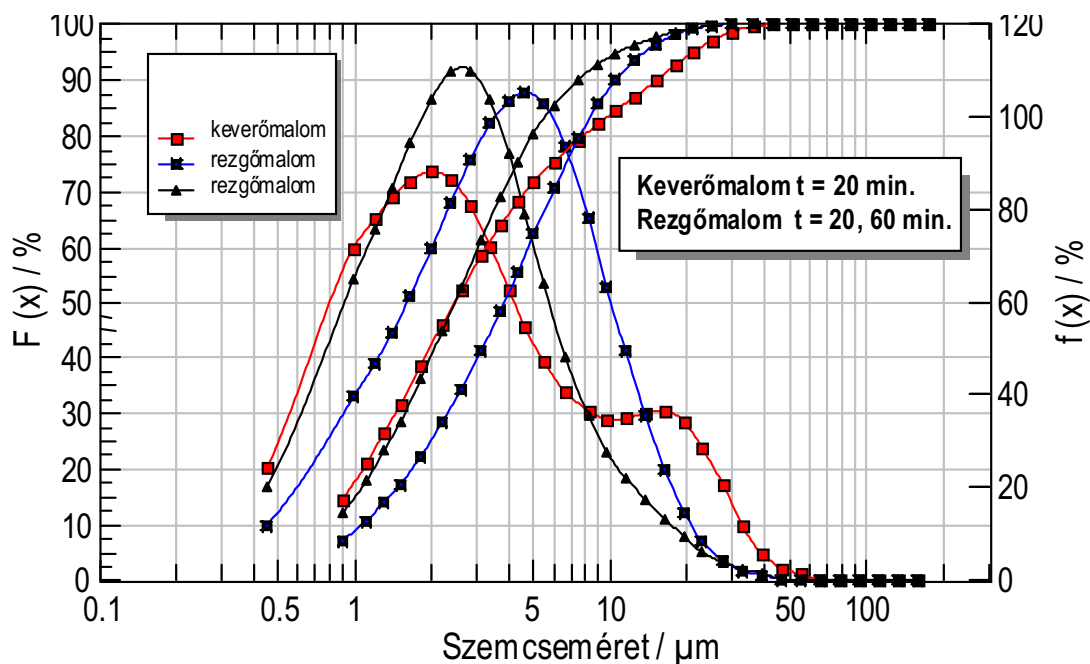
MEGNEVEZÉS	KEVERŐMALOM	REZGŐMALOM
Szükséges golyótérfogat (V_g)	$0,3185 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$0,4412 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
Szükséges golyótömeg (m_g)	2,4843 kg	3,4411 kg
Pórustérfogat, szuszpenzió térfogat (V_{szuszp})	$0,1715 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$0,2380 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
Szuszpenzió térfogatárama (\dot{V})	$0,52 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	$0,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$
Szilárd anyag tömegkoncentrációja (c_m)	0,2	0,2
Szilárd anyag térfogat-koncentrációja (c_v)	0,0883	0,0883
Szilárd anyag térfogata (V_{sz})	$0,01514 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$0,0210 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
Szilárd anyag térfogatárama (\dot{V}_{sz})	$0,046 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	$0,064 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$
Szilárd anyag tömege (m_{sz})	0,0391 kg	0,0542 kg
Közeg szükséges térfogata (V_t)	$0,1564 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$0,2170 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

6.5. táblázat Jellemzők az összehasonlító őrlési vizsgálatok során

6.4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

6.4.1. Őrlemények szemcseeloszlása, fajlagos felülete

A 6.3. ábra a keverő- és rezgőmalomból kikerült őrlemények szemcse- és sűrűségeloszlásainak alakulását szemlélteti különböző őrlési időknél. A piros görbe a keverőmalomból kikerült őrlemények szemcse- és sűrűségeloszlásainak alakulását mutatja 20 perces őrlési idő mellett. A kék görbe a rezgőmalomból kikerült őrlemények szemcse- és sűrűségeloszlásainak alakulását mutatja 20 perces, a fekete görbe pedig 60 perces őrlési idő mellett. Az ábrából leolvasható, hogy a rezgőmalom esetében csak kb. 60 perces őrlési idő körül kapunk olyan nagyságú mediánértéket (x_{50}), mint a keverőmalomban 20 perc mellett. Vagyis itt érintkeznek egymással a piros és fekete színnel jelzett szemcseeloszlási görbék. Ez azt jelenti, hogy az azonos termékfinomság eléréséhez szükséges őrlési idő a keverőmalom esetén mindig rövidebb, mint a rezgőmalomnál.



6.3. ábra Az őrlémények szemcseméret- és sűrűségeloszlásainak alakulása 20 és 60 perces őrlési idő mellett

A fajlagos felület méréséhez szükséges kiindulási adatokat és a kapott mérési eredményeket a 6.6-6.8. táblázatokban foglaltam össze.

Megnevezés	Jelölés	Érték	Mértékegység
A szilárd anyag (minta) sűrűsége	ρ_{sz}	2580	kg/m ³
A mérőfolyadék sűrűsége	ρ_f	1045	kg/m ³
A mérőcella keresztmetszete	A	$5,067 \cdot 10^{-4}$	m ²
Az U-cső belső keresztmetszete	A_0	$4,525 \cdot 10^{-4}$	m ²
A levegő dinamikai viszkozitása	η	$1,835 \cdot 10^{-5}$	Pas
A dugattyú hossza anyag nélkül	L_1	0,1016	m
Az egyensúlyi helyzetben levő mérőfolyadék szintje	h_0	$11,2 \cdot 10^{-2}$	m
Az A-szint magassága	h_A	$7,2 \cdot 10^{-2}$	m
Kozeny-állandó	k	5	-

6.6. táblázat Kiindulási adatok a fajlagos felület mérésekor

Megnevezés	Jelölés	Mért érték	Mértékegység
A dugattyú hossza anyaggal együtt	L_2	0,1312	m
A porágy vastagsága	L	0,0296	m
A minta tömege	m	$25 \cdot 10^{-3}$	kg
Porozitás	ε	0,354	-
A mérés időtartama	t	318	s
Fajlagos felület	S_{m0}	311,86	m^2/kg

6.7. táblázat: Mérési adatok a feladott anyagra vonatkozóan

Megnevezés	Jelölés	Mért érték	Mértékegység
A dugattyú hossza anyaggal együtt	L_2	0,1356	m
A porágy vastagsága	L	0,034	m
A minta tömege	m	$25 \cdot 10^{-3}$	kg
Porozitás	ε	0,623	-
A mérés időtartama	t	4020	s
Fajlagos felület	S_{m1}	4123,25	m^2/kg

6.8. táblázat: Mérési adatok az őrleményre vonatkozóan

A mérési adatok alapján a feladás és az őrlemény fajlagos felülete:

$$S_{m0} = 311,86 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$S_{m1} = 4123,25 \text{ m}^2/\text{kg}$$

A feladott anyag és az őrlemény fajlagos felületének különbsége pedig:

$$\Delta S_m = S_{m1} - S_{m0} = 4123,25 \frac{m^2}{kg} - 311,86 \frac{m^2}{kg} = 3811,39 \frac{m^2}{kg} \quad (6.7)$$

6.4.2. Feltártság

Az eljárás technikai vizsgálatokban a mikroszkóp elsősorban a feltártsági-összenövési minőségi és mennyiségi viszonyok (összenövés jellege, összenövési fok, feltártsági fok) meghatározására szolgál, amely alapján a kívánatos őrlési finomság, majd az őrlést követő fizikai feltártság jellemezhető. (A SEM mikroszkóp különösen a fázisok meghatározását és a genetikai jelleg megállapítását segítette). Tehát a fizikai feltárthatóságot mikroszkópi felvételek segítségével ellenőriztem elsősorban fénymikroszkóp alkalmazása mellett.

A *fénymikroszkópos felvételek* LEITZ-Metalloplan polarizációs mikroszkóppal készültek a Miskolci Egyetem Ásvány- és Kőzettani Tanszékén és a Berlini Műszaki Egyetem

Elektronmikroszkópi Központjában. Az előbbi esetben a mikroszkópra egy fekete-fehér videokamera van csatlakoztatva. A kiértékelés UTHSCSA Image Tools képelemző program segítségével történt. A vizsgálatok áteső fényben történtek, ami optimális a kisebb szemcseméret tartományba eső ásványszemek mikroszkópi vizsgálatához. 10 μm alatti átlagszemcseméretnél a meddőásványok gyakorlatilag áttetszőek, s így áteső fényenél jól elkülöníthetőek az ércásványoktól, melyek közül a galenit és pirit teljesen átlátszatlan - fekete - marad, míg a szfalerit sötétbarna színt mutat. A rendkívül alacsony szemcseméret-tartomány miatt egyes mintákat speciális diszpergálószerezrel kellett a mikroszkópi tárgylemezekre felvinni. Erre a célra legalkalmasabbnak a Nátrium-metaszilikát bizonyult, ami nemcsak a finomszemcsék koagulálását gátolja, de alacsony törésmutatóval is rendelkezik, így tovább javítja az elemzési képeken látható szemcsék elkülönülésének megállapíthatóságát [9].

Mikroszkópi vizsgálatok:

A feladási anyag *fénymikroszkóppal történő vizsgálatok* alapján megállapítható, hogy a diszpergálószerez ellenére a tárgylemezen két párhuzamos szemcseréteg alakult ki. Az alsó réteg finomabb -kb. 20 μm alatti- szemcsékből áll, melyek egy tömörebb síkban elrendeződve megátolják a további szemcsék közbeágyazódását. A felső réteget főként a nagyobb méretű -20 μm fölötti- szemcsék alkotják, melyek megnehezítik az alsó réteg szemcséinek optikai vizsgálatát. E probléma kiküszöbölése végett a két szemcseréteg elemzése külön történt meg.

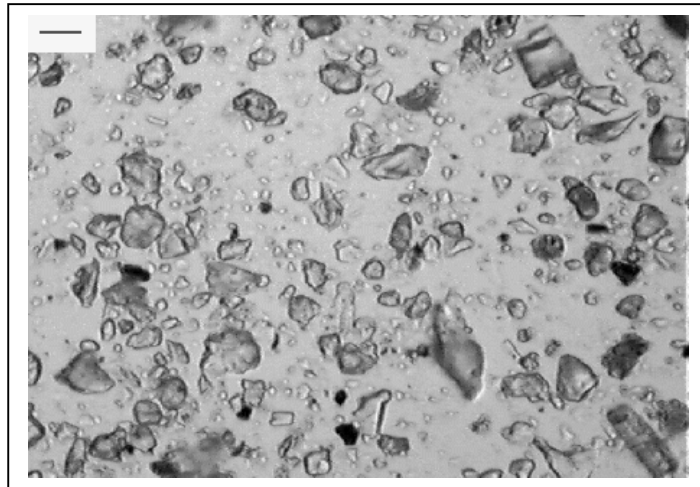
A 20 μm -nél kisebb méretű szemcsék vizsgálatára normál 16-os objektív szolgált, ami 200-szoros nagyítást biztosított az elemzés számára. (A 6.4. ábrán feltüntetett lépték 20 μm -nek felel meg.) A feladásnak ebben a részében az összenövések 6-7 %-os arányban fordulnak elő, bennük az érces előfordulás átlagosan 10-25 %-os, de előfordulnak akár 80 %-ban érces összenövések is. További jellegzetesség a szabálytalan alakú szfaleritszemcsék és a majdnem szabályos galenitkockák jelenléte. Elvértve egy-két hatszögletű - teljesen feltárt állapotban lévő - szfaleritszemcse is jelen van.

A 20 μm -nél nagyobb méretű szemcsék vizsgálata normál 25-ös objektívvel történt, ami 312,5-szeres nagyítást biztosított az elemzés számára. (A 6.8. ábrán feltüntetett lépték 50 μm -nek felel meg.) A feladásnak ebben a részében az összenövések aránya 15 % körüli, melyekben az ércarány átlagosan mintegy 10-20 %-ot tesz ki, de előfordulnak ennél lényegesen magasabb, akár 50 %-os érc tartalommal bíró összenövések is. A feladásról készült mikroszkópi felvételeket a 6.4 és 6.5. ábrák szemléltetik.

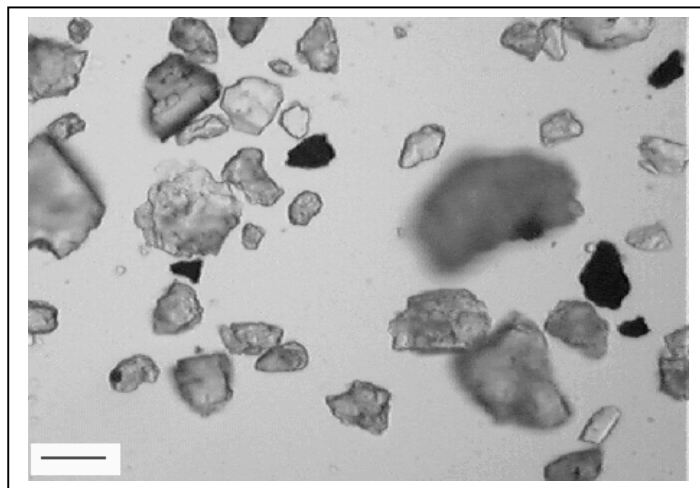
A további fénymikroszkópos vizsgálatokat megelőzően (a Berliini Műszaki Egyetemen készített vizsgálatok) a feladásra kerülő mintát több szemcsefrakcióra (< 0,08 mm,

0,08-0,1 mm és 0,5-1,0 mm) és az adott szemcsefrakciókat centrifugális sűrűségvizsgálattal (bromofórm segítségével) sűrűség-frakciókra (< 2,86 g/cm³ –könnyű termék és > 2,86 g/cm³ –nehéz termék) választottam szét. A 6.6. és 6.7. ábrák a közepső szemcsefrakció (0,08-0,1mm) nehéz termékéről készített felvételeket mutatják be, amelyek 50-es objektívvel készültek. E felvéte-

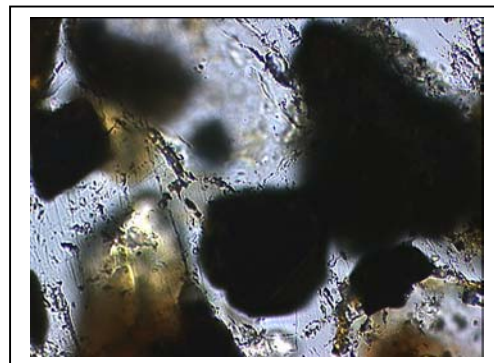
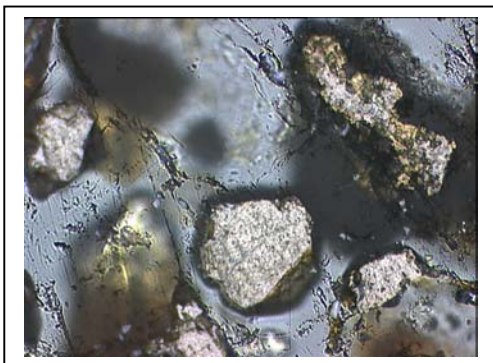
leken nagyon szépen láthatóak azok az összenövések, amelyeket a fémes ásványok a kvarccal képeznek.



6.4. ábra Mikroszkópi felvétel a feladás alsó rétegéről ($< 20 \mu\text{m}$)

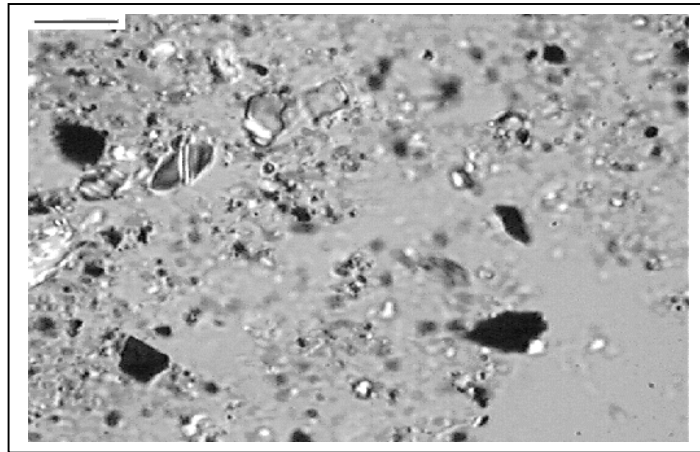


6.5. ábra Mikroszkópi felvétel a feladás felső rétegéről ($> 20 \mu\text{m}$)

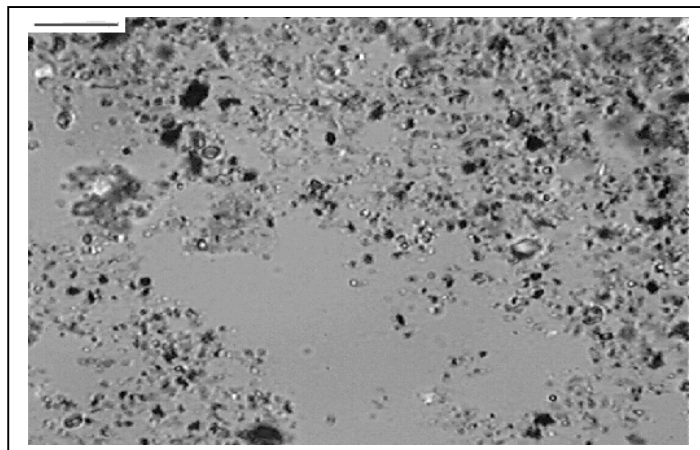


6.6.- 6.7. ábrák Fénymikroszkópos felvétel a feladásról

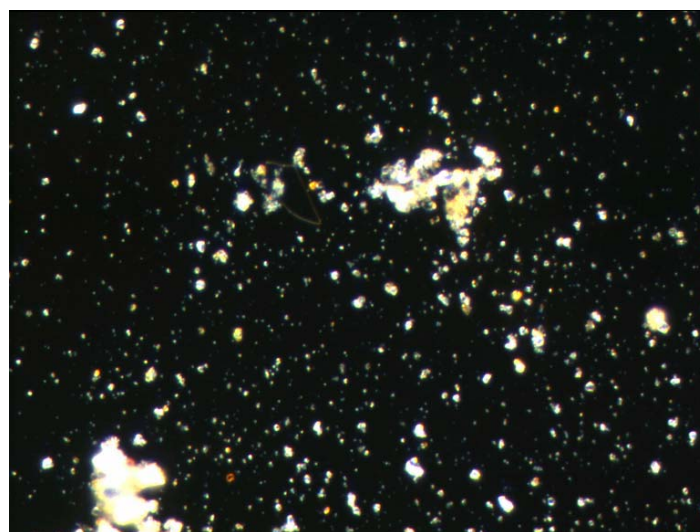
A keverőmalom őrleményéről (5, 10 és 20 perces őrlés után) készült fénymikroszkópos felvételeket mutatnak be a 6.8.-6.10. ábrák. A 6.8. és 6.9. ábrák esetében az őrlési paraméterek az alábbiak: $n=1440$ 1/min; $\varphi_m = 0,8$; $c_m = 0,2$.



6.8. ábra Mikroszkópi felvétel az őrleményről ($t = 5$ min.)



6.9. ábra Mikroszkópi felvétel az őrleményről ($t = 10$ min.)



6.10. ábra Mikroszkópi felvétel az őrleményről ($t = 10$ min.)

(Őrlési paraméterek: $n = 1440 \text{ 1/min}$; $\varphi_m = 0.7$; $c_m = 0.2$).

A mikroszkóppal történt vizsgálatok eredményei azt mutatják, hogy rövidebb őrlési időnél mind a meddő-, mind az ércásványszemcsék viszonylag nagyobb (6 és 8 μm közötti) méretűek, de számottevő a kisebb méretű (1 μm körüli) szemcsék jelenléte is. A szfaleritszemcsék még nincsenek teljesen feltárt állapotban. 10 perces őrlési idő után az átlagos szemcseméret igen kicsi – 3 μm körüli. Megjelennek a hatszögletű, teljesen feltárt állapotú szfaleritszemcsék. A mintát igen gyenge agglomerálódottság jellemzi: bár egyes ércszemek még meddőásvány felületekhez tapadnak, a legtöbb ércszemcse a meddőtől elkülönült állapotban van jelen. A mikroszkópi felvételeken megfigyelhető, hogy az őrlési idő ($t > 5$ perc) növelésével megnő a képződött aggregátumok száma. Mennyiségük a leghosszabb őrlési időnél ($t = 5$ perc) már számottevő.

6.5. AZ ALKALMAZOTT ŐRLŐMALKOK MŰKÖDÉSÉNEK ÉRTÉKELÉSE A KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ALAPJÁN

A keverőmalom működésének értékelése:

- A lézeres szemcsenagyság-elemzések alapján megállapítható, hogy 12 perces őrlési időtől kezdve már az összes szemcse mérete a 7 μm alatti tartományban van.
- A mikroszkópi elemzés eredményeit összevetve ugyanakkor az állapítható meg, hogy a beállított üzemi paraméterek mellett, az optimális őrlési idő 8 perc.
- Az adatokból arra következtethetünk, hogy a keverőmalmok valóban megfelelnek az elvárt követelményeknek és alkalmasak ultrafinom feltárási őrlésre.
- Az őrleményre vonatkozó fajlagos felület értéke rendkívül nagy, ami szintén a malom kiemelkedő őrlési hatékonyságára enged következtetni.

A rezgőmalom működésének értékelése:

- A rezgőmalmok alapvető hiányossága a beadagolható anyag korlátozott finomsága, amit a rezgőmalmok őrlőtesttöltetének viszonylag kis ütési energiája és a kis teljesítmény indokol.
- A folyamatos üzemű rezgőmalmok alkalmazása korlátozott, mert a folyamat nagy energiatelhelése és az anyagáramlás sebességének csökkenése miatt (melyet a nagy töltési fok és az őrlőtestek bonyolult pályájú mozgása okoz) a malomban magas hőmérséklet lép fel. Az őrlendő anyagrészek felmelegedése következtében aggregáció (és agglomeráció) léphet fel.
- A rezgőmalom az anyag töltet változására is érzékeny, körfolyamatos őrlésnél átbocsátóképessége korlátozott.
- Korábban említésre került, hogy a legnagyobb aprítási hatás nagy amplitúdóval (7-10 mm) érhető el, viszont meg kell jegyezni, hogy ilyen nagy amplitúdójú rezgőmalmokat iparilag nem gyártanak.

Következtetések az őrlőberendezések összehasonlítása útján:

- A nagyobb centrifugális-, és súrlódóerők következtében a keverőmalmokban lényegesen finomabb a termékek szemcseméret-eloszlása, mint a rezgőmalmokban.
- A keverőmalomban a kívánatos őrlési finomság lényegesen rövidebb idő alatt érhető el, mint a rezgőmalomban.
- A néhány mikrométeres behintési szemcsenagyság által igényelt finom őrlést tehát, a keverőmalom hatásosabban állítja elő, mint a rezgőmalom.
- A keverőmalmokban jobban feltárt őrlemények állíthatók elő, mint a rezgőmalomban.
- Összefoglalóan elmondható, hogy a keverőmalmok alkalmasabbak a nedves, finom és ultrafinom feltáró őrléshez.

7. EMPIRIKUS MODELL A KEVERŐMALOM ŐRLEMÉNYE SZEMCSEMÉRET-ELOSZLÁSÁNAK BECSLÉSÉRE

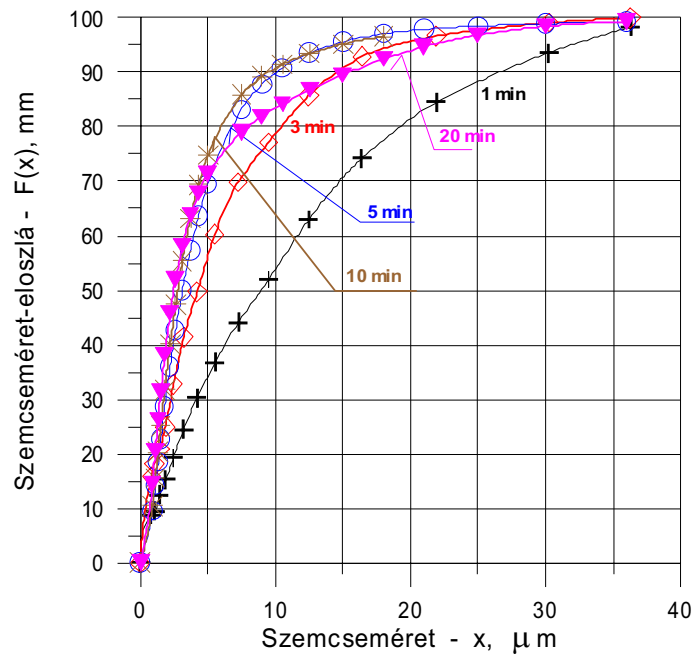
Jelen kutatási témakörben célkitűzésünk olyan empirikus törés-modell kialakítása volt, amely megbízhatóan lehetővé teszi a keverőmalom őrleménye szemcseméret-eloszlásának becslését. Elsősorban a módszer kialakításra, alkalmazásnak igazolására és bemutatásra törekedtem. (Részben előttem álló feladat a modell-paraméterek és az üzemjellemzők közötti részletesebb összefüggések feltárása.)

A cél érdekében önálló őrlési kísérlet-sorozatot végeztem a keverőmalommal a 7.1. táblázatban összefoglalt körülmények mellett.

MEGNEVEZÉS	KEVERŐMALOM
Malom töltési foka (φ_m)	0,7
Őrlőtestek töltési foka (φ_g)	0,455
Szilárdanyag tömegkoncentrációja (c_m)	0,2
Keverőtengely fordulatszáma (n)	1440 1/min.
Őrlési idő (t)	1, 3, 5, 10, 20 min.

7.1. táblázat Őrlési paraméterek az előzetes őrlési vizsgálatok során

A kísérletsorozatban az őrlés eredményét legalapvetőbben befolyásoló tényezőt, nevezetesen az őrlési időt változtattam. A 7.1. ábrán a különböző őrlési idő mellett kapott őrlemények szemcseméret-eloszlását ábrázoltam.



7.1.ábra. Kísérleti őrlés keverőmalomban: termékek szemcseméret-eloszlása

Megfigyelhető, hogy növekvő őrlési idővel az őrlemény szignifikánsan finomodik. Ezt mutatja a 7.2. táblázat is, ahol is a malomtermékek mediánja (50 %-os szemcsemérete) és 80 %-os szemcsemérete látható.

Őrlési idő, t [min]	1	3	5	10	20
50 %-os szemcseméret (medián), [μm]	8,94	4,23	3,11	2,76	2,47
80 %-os szemcseméret [μm]	18,1	12,2	8,5	8,0	7,5

7.2.táblázat A malomtermék jellegzetes szemcseméretei a kísérleti őrlés során

A továbbiakban azt vizsgáljuk meg, hogy az őrlemények mutatnak e belső „törvényszerű” szemcseszerkezeti sajátosságot, és e sajátosságokat a változó őrlési idő miként befolyásolja.

A szemcseméret-eloszlás jellegzetességét, belső szerkezetét az ún. karakterisztikus vagy relatív szemcseméret-eloszlásgörbékkel tárhatjuk fel (amelyeket empirikus törési függvényeknek is neveznek [71, 72]):

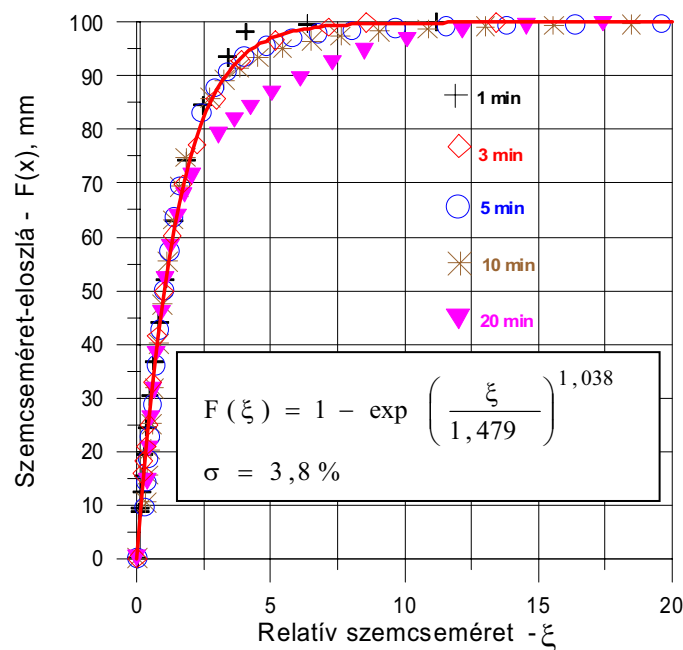
$$F(\xi) = f\left(\frac{x}{x^*}\right) \quad (7.1)$$

ahol x^* az őrlmény valamely jellegzetes szemcsemérete.

A karakterisztikus függvények-görbék vízszintes tengelyén a relatív szemcseméret van feltüntetve, amely az elemzési szitanyílás és az eloszlás valamely jellegzetes szemcseméretének a hányadosa. A vonatkoztatási szemcseméret lehet az őrlmény maximális szemcsemérete, mediánja (azaz 100 %-os és 50 %-os szemcsemérete):

$$\xi = \frac{x}{x_{50}} \quad \text{vagy} \quad \xi = \frac{x}{x_{\max}} \quad (7.2)$$

A kísérleti őrlés malomtermékeinek relatív szemcseméreteloszlás-értékeit a 7.2.ábrán tüntettem fel. Vonatkoztatási szemcseméretként a mediánt használtam. A 7.2.ábrán megfigyelhető, hogy az őrlmények belső szemcseszerkezetükben teljesen hasonlóak (csak a mediánban térnek el), valamennyi mérési alappont ugyanarra a görbére esik. (Kivételt a $t = 20$ min. őrlés terméke mutat, ahol már a szemcsék összetapadása a jelentős).



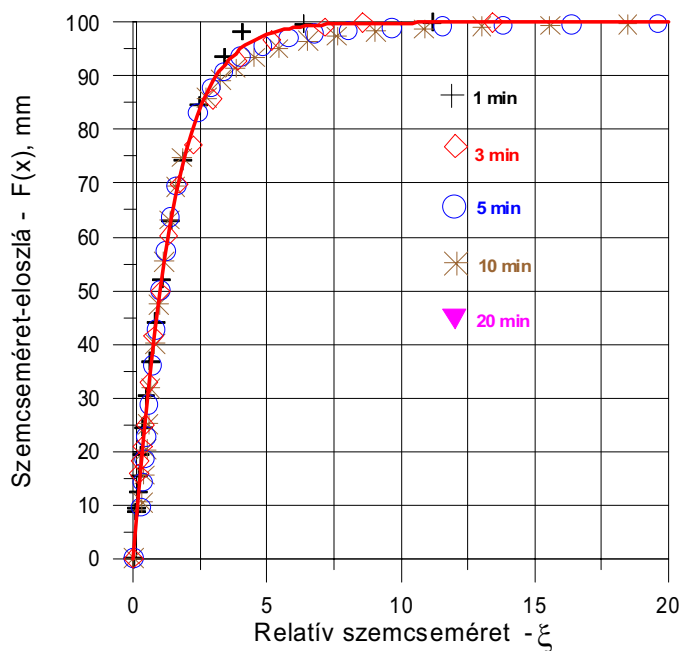
7.2.ábra Kísérleti őrlés termékeinek relatív szemcseméret-eloszlása (törési függvénye)

E karakterisztikus szemcseméret-szerkezeti sajátsgot célszerű függvénnyel (empirikus törési függvénnyel) jellemezni. Az elvégzett (nemlineáris paraméterbecslési) korrelációs eljárással kapott eredmények szerint (7.2.ábra), a törési függvény Rosin-Rammler függvénnyel elegendő pontossággal (relatív szórás 3,8 %) közelíthető:

$$F(\xi) = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{1,479}\right)^{1,038} \quad (7.3)$$

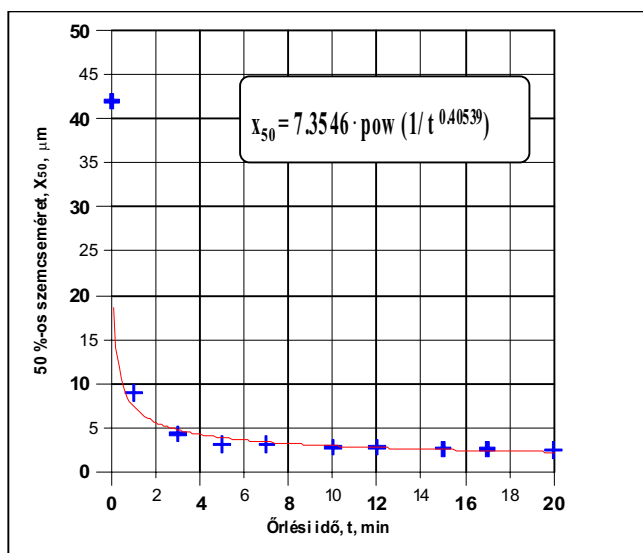
A paraméterek értéke: $a = 1,479$ és $n = 1,038$.

A 7.2. ábrán látható, hogy 20 perces őrlési idő mellett agglomeráció következik be, ezért a függvényparamétereket ezen őrlési idő melletti eredmények elhagyásával számítottam ki (7.3. ábra).



7.3. ábra Kísérleti őrlés termékeinek relatív szemcseméret-eloszlása (törési függvénye) $t = 20$ min. elbgyása mellett

A 20 perces őrlés elhagyása mellett a paraméterek értéke következő: $a = 1,428$ és $n = 1,072$.



7.4. ábra Az őrlemény 50 %-os szemcsemérete az őrlési idő függvényében

Adott anyag és őrlési ($c = \text{konst}$, $n = \text{konst}$, $\varphi_m = \text{konst}$, adott őrlőgolyó méreteloszlás és őrlőgolyóanyag) feltételek mellett tehát az őrlési finomság (őrlemény mediánja és eloszlása) csak

az őrlési idő függvénye (7.4. ábra). Az x_{50} 50 %-os őrlemény szemcseméret (medián) és az őrlési idő közötti összefüggést reprezentáló diagram (7.5. ábra) egyébként leírható matematikai úton is. A vizsgálatok szerint az

$$x_{50} = a \cdot t^b \quad (7.4)$$

hatványfüggvény ad legpontosabb korrelációt. A mérés adataiból

$$x_{50} = 7,355 t^{-0,405} \quad (7.5)$$

A fenti vizsgálatokkal bizonyítottuk:

- a keverőmalmi őrlési folyamat törvényszerű viselkedését, amelyet két alapfüggvénnyel jellemezhetünk, nevezetesen:

relatív szemcseméret-eloszlás függvénnyel

$$F(\xi) = f\left(\frac{x}{x^*}\right), \quad (7.6)$$

jelen esetben R-R alakú un. empirikus törési függvénnyel, ahol $x^* = x_{50}$ medián; valamint x_{50} medián időbeli változását leíró

$$x_{50} = f(t) \quad (7.7)$$

jelen esetben hatványfüggvénnyel.

A fenti, valamint itt most részletesebben nem kutatott - a fenti függvények paramétereinek az üzemjellemzőktől (főként n , c_m , φ_m , dg) való függését reprezentáló - empirikus függvények alkalmazásával az őrlemény szemcseméret-eloszlás jól megbecsülhető.

8. DIMENZIÓANALÍZIS KEVERŐMALOMBAN TÖRTÉNŐ NEDVES ÓRLÉSRE

8.1. DIMENZIÓANALÍZIS ALKALMAZÁSA KEVERŐMALOMRA

Sokszor adódnak olyan helyzetek, amikor a kismintabeli folyamatot nagyobb berendezésre kell felállítani, anélkül, hogy részletes számítások állnának rendelkezésre (*scale-up modell*).

A *modell és a főkivitelezés hasonlósága* olyan módon vizsgálható, hogy a sebességmezők, a koncentrációs-, és hőmérsékletfolyamatok mindkét rendszerben megmérhetők, és ezután elemzésre kerül, vajon a hasonlósági definíciók megfelelő módon képzett viszonyai elegendőek -e.

Az őrlési kísérleteket „kismintával” (laboratóriumi malommal) végeztem. Tegyük fel, hogy ezt a laboratóriumi malmot szeretném ipari (üzemi) méretben is kivitelezni. A probléma megoldására, természetesen *scale-up* modellt szükséges alkalmaznom. A laboratóriumi modell és az ipari berendezés tulajdonságaikban egymással hasonló, ha azonos peremfeltételeknél a mértékadó dimenziómentes jellegszámok a modellre és főkivitelezésre azonosak.

A keverőmalom teljesítményszükséglete a *dimenzióanalízis* alkalmazásával határozható meg. Kísérleti tapasztalatok szerint egy folyadékkeverő teljesítményszükséglete a keverő és a tartály méreteitől, a keverő fordulatszámától, a kevert folyadék sűrűségétől és viszkozitásától és – ha a keverőtartályban folyadéktölcsér keletkezik – akkor még a nehézségi erőtől is függ [59].

A keverőmalom teljesítményszükségletét az előbbieken felsorolt paraméterek mellett egyéb tényezők is befolyásolhatják. Elsősorban azért, mert a keverő mellett őrlőtestek (őrlőgolyók) végzik az őrlést, ill. a folyadék közeg mellett szilárd anyag is jelen van. Ilyen paraméterek például az őrlendő anyag és az őrlőgolyók fizikai és geometriai sajátosságai, valamint az őrlőtestek töltési foka és a szilárd anyag tömegkoncentráció. Feltételezzük, hogy a

$$P_m = \varphi(d_k, w_k, D_m, n, c_m, \varphi_m, d_g, \rho, \mu, g) \quad (8.1)$$

összefüggés létezik,

ahol P_m a keverőmalom teljesítményszükséglete [kW],
 d_k a keverőtárca átmérője [m],
 w_k a keverőtárca szélessége [m],

D_m	a malom belső átmérője [m],
n	a keverőtengely fordulatszáma [1/min],
c_m	szilárd anyag tömegkoncentráció [-],
φ_m	malom töltési fok [-],
d_g	az őrlőgolyók átmérője [m],
ρ	a szuszpenzió sűrűsége [kg/m ³],
μ	a szuszpenzió dinamikai viszkozitása [Pas] és
g	a nehézségi gyorsulás [m/s ²].

A keverőmalom fentiekben említett geometriai és őrlési paramétereit az őrlési vizsgálatok során a 8.1. táblázatban foglaltam össze.

MEGNEVEZÉS	MÉRET	DIMENZIÓ
Keverő átmérő, d_k	70 mm	L
Keverőtárcsák szélessége, w_k	6 mm	L
Malom belső átmérője, D_m	90 mm	L
Őrlőgolyók átmérője, d_g	3,175 mm	L
Keverőtengely fordulatszáma, n	1440	1/T
Szilárd anyag tömegkoncentráció, c_m	0,2	-
Malom töltési fok, φ_m	0,7	-
Őrlendő anyag sűrűsége, ρ_{sz}	2580 kg/m ³	M/L ³

8.1. táblázat A kísérleti berendezés geometriai és üzemi paramétereit az őrlési vizsgálatok során

Az (8.1) összefüggés felírható hatványfüggvény formájában:

$$P_m = A \cdot d_k^a \cdot w_k^c \cdot D_m^e \cdot d_g^f \cdot n^h \cdot \rho_{sz}^i \cdot \mu^m \cdot g^n \quad (8.2)$$

ahol A konstans az őrlési paraméterek függvénye: $A = f(c_m, \varphi_m, \dots)$

Behelyettesítve az egyenlet mindkét oldalán szereplő mennyiségek helyett a táblázatnak megfelelő dimenziókat

$$\frac{ML^2}{T^3} = L^a \cdot L^c \cdot L^e \cdot L^f \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^h \left(\frac{M}{L^3}\right)^i \left(\frac{M}{LT}\right)^m \left(\frac{L}{T^2}\right)^n \quad (8.3)$$

Az összefüggés homogenitása megköveteli a jobb és bal oldali dimenziók azonosságát. E követelmény alapján meghatározhatjuk a hatványkitevőket. Felírva az azonos mennyiségek kitevőinek egyenlőségét:

$$\begin{aligned} \text{tömeg (M)} & 1 = i + m \\ \text{hosszúság (L)} & 2 = a + c + e + f - 3i - m + n \\ \text{idő (T)} & -3 = -h - m - 2n \end{aligned}$$

Három egyenletem van, amely 8 ismeretlent tartalmaz. Tehát 5 hatványkitevő értékét csak a mérési adatokból tudom meghatározni. Fejezzünk ki az egyenletből 3 hatványkitevőt a kísérleti úton meghatározandó 5 hatványkitevő (c,e,f,m,n) segítségével:

$$\begin{aligned} a &= 5 - c - e - f - 2m - n \\ h &= 3 - m - 2n \\ i &= 1 - m. \end{aligned}$$

Helyettesítsük a kapott (8.2) egyenletbe és csoportosítsuk a kifejezést az ismeretlen kitevők szerint:

$$P_m = A \cdot d_k^5 \cdot n^3 \cdot \rho \left(\frac{d_k^2 n \rho}{\mu} \right)^{-m} \left(\frac{d_k n^2}{g} \right)^{-n} \cdot \left(\frac{w_k}{d_k} \right)^c \cdot \left(\frac{D_m}{d_k} \right)^e \cdot \left(\frac{d_g}{d_k} \right)^f. \quad (8.4)$$

A keverő kerületi sebessége $v_k = d \cdot \pi \cdot n$, így az egyenletben szereplő $\frac{d_k^2 n \rho}{\mu}$ kifejezés

$$\frac{d_k^2 n \rho}{\mu} = \frac{1}{\pi} \frac{dv_k \rho}{\mu} = Re, \quad (8.5)$$

a keverési Reynolds –szám.

A $\frac{d_k n^2}{g}$ kifejezés az egységnyi tömegre ható centrifugális, illetve nehézségi erő viszonyát fejezi ki:

$$\frac{d_k n^2}{g} = \frac{1}{\pi^2} \frac{v_k^2}{d_k g} = Fr, \quad (8.6)$$

ez a keverési Froude-szám.

Ha az üzemi készülék geometriailag hasonló a kísérleti berendezéshez, tehát a

Hiba! A mezők szerkesztésével nem hozhatók létre objektumok.

arányok mindkét esetben ugyanakkorák, akkor a (8.4) egyenlet egyszerűbb alakot ölt:

$$\frac{P_m}{d_k^5 n^3 \rho} = A \cdot Re^{-m} \cdot Fr^{-n}. \quad (8.7)$$

A $\frac{P_m}{d_k^5 \cdot n^3 \cdot \rho}$ kifejezés a dimenzió nélküli keverési Euler-szám és így

$$Eu = A \cdot Re^{-m} \cdot Fr^{-n}. \quad (8.8)$$

Az m , n kitevők, valamint az A konstans meghatározása kísérleti úton lehetséges. Ha a keverő nem diszpergál levegőt a szuszpenzióba, a Froude-szám kitevője $n = 0$. Ezt figyelembe véve a (7.2.8) egyenlet a következő formára egyszerűsödik:

$$Eu = A \cdot Re^{-m} \quad (8.9)$$

A Re szám ismeretéhez a geometriai méretek és üzemi paraméterek ismerete mellett, fontos a szuszpenzió térfogati koncentrációjának (c_v) és a szuszpenzió dinamikai viszkozitásának (μ) ismerete is (az előbbi a szuszpenzió sűrűségének meghatározásához, ld. később):

$$Re = \frac{\rho \cdot v_k \cdot d_k}{\mu} \quad (8.10)$$

Az előbbi a szuszpenzióban lévő szemcsék térfogatának (V_{sz}) a szuszpenzió térfogatához (V) viszonyított arányából egyszerűen kiszámítható (az 5.8. táblázat adatainak segítségével):

$$c_v = \frac{V_{sz}}{V} = 0,0883 \quad (8.11)$$

Tehát a 20 %-os szuszpenzió tömegkoncentrációhoz, 8,83 %-os szuszpenzió térfogati koncentráció tartozik.

A szuszpenzió dinamikai viszkozitása (μ) reológiai mérésekkel határozható meg, amelynek során a szuszpenzió folyási tulajdonságait ismerjük meg. A mérések eredménye a nyírófeszültség (súrlódási feszültség) és a nyírási sebesség összetartozó értékeinek meghatározása, adott hőmérséklet és nyomás esetén. A mért értékeket a $\tau - du / dy$ nyírási diagramban, vagy reogramban ábrázolva, a szuszpenzió folyási viselkedését leíró anyagegyenletet ismertnek tekinthetjük, és a szuszpenziót az előbbieken közölt osztályozásnak megfelelően valamely folyadék típusba besorolhatjuk. (Az időtől, azaz a reológiai előélettől is függő folyási viselkedést mutató közegeknél a mérési eljárás értelemszerűen bonyolultabb).

Az időtől független folyási viselkedés vizsgálatára, szuszpenzióknál és folyadékoknál számos eljárás és mérőberendezés áll rendelkezésre. Ezeket 3 csoportba sorolják: csőviszkoziméterek vagy kapilláris viszkoziméterek, rotációs viszkoziméterek és a szuszpenzióban süllyedő vagy emelkedő gömb mérésén alapuló mérőeszközök.

A legfontosabb eljárás, ill. mérőeszköz szuszpenzió esetén a csőviszkoziméter és a rotációs viszkoziméter. Mindkettő előnyökkel és hátrányokkal rendelkezik, és mindkettőnek megvan a sajátos alkalmazási területe. Egyiket sem alkalmazzák általánosan, vagy kizárólagosan. A csőviszkoziméterrel ellentétben a rotációs viszkoziméter nem tekinthető hitelesítés nélkül alkalmazható mérési eljárásnak [48].

A szuszpenzió dinamikai viszkozitásának meghatározására rotációs viszkoziméter áll rendelkezésemre. *Rotációs viszkozimétereknél* a mérendő szuszpenzióba álló hengert és ezzel koncentrikus forgó dobot, vagy megfordítva forgóhengert és álló dobot merítenek és a kettő közötti

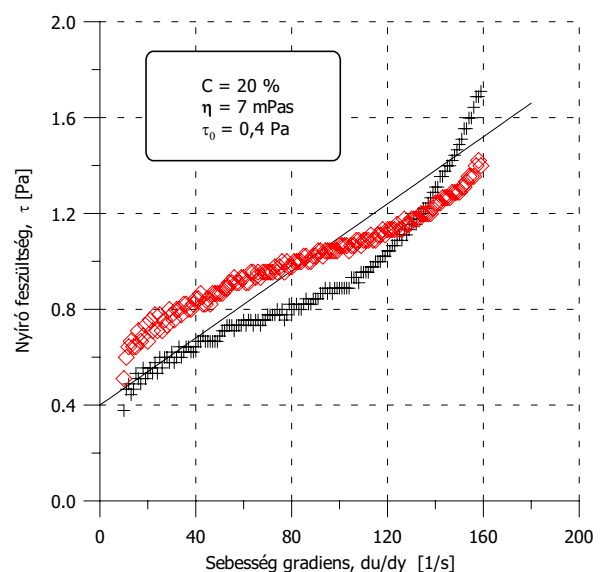
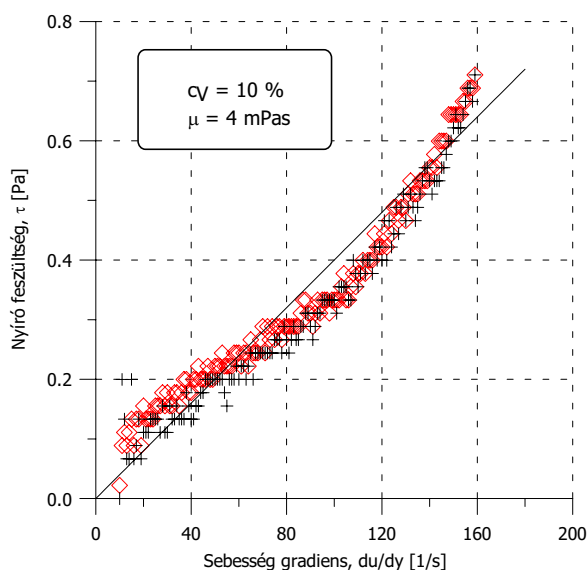
gyűrű alakú térben megvalósuló folyadékmozgást vizsgálják, mérik. A rotációs viszkoziméter kis mennyiségű mintaanyag reológiai tulajdonságainak mérésére alkalmas. A legnagyobb megengedett szemcsenagyságot a gyűrű alakú tér mérete határozza meg. A nagyobb szemcsék kiüledése, vagy kicentrifugálódása miatt már gyengén ülepedő szuszpenziók sem mérhetők ezzel az eljárással.

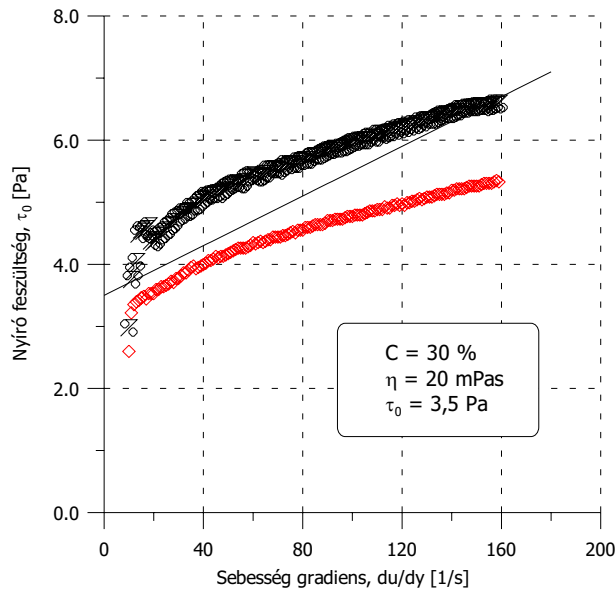
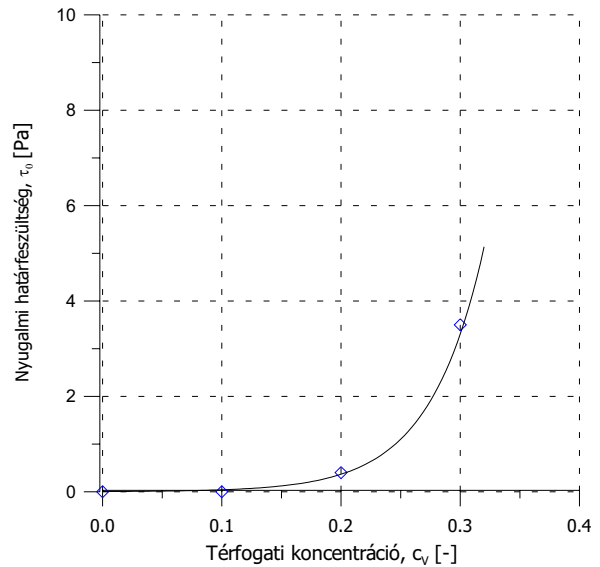
A mérések, az adott kísérleti anyagból készült szuszpenzióra vonatkozóan több térfogati koncentráció (c_v) mellett történtek, amelyek értéke rendre 10, 20 és 30 % volt. A mért értékeket a $\tau - du/dy$ nyírási diagramban (a továbbiakban folyási görbe), illetve a $\tau - c_v$ diagramban foglaltam össze (8.1-8.4. ábrák). A μ viszkozitási tényezőt a folyási görbe iránytangense adja meg. Az eredmények azt mutatják, hogy $c_v = 0,1$ térfogati koncentráció mellett az adott szuszpenzió newtoni tulajdonságokat mutat, viselkedése egyetlen folyási paraméterrel, a dinamikai viszkozitással írható le (a folyási viselkedés szempontjából ún. „egyparaméteres” szuszpenzió). Érvényes rá a Newton-féle folyadéksúrlódási törvény, amely szerint a súrlódási feszültségek (τ) és a deformációsebesség (du/dy) között az alábbi összefüggés áll fenn:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (8.12)$$

Ezzel szemben, $c_v = 0,2$ és $0,3$ értékeknél a szuszpenzió nem-newtoni, egészen pontosan viszkózus, Bingham-plasztikus. A Bingham-plasztikus szuszpenziók jellegzetes tulajdonsága, hogy nyugalomban merevséggel rendelkeznek, bizonyos mértékig állandó alakjuk van, és csak egy meghatározott τ_0 határfeszültség átlépése után kezdődik a folyás. Viselkedésük az η merevségi tényezővel és az előbbieken említett τ_0 határfeszültséggel ($\tau > \tau_0$) jellemezhető az alábbi egyenlet szerint:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad (8.13)$$



8.1. ábra Folyási görbe 10 %-os térfogati koncentráció mellett**8.3. ábra** Folyási görbe 30 %-os térfogati koncentráció mellett**8.2. ábra** Folyási görbe 20 %-os térfogati koncentráció mellett**8.4. ábra** A nyugalmi határfeszültség változása a térfogati koncentráció függvényében

A nyírási diagramok kiértékelése során kapott paramétereket a 8.2. táblázatban foglaltam össze.

c_v , [%]	μ, η [mPas]	τ_0 Pa]
10	4	-
20	7	0,4
30	20	3,5

8.2. táblázat Folyási paraméterek a rotációs viszkoziméterrel történt mérések során

Áttekintve az elméleti [48] és kísérleti vizsgálatokat, az abszolút viszkozitási tényező az alábbi általános és matematikai formákban írható fel ($c_v > 0.01$ esetén):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + K_1 \cdot c_v + K_2 \cdot c_v^n \quad (8.14)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + 25 \cdot c_v + 4600 \cdot c_v^5 \quad (8.15)$$

Az összefüggésben szereplő μ_0 a szemcse nélküli szuszpenziós közeg viszkozitása, a K_1 és K_2 állandók és az n kitevő értékét matematikai úton határoztam meg.

A $c_v = 0,1$ és $c_v = 0,2$ koncentráció-tartományban nem történt mérés, fontosnak tartom a τ_0 határfeszültség értékét is meghatározni. Az erre kapott matematikai egyenlet az alábbi:

$$\tau_0 = 0,045 \cdot e^{22 \cdot c_v} \quad (8.16)$$

Mivel a nedves őrlési vizsgálatok során alkalmazott térfogati koncentráció értéke $c_v = 0,0883$, ezért következtetésként levonhatom, hogy az adott meddőanyagból álló szuszpenzió időben állandó newtoni szuszpenzió.

Míndezek után visszatérek a **Re** szám meghatározásához, amihez a szuszpenzió sűrűségét az alábbi összefüggéssel határoztam meg:

$$\rho = \rho_f + c_v \cdot (\rho_{sz} - \rho_f) \quad (8.17)$$

Az 5.8. táblázat adatainak felhasználásával a szuszpenzió sűrűsége, $\rho = 1140 \text{ kg/m}^3$ és az így kapott keverési *Re szám* értéke (v_k a keverőtárcsa kerületi sebessége a keverőtengely fordulatszámának ismeretében meghatározható, értéke $v_k = 5.25 \text{ m/s}$) az alábbi:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_k \cdot d_k}{\mu} = 104.737,5 \quad (8.18)$$

Ezek alapján feltételezem, hogy $Re > 10^3 \cdot 10^4$ esetén a keverőmalom, a keverőkhöz hasonlóan turbulens tartományban dolgozik. Turbulens tartományban az *Eu*-szám függetlenné válik a *Re*-számtól, azaz *m* kitevő értéke 0 [59].

$$Eu = A \cdot B = 0,14 \cdot A \quad (8.19)$$

és

$$P_m = A \cdot d_k^5 \cdot n^3 \cdot \rho \quad (8.20)$$

8.2. SCALE-UP KEVERŐ-GOLYÓSMALOMRA

Ha az őrlési kísérleteket „kismintával” (laboratóriumi malommal) végeztem és ipari (üzemi) méretre szeretnék áttérni, akkor az ún. scale up modellt alkalmazom. Erre a modellre példaként említem azt a jelenséget, amelyet a geometriai jellemzőkön kívül a nehézségi gyorsulás, a kerületi sebesség és a kinematikai viszkozitás jellemez. Ebben az esetben az ugyanezekkel a mennyiségekkel jellemezhető, de különböző méreteken lejátszódó folyamatok egymásnak megfelelő jellemző mennyiségei közötti összefüggések kifejezésekor mind a *Froude*-szám, mind pedig a *Reynolds*-szám által előírt követelményeket ki kell elégíteni. Azonban ezek a követelmények sok esetben egymásnak ellentmondanak.

Az általam megtervezett laboratóriumi keverő-golyósmalom üzemi alkalmazására vonatkozóan, (scale up modellt alkalmazva) kétféle szempont szerint járhatok el. Az első szempont az, hogy a térfogategységre vonatkoztatott teljesítményszükséglet azonos marad. A második szem-

pont szerint a keverőtengely kerületi sebességét tartom állandó értéken. (Ez a feltevés csak akkor helyes, ha a keverés hatásossága arányos a kerületi sebességgel).

Első szempont:

$$\frac{P}{V} = \text{állandó} \quad (8.21)$$

ahol V_m az aktív malomtér fogat $[m^3]$.

Turbulens tartomány esetében a térfogategységre vonatkoztatott teljesítményigény értéke az ipari méretű készülékre és a kismintára (km indexű) vonatkoztatva a következő:

$$P_m = P_{m,km} \quad (8.22)$$

$$\frac{A \cdot n^3 d_k^5 \rho}{d_k^3} = \frac{A \cdot n_{km}^3 d_{k,km}^5 \rho}{d_{k,km}^3} \quad (8.23)$$

(a nevezőben d_k^3 a V térfogat helyett áll).

A, B és ρ értékek azonosak, ezért a fenti egyenlet egyszerűsítve:

$$n^3 d_k^2 = n_{km}^3 d_{k,km}^2 \quad (8.24)$$

Innen az ipari berendezés keverőtengelyének fordulatszámja kifejezhető a kismintára vonatkozó fordulatszám ismeretében:

$$n = n_{km} \left(\frac{d_{km}}{d_k} \right)^{2/3} = n_{km} \cdot k^{-2/3} = n_{km} \left(\frac{1}{k} \right)^{2/3} \quad (8.25)$$

ahol $k = \text{méretarány} = \text{ipari/kisminta}$.

Második szempont:

$$v_k = v_{k,km} \quad (8.26)$$

$$n \cdot \pi \cdot d = n_{km} \pi \cdot d_{k,km}, \quad (8.27)$$

így

$$n = \left(\frac{d_{k,km}}{d_k} \right) n_{km} = \frac{1}{k} n_{km}. \quad (8.28)$$

Megjegyzés: A keverőmalom térfogatának növelésével csökken a terhelési intenzitás és ezzel együtt a fajlagos energia, azonos őrlőgolyóméret, őrlőgolyósűrűség, valamint kerületi sebesség mellett. Ezért scale up modell alkalmazásánál úgy kell az őrlőgolyók méretét és/vagy kerületi sebességet és ezzel együtt a terhelési intenzitást emelni, hogy azonos fajlagos energia bevezetésnél állandó aprítási eredményt érhesünk el [24, 61].

Az agglomeráció jelensége nagyobb malomátmérő és nagyobb golyóátmérő alkalmazásával, valamint az őrlési finomság növelésével egyre jobban érvényre jut [42].

9. ÖSSZEFOGLALÁS, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

Értekezésemben egyrészt a gyöngyösoroszi meddőhányó komponenseinek kísérleti vizsgálatával, másrészt a keverő-golyósmalom jellemzőinek meghatározásával, illetve modellezésével foglalkoztam. A *Bevezetőben* megfogalmazott célok elérése érdekében a következő feladatokat hajtottam végre.

A mintaanyagok eljárástechnikai anyagvizsgálata -a szemcseméret-eloszlás, ásványi-, és kémiai összetétel, sűrűség - mellett külön figyelmet fordítottam az őrlhetőség jellemzésének kérdésére. A Bond, a Hardgrove és a keverőmalmi mérések adataiból megállapítottam, hogy az előbbi eljárások nem alkalmasak a keverőmalmi őrlés őrlhetőségi paramétereinek meghatározására. Ugyanakkor négy különböző keménységű anyaggal párhuzamosan, keverőmalomban végzett nedves őrléssel bizonyítottam a keverőmalomra vonatkozó W_j fajlagos őrlési munka és az x_{50} (medián) őrlési finomság közötti összefüggést (5.12 összefüggés és 5.16. ábra).

A fizikai feltárás vizsgálatára egy laboratóriumi keverő-golyósmalmot terveztem, ami a Miskolci Egyetem Eljárástechnikai tanszék laboratóriumában került kialakításra. A fizikai feltárásra irányuló nedves őrlési vizsgálatokat a fentiekben említett kísérleti berendezéssel, illetve a Berlini Egyetem Nyersanyag-előkészítési tanszék laboratóriumában található golyós rezgőmalomban végeztem.

A két malomban, azonos üzemi körülményeket teremtve összehasonlító vizsgálatokat végeztem, amelynek során kimutattam, hogy a keverő-golyósmalom alkalmazása több szempontból előnyösebb a golyós rezgőmalommal szemben. Ezt mutatja a rövidebb őrlési idő alatt elérhető nagyobb termékfinomság és fizikai feltártság. Valamennyi mérési eredmény igazolja, hogy a keverőmalomok alkalmasak a fizikai feltárást megvalósító finom őrlési folyamatok megvalósítására és képesek felvenni a versenyt bármelyik malommal.

A kísérleti keverőmalomban lejátszódó nedves őrlési és feltáródási folyamatot befolyásoló tényezők hatásainak vizsgálata, értékelése, ill. fénymikroszkópos felvételek alapján meghatároztam az optimális őrlési paramétereket.

A tanszéki tapasztalatokat is felhasználva a keverőmalmi őrlés őrleménye szemcseméret-eloszlásának becslésére empirikus modellt dolgoztam ki, amelynek fő függvénye:

- a t őrlési idő és az x_{50} őrlemény medián függvény (7.1. és 7.3. összefüggések),

- és a relatív szemcseméret-eloszlás függvény (empirikus törési függvény), (7.4. és 7.5. összefüggések, valamint 7.2.-7.4. ábrák).

A dimenzióanalízis módszerét alkalmazva összefüggést vezettem le:

- a keverőmalom teljesítményére (8.1., 8.8. és 8.19.-8.20. összefüggések).
- A 8.21.-8.25 és 8.26.-8.28..összefüggések alkalmasak az üzemi méretű malom méretének becslésére, egyrészt a térfogategységre vonatkozó fajlagos teljesítmény, másrészt a keverőtárcsa kerületi sebességének állandóságát feltételezve.

A hasznosítás lehetőségei

Az értekezés eredményei a műszaki gyakorlatban is hasznosíthatók. A kísérleti vizsgálatoknál megfogalmazott törvényszerűségek a keverőmalom ipari méretekben való kivitelezésénél és működtetésénél alkalmazhatóak.

Tárgyalások folynak a *Jászberényi Aprítógépgyár Rt.*-vel egy új keverőmalom kialakítására. Jelenleg a tanszéki műhely keverőmalmot gyárt az *Ajkai Timföldgyár* részére kalcinált timföld őrlésére.

Az értekezés eredményei az oktatásban is jól hasznosíthatók. A graduális és posztgraduális képzés keretein belül a kísérleti berendezés és a kidolgozott empirikus és scale-up modell kitűnő lehetőséget biztosít a keverőmalom működésének, és a nedves őrlés bemutatására.

A továbbfejlesztés lehetőségei

Az értekezésben bemutatott *tudományos eredmények továbbfejlesztésének* egyik lehetséges irányvonala a keverőmalom további aprítási feladatokra gyakorolt hatásának vizsgálata.

Egy másik irányvonal az empirikus modell pontosítása, azon belül az őrlemény méreteloszlási függvényét leíró összefüggés más feladási szemcseméretre és más típusú keverőmalomokra történő általánosítása.

További lehetőség a scale-up továbbfejlesztése oly módon, hogy az általánosan felhasználható legyen a keverőmalomok ipari méretekben történő kialakításánál és fejlesztésénél.

Néhány évvel ezelőtt kiadott kutatási eredmények [23] szerint a legnagyobb aprítási fok a korszerű, ún. rezgő keverő-golyósmalmokban (HOECHST AG) érhető el. Ennek ismeretében úgy gondolom, hogy tudományos eredményeim még további fejlesztéseket irányozhatnak meg, amelyekkel a rezgés aprítási eredményre gyakorolt hatása lenne vizsgálható. Ez természetesen a jövőre vonatkozóan egy újabb őrlőberendezés kialakítását követeli meg.

10. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

I. Az anyagoknak keverő-golyósmalomban történő őrlhetőségének megállapítása, modell keverő-golyósmalomban történő kísérleti vizsgálattal lehetséges.

I.1. Bizonyítottam, hogy a Bond-, és a Hardgrove eljárás nem alkalmas keverőmalmi őrlés esetén az anyagok őrlhetőségének jellemzésére.

I.2. Eljárást dolgoztam ki az őrlhetőségnek laboratóriumi keverőmalomban őrlési kísérlettel történő megállapítására, mérve a $P_{m,0}$, P_m üresjáratú és a terhelés alatt felvett nyomatécókat, 20 percig tartó őrléssel, előírt körülmények között.

I.3. Bizonyítottam, hogy a medián - fajlagos munka:

$$x_{50} = f(W_f) = C_{kev} W_f^m$$

összefüggés valamennyi vizsgált anyagra azonos törvényszerűséget mutat. A függvény alakja hatványfüggvény, ahol az m *kitevő* kb. -0,2 konstans érték. A C_{kev} *paraméter* pedig az őrlhetőséget jellemző mérőszám, értéke mészkő, andezit, gyöngyösoroszi meddő és pumicit sorrendben: 7,4; 11,1; 14,5 és 15,3.

II. A rezgőmalom és a keverő-golyósmalommal (saját tervezés) végzett összehasonlító vizsgálatokkal bizonyítottam a keverő-golyósmalom alkalmasságának előnyeit a rezgőmalommal szemben, mind az elérhető őrlési finomság, mind a feltártság vonatkozásában.

III. Empirikus (módszertani) modellt dolgoztam ki a keverőmalom őrleménye szemcseméret-eloszlásának becslésére.

III.1. Bizonyítottam, hogy az $F(\xi) = x/x_{50}$ relatív szemcseméret-eloszlás függvény (empirikus törési függvény) alkalmas a törési folyamat jellemzésére.

III.2. A modell két fő függvénye

- az empirikus R-R törési függvény:

$$F(\xi) = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{a}\right)^n$$

a vizsgált meddőanyagra:

$$F(\xi) = 1 - \exp\left(-\frac{\xi}{1,479}\right)^{1,038}$$

és a medián-őrlési idő függvény:

$$x_{50} = a t^b$$

(a vizsgált meddőanyagra: $a = 7,355$ és $b = -0,405$).

IV. A keverőmalom teljesítményének meghatározása – az analitikus összefüggés ismeretének hiányában – a dimenzióanalízis módszerének alkalmazásával lehetséges.

IV.1. A dimenzióanalízis módszerét alkalmazva

$$P_m = \varphi(d_k, w_k, D_m, n, c_m, \varphi_m, d_g, \rho, \mu, g)$$

összefüggés feltételezésével invariáns csoportokból álló összefüggést vezettem le:

$$Eu = A \cdot Re^{-m} \cdot Fr^{-n},$$

amelyből a keverőmalomra jellemző viszonyokra a:

$$P_m = A \cdot d_k^5 \cdot n^3 \cdot \rho$$

összefüggés érvényes.

(A konstans az őrlési paraméterek függvénye: $A = f(c_m, \varphi_m, \dots)$)

IV.2. Megállapítottam, hogy a keverőmalom turbulens tartományban dolgozik ($Re > 10^5$).

V. A malomteljesítmény összefüggésének felhasználásával, és a ($P/V = \text{konstans}$) fajlagos teljesítmény állandóságának feltételezésével, scale-up modellt vezettem le a kismintával az üzemi méretű malomra való áttérés körülményének becslésére. *Turbulens* tartomány esetében a térfogategységre vonatkoztatott teljesítményigény értéke az ipari méretű készülékre és a kismintára (km indexű) nézve a következő:

$$P_m = P_{m,km}$$

$$\frac{A \cdot n^3 d_k^5 \rho}{d_k^3} = \frac{A \cdot n_{km}^3 d_{k,km}^5 \rho}{d_{k,km}^3}$$

(a nevezőben d_k^3 -a V térfogat helyett áll).

Ha A , B és ρ értékek azonosak, akkor a fenti egyenlet egyszerűsítve:

$$n^3 d_k^2 = n_{km}^3 d_{k,km}^2$$

Innen az ipari berendezés keverőtengelyének fordulatszámja kifejezhető a kismintára vonatkozó fordulatszám ismeretében:

$$n = n_{km} \left(\frac{d_{km}}{d_k} \right)^{2/3} = n_{km} \cdot k^{-2/3} = n_{km} \left(\frac{1}{k} \right)^{2/3}$$

11. BEFEJEZÉS

1996-ban a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki Karának Gyárszerelő üzemmérnöki szakirányán, 1997-ben a Miskolci Egyetem Bányamérnöki Karának Környezeti Eljárástechnika és Hulladékélelőkészítés szakirányán szereztem diplomát. Ezt követően felvételt nyertem a Miskolci Egyetem doktori képzésére, a Geotechnikai rendszerek és eljárástechnika doktori program, Mechanikai eljárástechnika és nyersanyagélelőkészítés alprogram, Mechanikai eljárások kutatása és fejlesztése részprogramjára, majd 2000-ben teljesítettem az abszolutórium feltételeit. 1998-2000 között mérnök-közgazdász képzésben vettem részt a Miskolci Egyetemen, amelynek eredményeként közgazdasági szakokleveles-mérnöki diplomát szereztem.

2000 őszétől a Miskolci Egyetem Eljárástechnikai tanszékének oktatója vagyok. Az eltelt évek alatt az aprítási és őrlési folyamatok vizsgálatának területén végzett folyamatos kutatáson kívül számos ipari megbízásos és szakértői munkában vettem részt, amelyek tapasztalatai jelentősen segítettek az értekezés elkészültét.

Az értekezés elkészítése több tudományterület párhuzamos alkalmazását kívánta meg, amelyek megismerését nagyban elősegítette a doktori képzés során oktatott tantárgyak ismeretanyaga, és az előadó professzorok patronálása.

Külön köszönettel tartozom *Prof. Dr. Csőke Barnabás* tanszékvezető egyetemi tanárnak, tudományos vezetőmnek, aki a kutatás irányítását, és szellemi bázisát biztosította. *Prof. Dr.-Ing. Z. Halit Kuyumcu* tanszékvezető egyetemi tanárnak, a Berlieni Egyetem Nyersanyag-előkészítési tanszékén folytatott kutatások technikai feltételeinek biztosításáért. *Prof. Dr. Tarján Iván* professor emeritusnak a szakmai tanácsaiért, aki műszaki könyvek [48.] formájában foglalta össze a reológiával és keveréssel kapcsolatos széleskörű ismeretanyagot. *Dr. Opczky Ludmilla* akadémiai munkatársnak (CEMKUT Kft.), az alkalmazott őrlési módszerek területén nyújtott hasznos tanácsaiért. *Dr.-Ing. L. Rolf* egyetemi docensnek az elméleti és kísérleti vizsgálatok területén nyújtott támogatásáért. *Dr. Fajtli József* egyetemi docensnek a reológia területén nyújtott támogatásáért. *Antal Gábor* és *Rusznayák Gyula* tanszéki munkatársaknak, az általam megtervezett kísérleti berendezés technikai kivitelezéséért és a mérés technika területén nyújtott segítségéért. *Balogh Árpádné* és *Horváth Józsefné* laboránsoknak, valamint *Hatvani Zoltán*, *Mucsi Gábor* és *Márkus Zsolt* doktorandusz hallgatóknak a laboratóriumi mérések során nyújtott segítségükért. *Dr. Siménfalvi Zoltán* egyetemi docensnek a szövegszerkesztésnél nyújtott segítségéért.

12. IRODALOMJEGYZÉK

Könyvek és folyóiratok

- [1] *Kun, B.*: 25 éves az Országos Érc- és ásványbányák, OMBKE Bányászati Kiadóiroda, 1990
- [2] *Reinsch, E., Bernhardt, C., Husemann, K.*: Zum Energieverbrauch bei der nassen Feinstzerkleinerung in Rührwerksmühlen, *Aufbereitungstechnik*, 3/1997 (38. Jahrgang), pp. 152-160.
- [3] *Becker, M., Kwade, A., Schwedes, J.*: Feinstzerkleinerung keramischer Rohstoffe und Mahlkörperverschleiss in Rührwerksmühlen, *Aufbereitungs-Technik*, 8/1997 (38. Jahrgang), pp. 430-438.
- [4] *Kwade, A., Blecher, L., Schwedes, J.*: Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 2: Stress intensity and its effect on comminution, *Powder Technology* 86 (1996), pp. 69-76.
- [5] *Tarján, G.*: Mineral Processing. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1986
- [6] *Karbstein, H., Müller, F., Polke, R.*: Scale up bei der Echtzerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen, *Aufbereitungs-Technik*, 10/1996 (37. Jahrgang), pp. 469-479.
- [7] *Fejes, G., Tarján, G.*: Vegyipari gépek és műveletek, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979
- [8] *Tompos, E., Schultz, Gy., Csóke, B., Bóhm, J.*: Ásványelőkészítési mérések és laboratóriumi gyakorlatok, Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, 1987
- [9] *Vendel, M.*: A közetmeghatározás módszertana, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1959
- [10] *Juhász, A. Z., Opoczky, L.*: Szilikátok mechanikai aktiválása finomőrléssel, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1982
- [11] *Bedassa, G., Unland, G.*: Motional Behaviour of grinding elements in stirred ball mills, *Aufbereitungs-Technik*, 10/1997 (38. Jahrgang), pp. 519-527.
- [12] *Stadler, R., Polke, R., Schwedes, J., Vock, F.*: Nassmahlung in Rührwerksmühlen *Chem.-Ing.-Techn.* 62 (1990), pp. 907-915.
- [13] *Bunge, F.*: Mechanischer Zellaufschluss in Rührwerkskugelmühlen, VDI-Verlag: Reihe 3, Nr. 287, Düsseldorf, 1992
- [14] *Blecher, L., Schwedes, J.*: Energy distribution and particle trajectories in a grinding chamber of a stirred ball mill, *International Journal of Mineral Processing*, 44-45 (1996), pp. 617-627.
- [15] *Gao, M., Forssberg, E.*: Prediction of product size distributions for a stirred ball mill, *Powder Technology* 84 (1995), pp. 101-106.

- [16] *Kwade, A., Blecher, L., Schwedes, J.*: Beanspruchungsintensität und Bewegung der Mahlkörper in Rührwerksmühlen, Chem.-Ing.-Techn. 69 (1997), pp. 836-839.
- [17] *Stebr, N.*: Nassfeinstmahlung mit Rührwerksmühlen in der Keramik, Symp. Moderne Mahlverfahren in der Keramik, 1988, pp. 5-18.
- [18] *Mankosa, M.J., Adel, G.T., Yoon, R.H.*: Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal, Powder Technology 49 (1986), pp. 75-82.
- [19] *Joost, B., Schwedes, J.*: Zerkleinerung von Schmelzkorund und Mahlkörperverschleiß in Rührwerkskugelmühlen, Teil 2, DKG 73 (1996), No.6., pp. 365-368.
- [20] *Joost, B., Schwedes, J.*: Verschleiß bei der Zerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen, Chem.-Ing.-Techn. 68 (1996), pp. 713-717.
- [21] *Bunge, F., Schwedes, J.*: Mechanischer Zellaufschluss in Rührwerkskugelmühlen, Chem.-Ing.-Techn. 65 (1993), pp. 70-72.
- [22] *Blecher, L., Schwedes, J.*: Berechnung des Einflusses der Mahlraumgeometrie von Rührwerksmühlen auf die räumliche Verteilung der spezifischen Energie, Chem.-Ing.-Techn. 66 (1994), pp. 1178-1179.
- [23] *Kiesewetter, W., Steidl, D., Dietrich, C.*: Untersuchung einer Rührwerkschwingkugelmühle Chem.-Ing.-Techn. 68 (1996), pp. 1140-1141.
- [24] *Kwade, A., Stender, H.-H.*: Konstantes Zerkleinerungsergebnis beim Scale-up von Rührwerkskugelmühlen, Aufbereitungs-Technik, 8/1998 (39. Jahrgang), pp. 373-382.
- [25] *Joost, B., Schwedes, J.*: Einfluß von Mahlkörpereigenschaften auf die Zerkleinerung in Rührwerkskugelmühlen, Chem.-Ing.-Techn. 68 (1996), pp. 551-554.
- [26] *Kwade, A., Blecher, L., Schwedes, J.*: Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 1: Energy density distribution and motion of single grinding beads, Powder Technology 86 (1996), pp. 59-68.
- [27] *Mankosa, M.J., Adel, G.T., Yoon, R.H.*: Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal, Powder Technology 49 (1986), pp. 75-82.
- [28] *Weit, H., Schwedes, J.*: Scale-up of power consumption in agitated ball mills, Chem. Eng. Technol. 10 (1987), pp. 398-404.
- [29] *Schönert, K.*: Konstantes Entwicklungen in der Zerkleinerungswissenschaft und Wirkungen auf die Mahltechnik, Aufbereitungs-Technik, 9/1991 (32. Jahrgang), pp. 487-505.
- [30] *Schubert, H.*: Zur Energieausnutzung bei Zerkleinerungsprozessen, Aufbereitungs-Technik, 10/1993 (34. Jahrgang), pp. 495-505.
- [31] *Stebr, N.*: Feinmahlung von Kohle/Wasser-Gemischen in Rührwerkskugelmühlen, Chem.-Ing.-Techn. 57 (1985), pp. 162-163.
- [32] *Marmor, F.*: Energiesparende Feinstmahlung mit der Sala-Agitated-Mill (SAM), Aufbereitungs-Technik, 10/1993 (34. Jahrgang), pp. 506-510.
- [33] *Persson, H., Forsberg, E.*: Feinmahlung von Magnetit-Erzen in einer Rührwerkskugelmühle, Aufbereitungs-Technik, 6/1994 (35. Jahrgang), pp. 307-319.
- [34] *John, W.*: Von der Trommelmühle zur Ringkammermühle, Farbe und Lack, 6/1973 (79. Jahrgang), pp. 537-542.
- [35] *Engels, K.*: Die Dispergierverfahren in der Lack- und Farbenindustrie unter besonderer Berücksichtigung der schnellaufenden Rührwerksmühlen, Farbe und Lack, 5/1965 (71. Jahrgang), pp. 375-385.
- [36] *Kraus, W., Giersiepen, G.*: Technische Informationen über die Sandmühle, Farbe und Lack, 5/1961 (67. Jahrgang), pp. 302-306.
- [37] *Sadler, L.Y., Standley, D.A., Brooks, D.R.*: Attrition mill operating Characteristics Powder Technology, 12 (1975), pp. 19-28.
- [38] *Stebr, N.*: Feinmahlung von Kohle/Wasser-Gemischen in Rührwerkskugelmühlen

- Chem.-Ing.-Techn. 57 (1985), pp. 162-163.
- [39] *Schütte, H., Kraume-Flügel, R., Kula, M.R.*: Scale-up des mechanischen Zellaufschlusses Chem.-Ing.-Techn. 57 (1985), pp. 626-627.
- [40] *Engels, K.*: Perlsandmühlen mit ringförmigen Mahlraumquerschnitt, Farbe und Lack, 11/1984 (90. Jahrgang), pp. 910-915.
- [41] *Stebr, N.*: Zerkleinerung und Materialtransport in einer Rührwerkskugelmühle Dissertation, Braunschweig, 1981
- [42] *Beke, B.*: Aprításelmélet, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1963
- [43] *Schubert, H.*: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band I., VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1964
- [44] *Stiess, M.*: Mechanische Verfahrenstechnik, Springer-Verlag, 1993
- [45] *Becker, M., Schwedes, J.*: Comminution of ceramics in stirred media mills and wear of grinding beads, 9th European Symposium of Comminution, Albi-France, 1998
- [46] *Haese, U., Scheffler, P., Fasbender, H.*: Mahlbarkeitsprüfung und Rohrmühlenauslegung bei Zementrohstoffen, Zement-Kalk-Gips, 1975/8
- [47] *Csőke, B., Pethő, S.*: Hazai kőzetek Bond-munkaindexének meghatározása, Építőanyag XXXV. Évfolyam, 11. Szám, 1983
- [48] *Tarján, I.*: A mechanikai eljárás technika alapjai, Miskolci Egyetemi kiadó, 1997
- [49] *Pippel, W.*: Verweilzeitanalyse in technologischen Strömungssystem, Akademie-Verlag, Berlin, 1978, pp.
- [50] *Pabl, M. H.*: Zerkleinerungstechnik, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1991
- [51] *Bedassa, G.*: Modellbetrachtungen zu den Bewegungs- und Beanspruchungsvorgängen in schwingenden Rührwerkskugelmühlen, Aufbereitungs-Technik, 2/2000 (41. Jahrgang), pp. 55-63.
- [52] Hányó kutatás, Integrált technológiai modellek kutatása, Pécs, 1998
- [53] *Forsberg, E., Wang, Y., Persson, H.*: Trockene Feinstmahlung von Dolomit mit der Rührwerkskugelmühle SAM 7.5 – Einfluss von Mahlkörper und Mahlhilfsmittel, Aufbereitungs-Technik, 5/1995 (36. Jahrgang), pp. 211-217.
- [54] *Konya, C.J., Walter, E.J.*: Surface Blast Design. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 134-136, 1990
- [55] *Lynch, A.J.*: Mineral Crushing and Grinding Circuits, Their Simulation, Optimisation Design and Control, Elsevier, Amsterdam-Oxford-London, 1977
- [56] Szpravocsnik po obogasceniju rud. Nedra, Moskva, 1972
- [57] *Csőke, B.*: Előkészítési eljárások kutatása és fejlesztése. Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetek, Miskolc, 1997
- [58] *Tarján, G.*: Ásványelőkészítés II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1987
- [59] *Fonyó, Zs., Fábry, Gy.*: Vegyipari művelettan ismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998
- [60] *Ivicsics, L.*: Hidromechanikai modellkísérletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1968.
- [61] *Schütte, H., Kraume-Flügel, R., Kula, M.R.*: Scale-up des mechanischen Zellaufschlusses, Chem.-Ing.-Techn. 57 (1985/7), pp. 626-627.
- [62] *Stebr, N., Schwedes, J.*: Zerkleinerungstechnische Untersuchungen an einer Rührwerkskugelmühle, Chem.-Tech.-Techn. 55 (1983/3), pp. 233.
- [63] *Stebr, N., Schwedes, J.*: Zerkleinerungstechnische Untersuchungen an einer Rührwerkskugelmühle, VDI-Berichte Nr. 505 (1983), pp. 440-455.
- [64] *Stebr, N., Schwedes, J.*: Zerkleinerungstechnische Untersuchungen an einer Rührwerkskugelmühle, Aufbereitungs-Technik 24, 10/1983, pp. 597-604.
- [65] *Stebr, N., Schwedes, J.*: Investigation of the grinding behaviour of a stirred Ball Mill, Ger. Chem. Eng. 6, 1983, pp. 337-343.

- [66] *Stebr, N.*: Verweilzeitverteilungen in einer kontinuierlich betriebenen Rührwerkskugelmühle, Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft XXXV. 1983, pp. 121-133.
- [67] *Stebr, N.*: Residence Time Distributions in a stirred Ball Mill and their Effect on Comminution, Chem. Eng. Process. 18. 1984, pp. 73-83.
- [68] Allgemeine Grundlagen der Verfahrens- und reaktionstechnik
Ullmans Encyklopädie der technischen Chemie, Band 1.
Verlag Chemie, Weinheim / Bergstr.
- [69] *Tarján, G.*: Ásványelőkészítés I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1987
- [70] *Juhász, A. Z., Opoczky, L.*: Mechanokémia és agglomeráció, Építőanyag, 2003/3, pp. 86-90.
- [71] *Csóke, B., Pethő, Sz, Földesi, J., Mészáros, L.*: Optimatization of Stone-Quarry Technologies. Comminution 1994. (Ed. K.S.E. Forssberg -K.Schönert). ELSVIER. Amsterdam-Lausanne-New York- Oxford-Shannon-Tokyo. 1996. pp. 447-459.
- [72] *Csóke, B., Rácz, J.*: Estimation of the Breakage and Selection Funktoin for Comminution in Hammer Mill. 9th European Symposium on Comminution, Albi (France), 1998, pp.393-401.
- [73] *Blumenauer, H., Pusch, G.*: Műszaki törésmechanika, Műszaki Könyvkiadó, 1987
- [74] *Steiner, H-J.*: Aufbereitungstechnische Untersuchung der Flotationsberge von Gyöngyösoroszi/Ungarn, Bericht, Leoben, 2002
- [75] *Beke, B.*: Anyagok őrlhetősége és az őrlhetőség mérőszám, Építőanyag, 1974/12, pp. 449-455.
- [76] *Karra, V. K.*: Simulation of the Bond grindability test, CIM Bulletin, 3/1981, pp. 195-200.
- [77] *Tarján, I.*: Keverés (Szemcsés anyagok és folyadékok keverése), Miskolci Egyetemi kiadó, 2003
- [78] *Csóke, B., Bokányi, L., Böhm, J., Pethő, Sz.*: Selective grindability of lignites and their application for producing an advanced fuel, Applied Energy, 74/2003, pp.359-368.

Az értekezés témakörében megjelent kutatási jelentés

- [79] Ércbányászati meddőhányók hasznosításának komplex eljárástechnikai vizsgálata
OTKA T 022028 beszámoló jelentés, 2001

Az értekezés témakörében megjelent saját, teljes terjedelmű publikációk

- [1] *Mannheim, V.*: A finom őrlés eljárástechnikai jellemzői keverőmalomokban, BKL-Bányászat, 132. évfolyam, 6. szám, 1999, pp. 471-478.
- [2] *Mannheim, V.*: Talajmodell fizikai terhelésére vonatkozó összehasonlító vizsgálatok rezgő- és keverőmalomban, Doktorandusz Fórum Egyetemi Kiadványa, Miskolci Egyetem, 1998, pp. 21-26.
- [3] *Mannheim, V.*: Nedves őrlés keverőmalomban, Doktorandusz Fórum Egyetemi Kiadványa, Miskolci Egyetem, 1999, pp. 42-48.
- [4] *Mannheim, V.*: *Csóke, B.*: Mahlung von Erzbergehaldenkörnern zum Aufschliessen mineralischer Komponenten in Rührwerkskugelmühlen, 7. Deutsch-ungarisches Seminar für Verfahrenstechnik, szemináriumi kiadvány, TU Berlin, 2000, pp. 19-28.
- [5] *Mannheim, V.*: Physikalischer Aufschluss von Erzbergehaldenkörnern in Rührwerksmühlen, Doktorandusz Fórum Egyetemi Kiadványa, Miskolci Egyetem, 2000, pp. 50-56.

-
- [6] *Mannheim, V.:* Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten in Rührwerks- und Schwingmühlen, Egyetemi Közlemények Kiadványa, (54. kötet), Miskolci Egyetem (megjelenés alatt).
- [7] *Mannheim, V.:* Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten, „MicroCAD 2001” Tudományos Konferencia Kiadványa, Miskolci Egyetem, 2001. pp. 83-88.
- [8] *Mannheim, V.; Csőke, B.:* Physikalischer Aufschluss von Erzberghaldekörnern in Rührwerks- und Schwingmühlen 8. Magyar-német Eljárás technikai Szeminárium, szemináriumi kiadvány, Miskolci Egyetem, 2001. július 10. (megjelenés alatt).
- [9] *Mannheim, V., Csőke, B.:* Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten in Rührwerks- und Schwingmühlen, „Universitaria Ropet 2001” Tudományos Konferencia Kiadványa, Petrosani, 2001, pp. 123-126.