

MISKOLCI EGYETEM  
MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KAR



ÉRCBÁNYÁSZATI MEDDŐ-KOMPONENSEK FIZIKAI FELTÁRÁSÁNAK  
KUTATÁSA NEDVES ŐRLÉSSEL

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

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

TUDOMÁNYOS VEZETŐ:

**PROF. DR. CSÓKE BARNABÁS**

A MŰSZAKI TUDOMÁNY KANDIDÁTUSA

EGYETEMI TANÁR

MISKOLC, 2004

## 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Magyarországon a több mint százéves ércbányászati tevékenység jelentős mennyiségű meddőanyag keletkezésével járt. E meddőanyagok a föld felszínén hányókban, iszaptavakban (lerakókban) nyertek elhelyezést. A lerakók potenciális környezeti szennyezőforrások és értékes földterületeket foglalnak el. Más oldalról viszont a hányók anyagának fémtartalma esetenként jelentős értéket képvisel, a nemfémes komponensek pedig építőipari célra rendszerint jól hasznosíthatók. Jellemző példa erre a Gyöngyösorszi bányarégió, ahol több mint 10 Mt nehézfém-tartalmú meddőhányó található. 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 az innen 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. 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. adhéziós, kapilláris, kémiai erők, szilárd kristályhidak, kristályrács átkapcsolódás révén - kapcsolódnak egymáshoz és az eredeti alapanyaghoz. A primer ásványi komponensek fizikai feltárása örléssel valósítható meg. A másodlagos komponensek részben fizikai úton nyírás (dörzsolés, koptatás) igénybevételével, részben kémiai eljárással (lúgzással) tárhatók fel.

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:

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 kitűnik, 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.

## 2. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

### 2.1. Az őrlés folyamata, őrlhetőség

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

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 szilárd test finomőrlése során nemcsak az anyag diszperzításfoka, hanem kristályszerkezete is változik, azaz az őrleményben mechanokémiai átalakulások mennek végbe.

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 őrlemények előállítása esetén önmagában meghatározza a szükséges őrlőberendezés típusát és az őrlési technológiát. Az aggregáció, illetve agglomeráció az őrlőtestek által közvetített energia túladagolásának, az általuk a szemcsékre gyakorolt „összenyomó hatásának”, valamint a szemcsék lokális felmelegedésének következménye.

A finomőrléssel előállított termékek tulajdonságait az elsődleges és a másodlagos folyamatok sebessége és mértéke határozza meg. Miután az őrléssel, illetve a mechanikai aktiválással 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.

Az ércek előkészítésénél az aprítás elsődleges feladata a feltárás: az anyagalmazban eredetileg egymással összenöve található ásványegyedek megszüntetése, azok egymástól való szabaddá tétele. Megfelelő mérvű feltárás ugyanis előfeltétele a szorosan vett előkészítésnek: az ásványok valamilyen fizikai sajátosságuk alapján különböző termékekbe való szétválasztásának (TARJÁN).

Az anyagalmaz feltárt szemeiben csupán egyetlen ásványfajta van jelen, két vagy több ásvány van az összenőtt szemekben. 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 ásványmennyiség viszonya az összenőtt és feltárt szemekben 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. Ha az egymással összenőtt ásványok szilárdsága erősen eltér, vagy a közöttük lévő kapcsolat lényegesen gyengébb, mint a szemek saját kohéziója, a széttörés leginkább az érintkezés mentén fog bekövetkezni. A finomabbra aprítás fokozatosan tökéletesebb feltárásra vezet.

## 2.2. Keverő-, és rezgő golyósmalmok

Az első keverő-golyósmalom kialakítása 1928-ban KLEIN és SZEGVÁRI tervei alapján történt. Az általuk megalkotott ún. „lassújárású keverő-golyósmalom” alapját egy vertikális hengeres őrlőtér jelentette, amelyben keverőelemként egy centrálisan kialakított üreges keverőtengelyre szerelt keverőtárcsék 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 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 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.

A napjainkban alkalmazott gyorsjárású *keverő-golyósmalmok* elődjétől a keverő beépítési módjában, az őrlőtér és kihordás kialakításában különböznek. Különlegesen finom (ultrafinom) őrlésre megfelelő tárcsás keverőmalmok, amelyekben a malomba helyezett őrlőtestek mozgatását 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. Keverő-golyósmalmokat elsősorban festék- és kerámiai anyagok finomőrléséhez, valamint az élelmiszer-, gyógyszer- és alapanyagiparban alkalmaznak. Alkalmazásuk mechanikai sejtfeltáráshoz a biotechnológiában, illetve nagykoncentrációjú szén-víz és szén-olaj szuszpenziók gyártásánál is elterjedt.

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 40-80 %. A malmok üzemelhetnek folytonosan és szakaszosan, vagy osztályozóval zárt vagy nyitott folyamatban, továbbá száraz vagy nedves üzemmódban.

Mivel a meddőanyagban a komponensek egymással finoman összenöve fordulnak elő, ezért a meddő-komponensek fizikai feltárása mindenképpen különlegesen finom őrlést igényel. Az igen finom őrlémények előállítására a hagyományos golyósmalom energetikailag nem hatásos, működését a törés nélküli szemcsesúrlódás, kinetikus és potenciális energiaveszteségek, felmelegedés, erős zajhatás és alacsony energetikai hatásfok jellemzi. A gazdasági szempontokat is figyelembe véve megemlítendő, hogy a keverő-golyósmalmok beruházási költsége körülbelül feleannyi, mint a hagyományos golyósmalmoké.

Ahhoz, hogy a keverőmalomban történő hatásos, kutatási célnak megfelelő őrlést kísérleti úton is bizonyíthassam, 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.

A *rezgőmalmok* őrlőtestekkel és az őrlendő anyaggal töltött, rugókon nyugvó tartálya függőleges síkban kis sugáron és nagy rezgésszámmal körpályán rezeg. A tartály rezgése az őrlőtesteket is függőleges síkban mozgatja, amelynek következtében a kis röppályákon mozgó őrlőtestek között levő őrlendő anyag igen nagyszámú, kis energiájú ütéset 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 rezgőmalomokban 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 ütőmunkája a statisztikus rezonancia helyein maximumot ér el, s e maximumok között zéróra csökken. A legnagyobb aprítási, illetve aktiválási hatás nagy (7-10 mm és ennél nagyobb) amplitúdóval érhető el. Ilyen esetben a dob fordulatszámának szintén megfelelően nagyoknak kell lennie, hogy a folyamatos őrlés esetén az anyag áthaladását a malmon keresztül biztosítsa. Folyamatos üzennél 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.

### 2.3. Modellezés és kisminta vizsgálatok elmélete

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 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 matematikai 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.

A törés folyamatának mechanisztikus (fenomenológiai) modellbe való foglalásának gondolata EPSTEINTŐL (1948) származik. A gépi aprítás jellemezése 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 szemcseeloszlása jellemez; továbbá a géptől és a szemcsemérettől függő **S** törési valószínűség; ez utóbbi függvényt valószínűségi vagy szelekciós függvénynek (kinetikus modelleknél törési sebességi) neveznek. BRAODBENT és CALLCOTT (1959) az **y** méretű szemcsék töretének

szemcseeloszlását  $B(x,y)$  formában adják meg (ahol  $x$  a szemcseméret). A fenti modell a szemcséknek az aprítógépekben való eltérő mozgásának figyelembevételével vált teljessé 1964-ben CALLCOTT és LYNCH munkássága alapján, 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.

Az empirikus függvények alkalmazásáról, meghatározásának módjáról, kevés irodalmi forrást találunk TARJÁN munkáiban számos aprítógépre karakterisztikus töret-görbék (a töret maximális szemcseméretére, vagy a résméretre vonatkoztatott relatív szemcseméret függvényében) ad meg. Az empirikus függvények azonban sem az anyagtól, sem pedig a gép üzemmódjától nem lehetnek függetlenek. Az őrlés leírása egy részfeladatként fordult elő annak a teljes technológiai folyamatnak az optimalizálásakor, amelyről CSŐKE ÉS KUTATÓTÁRSAI számoltak be, akik egy kőbánya során a robbantási és törési technológia együttes optimalizálását oldották meg számítógépes szimuláció segítségével.

Az empirikus törési függvények meghatározásakor abból a munkahipotézisből 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 paraméterei 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 mérésrel meghatározhassuk és a teljes technológiai folyamatot kellő pontossággal leírhatjuk (számítógépi algoritmussal szimulálhassuk) és optimalizálhassuk.

Az empirikus modellek megalkotásakor a feladat tehát a töret szemcseeloszlását megfelelő pontossággal leíró függvény kiválasztása, továbbá e függvény-paraméterei és a gépi fizikai paraméterek közötti kapcsolat feltárása.

*A kisminták tanulmányozása, a kismintavizsgálati módszerek alkalmazása* a műszaki tudományok területén nagymértékben elterjedt. Gyors és nagymértékű elterjedésének oka a felvetődő feladatok számának növekedése, alkalmazásának célszerűsége és gazdaságossága. Célszerű alkalmazásuk és lehetőségeik kihasználása elméletük, ill. alkalmazási területük ismerete nélkül nem képzelhető el. 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 alaplémértékegységek számát.

### 3. AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK, KÍSÉRLETEK MÓDSZEREI

#### 3.1. 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. A gyöngyöSOROSZI meddőhányó morfológiájának feltérképezése és a technológiai rétegek kijelölését követően, a fúrási háló megtervezése és a mintavételező fúrások elvégzése történt. A mintavételezés egy kézi működtetésű hidromotoros fúróberendezés segítségével történt, amely berendezést a Miskolci Egyetem Eljárástechnikai Tanszékének laboratóriumában egy OTKA kutatás keretében 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 meghatározása EDAX energiadiszperzív mikroszondával és számítással történt.

Az eljárás technikai 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 vizsgálata fény-, és elektronmikroszkóppal történt. 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 és a Berliini Műszaki Egyetem Elektronmikroszkópi Központjában (ZELMI).

A mintaanyag fajlagos felületét Griffin-készülékkel mértem meg.

A mintaanyag apríthatóságát, őrlhetőségét Bond és Hardgrove módszerrel határoztam meg. 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 (mészke, pumicit, andezit) őrlhetőségi vizsgálatát is elvégeztem, ami igazolta az azonos őrlési viselkedésüket a keverő-golyósmalomban.



A mintaanyagból képzett, és az őrlésre került szuszpenzió dinamikai viszkozitásának meghatározása rotációs viszkoziméterrel történt. A keverő-golyósmalom teljesítményszükségletét nyomatéktávadó segítségével mértem meg.

### 3.2. Eredmények kiértékelésére 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 szemcsesajátságok jellemzése laboratóriumi, táblázatos és grafikus meghatározással is megtörtént.

A Brookfield RVDV típusú rotációs viszkoziméterrel történt 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 tehesünk 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

$$P = f(n, c_m, \varphi_m, dk, dg, \dots)$$

összefüggés létezik, de konkrét matematikai alakja nem ismert.

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

## 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- I. Az anyagoknak keverő-golyósmalomban történő örölhetőségének 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 örölhetőségének jellemzésére.
  - I.2. Eljárást dolgoztam ki az örölhetőségnek laboratóriumi keverőmalomban őrlési kísérlettel történő megállapítására, mérve a  $P_{m0}$ ,  $P_m$  üresjáratú és a terhelés alatt felvett teljesítményeket, 20 percig tartó őrléssel, előírt körülmények között.

I.3. Bizonyítottam, hogy a medián ( $x_{50}$ ) - fajlagos munka ( $W_f$ ):

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

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 örölhetőséget 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 kevermalom 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 függvénye:

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

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

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

IV.1. A dimenzióanalízis módszerét alkalmazva:

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

összefüggés feltételezésével invariáns csoportokból álló összefüggést vezettem le:

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

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

A keverőmalomra jellemző viszonyokra a:

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

összefüggés érvényes.

Az egyes összefüggések jelölései:

$P_m$  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],

$c_m$  a szilárd anyag tömegkoncentrációja [-],

$\varphi_m$  malom töltési foka [-],

$d_g$  az őrlőgolyók átmérője [m],

$\rho$  a szuszpenzió sűrűsége [kg/m<sup>3</sup>],

$\mu$  a szuszpenzió dinamikai viszkozitása [Pas] és

$g$  a nehézségi gyorsulás [m/s<sup>2</sup>].

IV.2. Megállapítottam, hogy a keverőmalom turbulens tartományban dolgozik.

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 tér-fogategységre 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  $A$  és  $\rho$  értékek azonosak, akkor a fenti egyenlet egyszerűsítve:

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

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

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

## 5. AZ EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSA, TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

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.

Egyik kutatási irányvonal az empirikus modell pontosítása, azon belül az őrleményt leíró méreteloszlás függvényt leíró összefüggés más feladási szemcseméretre és más típusú keverőmalmokra történő általánosítása, valamint a komponensek méreteloszlásának leírására.

További lehetőség a scale-up továbbfejlesztése oly módon, hogy az általánosan felhasználható legyen a keverőmalmok ipari méretekben történő kialakításánál és fejlesztésénél (paraméterek meghatározása).

Néhány évvel ezelőtt kiadott kutatási eredmények 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 rezgő funkció aprítási eredményre gyakorolt hatása lenne vizsgálható. Ez természetesen a jövőre vonatkozóan egy újabb őrlőberendezés kialakítását követeli meg.

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 jó lehetőséget biztosít a keverőmalom működésének értékelésére, és a nedves őrlés szemléltetésére.

## 6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK

*Teljes terjedelmű közlemények:*

- [P1] **Mannheim, V.:** *A finom őrlés eljárástechnikai jellemzői keverőmalmokban, BKL-Bányászat, 132. évfolyam, 6. szám, 1999, pp. 471-478.*
- [P2] **Mannheim, V.:** *Talajmodell fizikai terhelésére vonatkozó összehasonlító vizsgálatok rezgő-és keverőmalomban, Doktorandusz Fórum Egyetemi Kiadványa, Miskolci Egyetem, 1998, pp. 21-26.*
- [P3] **Mannheim, V.:** *Nedves őrlés keverőmalomban, Doktorandusz Fórum Egyetemi Kiadványa, Miskolci Egyetem, 1999, pp. 42-48.*
- [P4] **Mannheim, V.; Csőke, B.:** *Mahlung von Erzbergehaldekörnern zum Aufschliessen mineralischer Komponenten in Rührwerkskugelmühlen, 7. Deutsch-ungarisches Seminar für Verfahrenstechnik, szemináriumi kiadvány, TU Berlin, 2000, pp. 19-28.*
- [P5] **Mannheim, V.:** *Physikalischer Aufschluss von Erzbergehaldekörnern in Rührwerksmühlen, Doktorandusz Fórum Egyetemi Kiadványa, Miskolci Egyetem, 2000, pp. 50-56.*
- [P6] **Mannheim, V.:** *Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten in Rührwerks- und Schwingmühlen, Egyetemi Közlemények Kiadványa, (54. kötet), Miskolci Egyetem (megjelenés alatt).*
- [P7] **Mannheim, V.:** *Nassmahlung zum physikalischen Aufschluss mineralischer Komponenten, „MicroCAD 2001” Tudományos Konferencia Kiadványa, Miskolci Egyetem, 2001. pp. 83-88.*
- [P8] **Mannheim, V.; Csőke, B.:** *Physikalischer Aufschluss von Erzbergehaldekörnern in Rührwerks- und Schwingmühlen 8. Magyar-német Eljárástechnikai Szeminárium, szemináriumi kiadvány, Miskolci Egyetem, 2001. július 10. (megjelenés alatt).*
- [P9] **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.*