



**VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK FEJLESZTÉSE FINOM SZEMCSEMÉRETŰ
ANYAGOK ŐRÖLHETŐSÉGÉNEK, VALAMINT KÜLÖNLEGES
KÖRÜLMÉNYEK MELLETT TÖRTÉNŐ ŐRLÉS
ENERGIASZÜKSÉGLETÉNEK MEGHATÁROZÁSÁRA**

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Mucsi Gábor

okl. előkészítéstechnikai mérnök

Tudományos témavezető:

Prof. Dr. habil. Csőke Barnabás

egyetemi tanár

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola alapítója: Dr. h.c. mult. Dr. Kovács Ferenc

egyetemi tanár, akadémikus

A doktori iskola vezetője: Dr. Lakatos István

egyetemi tanár, MTA levelező tagja

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	4
1. BEVEZETÉS	6
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS: A TUDOMÁNY ÉS TECHNIKA MAI ÁLLÁSA	9
2.1. TÖRÉSMECHANIKAI ALAPOK.....	9
2.1.1. <i>Anyagok alakváltozási és törési viselkedése</i>	<i>9</i>
2.1.2. <i>Fizikai töréselmélet és repedésmodellek.....</i>	<i>10</i>
2.2. APRÍTÁSI MUNKATÖRVÉNYEK	15
2.2.1. <i>Rittinger-féle „felületi elmélet”</i>	<i>17</i>
2.2.2. <i>Kick-Kirpicsev „térfogati elmélete”</i>	<i>17</i>
2.2.3. <i>Bond-féle „harmadik elmélet”</i>	<i>18</i>
2.2.4. <i>További munkatörvények.....</i>	<i>20</i>
2.3. ŐRÖLHETŐSÉGI VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK	22
2.3.1. <i>Hardgrove-módszer.....</i>	<i>25</i>
2.3.2. <i>Zeisel-módszer.....</i>	<i>26</i>
2.3.3. <i>A Bond-féle vizsgálat.....</i>	<i>27</i>
2.3.4. <i>További vizsgálatok.....</i>	<i>32</i>
2.3.5. <i>Mérőszámok közötti kapcsolat</i>	<i>35</i>
2.3.6. <i>Lúgos közegű Hardgrove-malmi vizsgálatok</i>	<i>37</i>
2.4. A DOBMALMOK	39
2.4.1. <i>Dobmalmok működése és üzemjellemzői.....</i>	<i>39</i>
2.4.2. <i>Golyósmalmok méretezése</i>	<i>44</i>
3. VIZSGÁLATI ÉS ÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK	49
4. BOND- ÉS HARDGROVE-FÉLE ŐRÖLHETŐSÉG VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK	
ILL. BERENDEZÉSEK TOVÁBBFEJLESZTÉSE NAGYHŐMÉRSÉKLETŰ LÚGOS	
ŐRLÉSRE.....	51
4.1. CÉLKITŰZÉSEK ÉS VIZSGÁLATI ANYAGOK	51
4.2. BOND-FÉLE VIZSGÁLATI ELJÁRÁS ÉS MALOM TOVÁBBFEJLESZTÉSE	56
4.3. HARDGROVE-MÓDSZER ÉS MALOM TOVÁBBFEJLESZTÉSE NAGYHŐMÉRSÉKLETŰ	
VIZSGÁLATOKRA	60

4.4. NAGYHŐMÉRSÉKLETŰ BOND- ÉS HARDGROVE ŐRLHETŐSÉGI KÍSÉRLETI VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI	67
5. KÜLÖNBÖZŐ TÍPUSÚ BAUXITOK ŐRLHETŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA	71
5.1. BAUXITOK ŐRLHETŐSÉGÉNEK HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉSE	71
5.2. ÉGETETT- ÉS OLTOTT MÉSZ BAUXITOK ŐRLHETŐSÉGÉRE GYAKOROLT HATÁSA	74
6. ŐRLHETŐSÉGI VIZSGÁLATOK TOVÁBBFEJLESZTÉSE AZ ŐRLÉSRE FORDÍTOTT MUNKA KÖZVETLEN MÓDON TÖRTÉNŐ MÉRÉSÉVEL	79
6.1. A BOND-MALOM, VALAMINT MÉRÉSI- ÉS KIÉRTÉKELÉSI ELJÁRÁS TOVÁBBFEJLESZTÉSE	80
6.2. A HARDGROVE-FÉLE ELJÁRÁS ÉS MALOM ŐRLÉSI MUNKA MÉRÉSÉRE TÖRTENŐ ÁTALAKÍTÁSA.....	84
6.3. HAGYOMÁNYOS ÉS ENERGIAMÉRÉSEN ALAPULÓ MÉRÉSI EREDMÉNYEK ÖSSZEVETÉSE...	87
6.4. KÖRFOLYAMATOS ENERGIAMÉRÉSEN ALAPULÓ ŐRLHETŐSÉGI VIZSGÁLATI ELJÁRÁS KIFEJLESZTÉSE	93
7. A KÖZVETLEN ENERGIAMÉRÉSEN ALAPULÓ ŐRLHETŐSÉGI VIZSGÁLATI ELJÁRÁSOK GYAKORLATI ALKALMAZÁSA	97
7.1. NAGY FINOMSÁGÚ ŐRLEMÉNYEK ŐRLHETŐSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA.....	97
7.1.1. <i>Timföld őrlhetősége</i>	99
7.1.2. <i>Erőműi pernye őrlhetősége</i>	104
7.2. KEVERÉKEK ŐRLHETŐSÉGÉNEK VIZSGÁLATA	108
8. ÖSSZEFOGLALÁS	116
9. SUMMARY.....	119
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	122
AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE.....	123
IRODALOMJEGYZÉK.....	125
MELLÉKLET	132

Jelölések jegyzéke

Latin szimbólumok:

a	repedéshosszúság, m
c_B	Bond-féle őrlhetőségi állandó (Bond-index), kWh t ⁻¹
c_K	Kick-féle őrlhetőségi állandó, kWh t ⁻¹
c_R	Rittinger-féle őrlhetőségi állandó, kWh t ⁻¹
c_m	tömegkoncentráció, m/m %
d	rácsállandó, m
D	golyósmalom átmérője, m
e	malomfordulatszám kritikus fordulatszámhoz való viszonya, %
E	Young-modulus, Pa
g	gravitációs gyorsulás, 9,81 m s ⁻²
G	őrlhetőség, g ford ⁻¹
°H (HGI)	Hardrove Grindability Index (Hardgrove Őrlhetőségi mutató), -
k	korrekciós tényező, -
L	golyósmalom hossza, m
M(t)	mért nyomaték (golyókkal és anyaggal töltött malom esetében), Nm
M_0	üresjárat nyomaték, Nm
m	őrölt mintaanyag tömege, g
m_{74}	<74 μm őrlemény tömege, g
n	fordulatszám, min ⁻¹
n	egyenletességi tényező, -
x	szemcseméret, m
x_{50}	medián, m
x_{80}	80 %-os szemcseméret, m

$x_{\max}$	maximális szemcseméret, m
$P_{\text{mért}}$	motor mért elektromos teljesítménye, W
$Q_{\text{mért}}$	malom mért feldolgozó képessége, t h ⁻¹
r	aprítási fok, m m ⁻¹
S	fajlagos felület, m ² g ⁻¹
T	hőmérséklet, °C
v	variációs tényező, -
W_e	rugalmas alakváltozási energia, J
$W_{i,B}$	Bond-munkaindex, kWh t ⁻¹
$W_{i,B,\text{ind}}$	ipari Bond-munkaindex, kWh t ⁻¹
$W_{i,B}^H$	Hardgrove indexből számított Bond-munkaindex, kWh t ⁻¹
W_f	fajlagos őrlési munka, kWh t ⁻¹

Görög szimbólumok:

ε	relatív megnyúlás, %
γ	felületi energia, J
η	hatásfok, %
φ	malom-töltési fok, %
λ	hullámhossz, m
ρ	anyagsűrűség, kg m ⁻³
σ	törési szilárdság, MPa
τ	őrlési idő, s.

1. Bevezetés

Az őrlés az aprítás finom termékeket előállító fokozata, amellyel $< 0,5$ mm, leggyakrabban < 100 μm szemcséket állítunk elő, rendszerint > 5 mm-es szemcsékből. E műveletnek igen fontos szerepe van az ipar és a mezőgazdaság számos területén, úgymint az érc- és ásványbányászat, a vegyipar, a gyógyszeripar, a cementipar és az ásvány-feldolgozóipar, élelmiszeripar és állati eledelgyártás, valamint biomassza- és a hulladékfeldolgozás területén is.

Az aprítás, az őrlés – különösen a finom őrlés – nagyon energiaigényes folyamat, mely irodalmi adatok szerint a fejlett országok teljes energiafelhasználásnak 3-5 %-át teszi ki [5, 87]. Éppen ezért az őrlés fajlagos energiaszükségletének meghatározásának igen nagy gyakorlati jelentősége van.

Az őrlésre kerülő anyagok jellemzése szempontjából igen fontos azok mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállása, ill. őrlhetősége. Ez a jellemző ugyanis nagymértékben befolyásolja a malmok működését, az őrlési folyamatok hatékonyságát, az őrlés energiaráfordítását stb. Az anyagok őrlhetőségének ismeretén alapul a malmok méretezése, fajlagos őrlési energiaigényének meghatározása.

Az őrlhetőséget rendszerint az egységnyi tömegű vagy térfogatú anyag őrlésére fordított munkával jellemzik, melyet a megfelelő berendezésben, pontosan előírt körülmények között határoznak meg. A malmok méretezéséhez ezen túlmenően ismerni kell azok – méretükkel összefüggő – munkavégző képességét. Az őrlendő anyag őrlhetőségéből és őrlendő mennyiségéből meghatározott őrlési munkának egyenlőnek kell lenni a malmok munkavégző képességével. Ezen egyenlőség alapján meghatározható a malmok mérete.

A malmok méretezésénél azonban számos probléma vetődik fel, amelyek egy része az őrlendő anyag őrlhetőségének meghatározásával van összefüggésben. Az őrlhetőség jellemzésére ugyanis jelenleg különböző őrlhetőségi mérőszámokat – Bond-féle „munkaindex” (W_i), Hardgrove-index (HGI), Zeisel-féle „fajlagos őrlhetőség” (W_t) – használnak. Az őrlhetőségi vizsgálatokat egyszerűsített körülmények között, speciálisan kialakított malmokban, előírt feladási szemcseméretű anyaggal, előírt őrlési finomsággal, szobahőmérsékleten, szárazon végzik.

Az ipari gyakorlatban azonban gyakran találkozunk olyan esetekkel, amelyek a fenti vizsgálati körülményektől alapvetően eltérnek. Így például, gyakran őrlnek nedvesen, lúgban vagy savas közegben, s nem ritkán nagy hőmérsékleten (pl. bauxitok őrlése a timföldgyártásban, ércék őrlése a hidrometallurgiában).

Manapság gyakori feladat a finom-, ill. ultra finomőrlés (nanoőrlés), amikor egy finom ($< 50 \dots 200 \mu\text{m}$) anyagot őrlnek tovább néhány mikrométeres vagy nanométeres szemcseméretre. Ezen feladatok teljesítésére a jelenlegi, ill. hagyományos őrlhetőségi vizsgálati eljárások (Bond-, Hardgrove-, Zeisel-féle) közvetlenül nem alkalmasak, mivel ezen előírások szerinti vizsgálati minta maximális feladási szemcsemérete ($0,5 \dots 3 \text{ mm}$) nagyobb, mint a vizsgálandó mintáé.

A fentiekkel összefüggésben munkám fő célkitűzése az ismert őrlhetőségi eljárások, nevezetesen a Bond és Hardgrove-eljárások továbbfejlesztése azzal a kettős céllal, hogy az új vizsgálati eljárások alkalmasak legyenek:

- egyrészt az eddigi előírt feltételektől eltérő különleges őrlési körülmények között (nedves, lúgos vagy savas közegben való, őrlés $20 \dots 200^\circ \text{C}$ hőmérsékleten, változó – tetszőleges- feladási szemcseméret) végezhető őrlhetőségi vizsgálat végrehajtására,
- másrészt a mérésből származó adatokból meghatározható legyen olyan őrlhetőség mérőszám, amely alkalmas az anyag az adott körülmények közötti őrlhetőségének megbízható jellemzésére.

Az anyagok őrlési és őrlhetőségi vizsgálatának a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében (korábbi nevén Eljárástechnikai Tanszék) hagyománya van: Tarján Gusztáv professzor a golyósmalmokban végbemenő folyamatokkal, az őrlőtestek mozgásával [4, 13], Pethő Szilveszter professzor főként aprítás és osztályozás modellezésével, számítógépes folyamatirányítás kérdésével [17, 20]. Csőke Barnabás professzor a törés és az őrlés matematikai modellezésével, a malmok méretezésével, az őrlhetőségi vizsgálatával foglalkozott [5, 20, 49]. E nagy hagyományokra visszatekintő kutatómunkába kapcsolódtam be 2002-ben a fenti kérdéskör vizsgálatára doktoranduszként.

Az aprítás területén működő magyar tudományos iskolák közül, a Miskolci Egyetem mellett külön kiemelendő a SZIKKTI, a CEMKUT és a Veszprémi Egyetem, ahol Beke Béla

professzor és Opoczky Ludmilla professzorasszony, valamint Juhász A. Zoltán professzor, továbbá Verdes Sándor nemzetközileg elismert szakemberek dolgoznak, dolgoztak. A kutatási vizsgálataim során az ismert külföldi publikációk mellett nagymértékben támaszkodtam a hazai kutatók munkásságára is.

A kutatómunkám első szakaszában a berendezések továbbfejlesztése volt a fő feladat. Közreműködtem a Hardgrove-malom átalakításban, a Bond-malom átalakítása a közvetlen szakmai irányításom mellett történt. Mind a két malmot fűthetővé alakítottuk át, és elláttuk a villamos teljesítmény, ill. az őrléshez felhasznált munka mérésére alkalmas mérőeszközökkel. Kiemelt feladatom volt mind a két esetben a malmokkal végrehajtandó megfelelő mérési eljárás és az őrlést követő kiértékelési módszer továbbfejlesztése, továbbá fenti két mérési eljárás összehasonlító vizsgálata, a közöttük (a mérőszámaik között) lévő kapcsolat megteremtése.

A kutatómunkám egyik fontos célkitűzése volt, hogy a továbbfejlesztett Hardgrove-malmi mérési eljárás alkalmas legyen az üzemekben olyan rutinszerű, gyors őrlhetőségi vizsgálat elvégzésére, amely például az érc (ahol az ércelőkészítőműre feladott nyersérc őrlhetősége gyakran változik), a kompozitcementek (ahol komponensei őrlhetőségét kell ismernünk) őrlésénél a folyamatszabályozás érdekében különösen fontos.

A kutatómunkám során különböző anyagokat vontam be a vizsgálatba. Modell anyagként bauxitot, mészkövet, zúzott kavicsot, bazaltot, zeolitot valamint timföldet használtam, és a különböző szemcseméretű feladatokkal elvégzett nagyszámú méréssel igazoltam a kialakított berendezés és vizsgálati, ill. kiértékelési eljárások alkalmazhatóságát.

A kidolgozott vizsgálati és mérési eljárást számos esetben alkalmaztuk az ipari kutatási feladatok megoldása során is. E mérésekből kiemelem a bauxitokat (lúgos, nagyhőmérsékletű őrlés), timföldrőket, cementkomponenseket (mészkövet, klinkert, gipszet, granulált kohósalakot), amelyek őrlhetőségi vizsgálatát rendszerint a hagyományos módszerek szerint el sem lehetett volna végezni.

2. Szakirodalmi áttekintés: a tudomány és technika mai állása

Az ásványelőkészítőművek működési költségének legjelentősebb hányadát az energiafogyasztás teszi ki, amelynek megközelítőleg 2/3 része az aprítási folyamatokból származik [2].

A következőkben a munkámhoz kapcsolódó aprításelméleti alapokat ismertetem, úgymint törésmechanikai alapok, aprítási munkatörvények, örlhetőségi vizsgálatok, továbbá a dobmalomok működését és gyakorlati jelentőségét mutatom be.

2.1. Törésmechanikai alapok

2.1.1. Anyagok alakváltozási és törési viselkedése

A szilárd testeket önálló térfogat és alak jellemzi, ezek megváltozásával szemben ellenállást fejtenek ki. Tehát ha alak vagy térfogatváltozást szeretnénk végrehajtani rajtuk, akkor erőt kell kifejtenünk, azaz munkát kell végeznünk. Az aprítógépekben fellépő erőhatásokat 3 fő csoportba sorolhatjuk: 1) két szilárd felület közötti, 2) egy szilárd felületen és 3) szilárd felülettel való érintkezés nélkül.

Az egyes esetekben az igénybevételek a következők lehetnek:

- 1) nyomás, ütés, nyírás, vágás, dörzsölés,
- 2) ütközés,
- 3) szemcse valamely közegben való mozgása létesíti az igénybevételt, vagy az ultrahang, hő.

Két felület közötti törésnél a kemény szemcsék a törőfelületekbe benyomódnak. E benyomódás relatív mélysége, a szemnagyság csökkenésével nő. Bizonyos szemnagyság alatt a szemcse teljesen beágyazódik a két felületbe, ekkor a közölt energia nagy része a törőfelületek plasztikus deformációjára fordítódik. Ha sok finom szemcse ($< 5 \mu\text{m}$) van jelen, ezek a felületekhez tapadva több réteg vastagságú bevonatot képezhetnek. Ebben az esetben a szemcsék igénybevételét az e rétegen át közölt erőhatások határozzák meg. Az energia jelentős része súrlódási hőként jelentkezik [4].

A szilárd testek alakja terheléskor (igénybevétel hatására) megváltozik, de az alakváltozással szemben ellenállást fejtenek ki. A terhelés és az alakváltozás kapcsolatát σ - ε fajlagos terhelés relatív alakváltozási diagram szemlélteti. E szerint a szilárd anyagok alakváltozási viselkedésük alapján lehetnek lineárisan és nem lineárisan rugalmasak, rugalmas-képlékenyek és képlékenyek. Az alakváltozás végül is a testek tönkremeneteléhez vezet, azaz a terhelés egy meghatározott értékénél (σ_t -törési szilárdságnál) a testek makroszkopikusan szétválnak, eltörnek. A töréshez szükséges munka a következő módon számítható:

$$W_t = \frac{1}{2E} \sigma_t^2 \quad (2.1.)$$

$$W_t = \int_0^{\varepsilon_t} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (2.2.)$$

ahol E a Young-modulus és ε pedig a relatív megnyúlás.

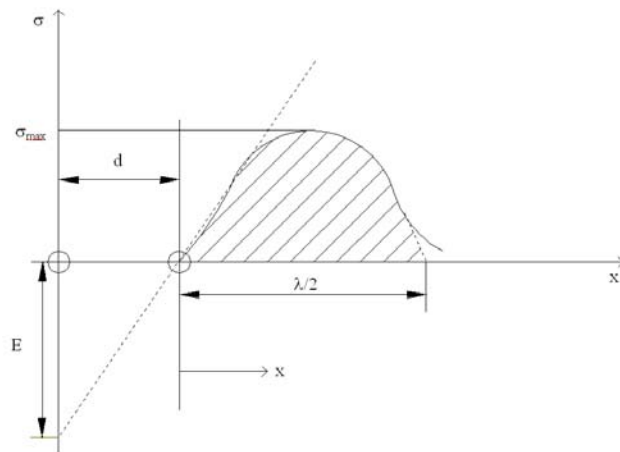
Lényegében két fő töréstípust különböztetünk meg: rideg- és szívóstörést. A ridegtörést csak kismértékű rugalmas alakváltozás előzi meg, ilyen anyagok pl. az üvegek, kerámiák és közetek (nyomószilárdságuk nagyobb, mint húzószilárdságuk). A szívóstörést, pedig a törési hely környezetének makroszkopikus képlékeny alakváltozása előzi meg. Ilyen viselkedést mutatnak pl. a fémek, amorf műanyagok és a nedves agyag [5].

2.1.2. Fizikai törésmélet és repedésmodellek

A *törésmechanika* abból indul ki, hogy a repedések terjedését egységes törési okoknak kell tekinteni. A *szilárdság* – definíció szerint - az anyag, ill. szerkezet ellenállása az irreverzibilis alakváltozással és repedésterjedéssel szemben.

Törésen a szilárd test makroszkópos értelemben végbemenő szétválását értjük, ami teherbíró-képességének megszűnéséhez vezet. A törés fizikai oka az, hogy az atomos ill. molekuláris kötések külső terhelés és/vagy belső mechanikai feszültségek következtében, továbbá az őket körülvevő közeg hatására felbomlanak, és ezáltal szabad felület és energia keletkezik. Minden anyaghoz a kötési erőktől függően egy σ_{th} - *elméleti törési feszültség* tartozik.

Ennek származtatása a 2.1. ábrán látható.



2.1. ábra: *Atomos feszültség –elmozdulás diagram [5]*

Ahhoz, hogy a rács valamely atomsíkja d egyensúlyi helyzetéből x távolságban elmozduljon

$$\sigma = \sigma_{\max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \approx \sigma_{\max} \frac{2\pi x}{\lambda} \quad (2.3.)$$

feszültség szükséges [5].

A Hooke-törvény alapján:

$$\sigma = E \frac{x}{d} \quad (2.4.)$$

ahol d a rácsállandó és E a rugalmassági modulus. Mindezekből $\sigma_{\max}$ a következő módon fejezhető ki:

$$\sigma_{\max} = \frac{E\lambda}{2\pi d} \quad (2.5.)$$

Az atomok között levő kötések megbontásához szükséges munka [5]:

$$\int_{x=0}^{\lambda/2} \sigma_{\max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \frac{\sigma_{\max} \lambda}{\pi} = 2\gamma_0 \quad (2.6.)$$

ahol γ_0 a fajlagos vagy valódi felületi energiát jelenti. A 2.5. és 2.6. egyenletek alapján az elméleti molekuláris szakítószilárdság a következőképpen határozható meg:

$$\sigma_{th} = \sigma_{max} = \left(\frac{E\gamma_0}{d} \right)^{1/2} \quad (2.7.)$$

Az elméleti törési feszültség határait az atomos kötési erők alapján a következő módon lehet becsülni [5]:

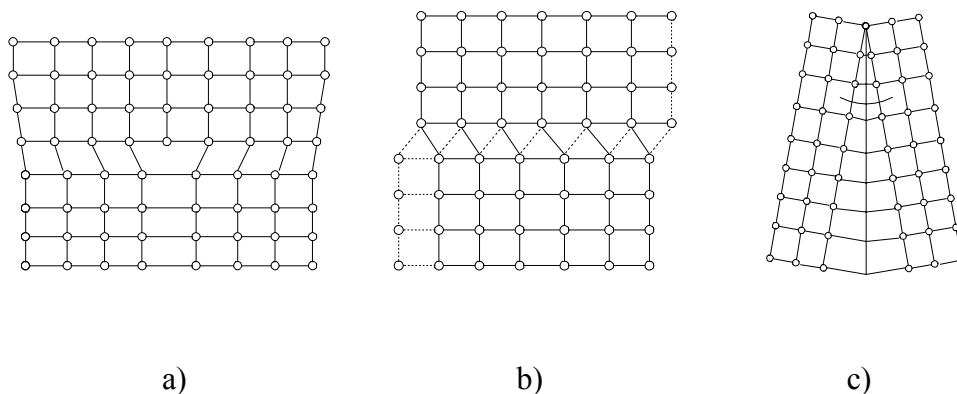
$$\frac{E}{5} > \sigma_{th} > \frac{E}{15} \quad (2.8.)$$

Ez a közelítés elvileg minden szilárd testre érvényes. A valódi szilárd testek törési feszültsége ezzel szemben több nagyságrenddel kisebb, mint a fenti elméleti értékek, aminek az oka az, hogy a reális testekben repedések, hibahelyek vannak, amelynek következtében a feszültség nem egyenletesen oszlik el, hanem a repedések vagy az anyag repedésszerű inhomogenitásainak csúcsában mindössze néhány atomos kötésre koncentrálódik [1]. Ha a megnövekedett feszültség eléri a molekuláris szakítószilárdságot, akkor a repedés kibővül, elegendő energia fedezet esetén a testben végighaladva a test eltörik.

Ha a kristályra nem hat külső erő, „d” az a normál távolság (2.1. ábra), amelyen két szomszédos atom között egyensúlyi helyzet alakul ki. E távolságban az atomoknak minimális potenciális energiája van, az atomok a potenciálvölgy alján vannak. Valamennyi atom hőmozgást végez (nagy frekvenciájú rezgőmozgást) egyensúlyi helyzete körül. A hőmérséklet növelésével nő a rezgés amplitúdója és energiája: nő a potenciálvölgy elhagyásának valószínűsége, a rácselemek közti szabályos kapcsolatok megszűnnek, erősen megnő a hibahelyek száma és megfelelően magas hőmérsékleten a kristályszerkezet összeomlik végül az anyag megfolyik [13].

A diszlokációk keletkezése és mozgása, vagyis egy képlékeny tartomány kialakulása folytán a repedéseknél keletkező feszültségcsúcsok ismét leépülhetnek, ezért a γ_0 fajlagos felületi energiát egy lényegesen nagyobb, γ_{eff} tényleges felületi energiával kell helyettesíteni.

Kristályos szerkezetű anyagokban bizonyos akadályok mentén (fázis-, vagy szemcsehatár, zárvány) a diszlokáció-torlódás olyan nagy feszültségkoncentrációt idézhet elő, amely a kötések megszakadását és transzkristallin hasadási törést okoz.



2.2. ábra: Diszlokáció típusok sematikus ábrája: a) vonalmenti-,
b) csavar- és c) felületi diszlokáció [15]

A törési tartomány mérete rideg anyagokban néhány atom távolságának nagyságrendjébe esik, szívós törés esetében viszont nagysága a zárványok mentén keletkező üregek méretétől függ.

A repedés terjedése során – a törési tartomány jelentős képlékeny alakváltozásán és a mikrorepedések képződésén kívül – más energiaátalakulási (energiadisszipációs) folyamatok is aktiválódhatnak, úgymint hőtermelés, hangemissziók, feszültség okozta fázisátalakulások, valamint a belső feszültségi állapot megváltozása.

Az egyes folyamatok lefutását a hőmérséklet erősen befolyásolja. Különösen fontos a szerepe a csúszással kapcsolatban a kristályos anyagok hibahelyeinek mozgztatásában van. Nagyobb hőmérsékleten ugyanis kisebb csúsztató feszültségek is kellő mérvű csúszást okoznak. A hőmérséklet növelése bizonyos hőmérséklethatárig a ridegtörésnek, azontúl a makroszkópikus deformációnak kedvez. A hőmérséklet befolyásával ellentétes az anyagra ható igénybevétel sebességének a befolyása: növekvő sebesség úgy hat, mint a hőmérséklet csökkenése (lassú nyomásnál plasztikus anyagok hirtelen ütésre „rideg” anyagként viselkedhetnek) [13].

Repedésmodellek

Griffith (1920) írta le először a repedést tartalmazó testek törési viselkedését egységes elmélet formájában, amely csak rendkívül rideg, ún. ideális anyagokra érvényes. Az elmélete szerint egy repedés mindig akkor terjed, ha a repedésterjedés során felszabaduló W_e rugalmas alakváltozási energia (amely a külső terhelés hatására akumulálódott a testben) nagyobb vagy egyenlő, mint a repedési felületek létrehozásával megjelenő új W_0 felületi energia [1].

A repedésterjedés kritériuma tehát [6]:

$$G = \frac{dW_e}{da} \geq \frac{dW_0}{da} = R \quad (2.9.)$$

Ennek alapján a σ_c kritikus feszültség és az a_c kritikus repedéshosszúság:

$$\sigma_c = \left[\frac{2E\gamma_0}{\pi a} \right]^{1/2} \quad (2.10.)$$

$$a_c = \frac{2E\gamma_0}{\pi\sigma^2} \quad (2.11.)$$

1948-ban az *Irwin-féle energiahipotézis* szerint a törés során felszabaduló rugalmas alakváltozási energiát G -vel jelöli, és azt tekinti törési kritériumnak, amikor az elér egy anyagtól függő kritikus G_C értéket. Figyelembe vette a repedés csúcsában létrejövő képlékeny tartományt, ennek sugarát a repedés fiktív meghosszabbításaként értelmezi. Majd 1957-ben Irwin a repedés környezetében levő feszültségmező jellemzésére bevezette a *feszültségintenzitási tényezőt* [1].

A *Dugdale-féle* repedésmodell, pedig akkor is érvényes, ha a képlékeny alakváltozás a repedéscsúcs előtt nagyobb területre terjed ki. Eszerint a húzással terhelt valóságos repedés folytatásának egy keskeny, képlékeny alakváltozott anyagrészt kell tekinteni [5].

2.2. Aprítási munkatörvények

Az ún. aprítási munkatörvények a gépi aprítás munkaszükségletének az elért szemcsenagyságtól való függését fejezik ki egyszerű képlet alakjában [13]:

Az őrlendő anyag diszperzitásfoka és a berendezés aprításra fordított energiája közötti összefüggések megállapításával az ún. aprításelméletek foglalkoznak. Azonban az őrlési folyamat bonyolultsága miatt a probléma a mai napig sem teljesen megoldott, annak ellenére sem, hogy napjainkig Juhász és Opoczky szerint [15] több mint 1600 munkatörvény született különböző szerzők tollából.

A fizikai aprítási munka több részből tevődik össze [15]:

- rugalmas alakváltozás munkája, melynek nagy része kinetikus energiává majd hővé alakul,
- felületi energia növelésére fordított munka,
- friss törési felület struktúraváltozása,
- szívós anyagok makroplasztikus deformálódása, amelynek jó része szintén hővé alakul.

A bevezetett energia, azaz a gépi aprítási munka 10...100-szorosa a fizikai aprítási munkának. Az ebben szerepet játszó tényezők az aprítógép *belső súrlódása* (golyók, szemcsék és fal egymás között) és *külső súrlódása* (csapágy, hajtómű és fogaskerék súrlódási vesztesége) [17].

Beke az „őrlési hatásosság” növelésének mechanikai lehetőségeit elemzi [38]. Először tisztázza az aprítás hatásfoka körüli kérdéseket, amit Ő maga inkább „hatásosságnak” említ, mivel előbbi definíciót inkább erőgépekre alkalmazhatjuk.

Stairmand munkájában 1977-ben az aprítógépre jellemző hatásfoknak az egyedi aprítás és a gépi tömeges aprítás energiahányadosát adja meg. Számításai alapján különböző aprítógép fajtákra a 2.1. táblázatban feltüntetett hatásfok értékek adódtak [3].

Aprítógép	Hatásfok, η [%]
Hengeres törő	70...100
Röpítő törő	25...40
Kalapácsos törő	17...25
Görgős malom	7...15
Golyós malom	6...9
Keverőmalom	2...6
Sugármalom	1...2

2.1. táblázat: *Különböző aprítógépek aprítási hatásfok értékei Stairmand szerint [3]*

Merici 1978-ban adott áttekintő képet az egyes módszerek energetikai összehasonlításáról [60]. Minden törést megelőzi a test rugalmassági határig való megfeszítése, majd a törés után a test részei leterhelődnek és a törés során nem hasznosult rugalmassági munka hővé alakul. Dörzsöléses őrlésnél viszont nincs teljes megfeszítés a test teljes tömegében, így energetikailag előnyös módszer. Hátránya azonban a folyamat lassúsága. Energetikailag a lassú nyomás a legkedvezőbb, ám a nyomóerő növelése bizonyos határon túl az aprószemcsék aggregációját vagy agglomerációját okozza.

A legkézenfekvőbb őrlési energia-szemcseméret kapcsolatot befolyásoló tényezők a következők lehetnek Hukki és Reddy szerint [7]:

- Az anyag homogenitása vagy heterogenitása.
- Az anyag szerkezetében rejlő vagy létrehozott hibák.
- Anyagszerkezeti tulajdonságok.
- Anyag sűrűsége.
- Az őrlőberendezés tulajdonságai.
- A fajlagos felület növekedésének meghatározásának problémája.
- Nyitott vagy zárt körfolyamatról van-e szó?
- Száraz vagy nedves őrlést végzünk-e?
- Finom rész flokkulációja vagy diszpergálódása a használt közegben.

A továbbiakban a legfontosabb és legnagyobb gyakorlati jelentőséggel bíró aprítási munkatörvényeket foglalom össze.

2.2.1. Rittinger-féle „felületi elmélet”

Az első aprítási munkatörvény a Rittinger (1867) nevéhez fűződő ún. felületelmélet. Ennek lényege az, hogy az aprításhoz szükséges W_R^* munka a keletkező A törési felülettel arányos:

$$W_R^* = c_R^* A = c_R x^2,$$

amelyből a fajlagos munka:

$$W_R = c_R \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{X} \right) \quad (2.12.)$$

Rittinger képletében (2.12.) az x és X az őrlemény és a feladás anyagalmazának fajlagos felületét meghatározó átlagos szemcseméretet jelenti, c_R a Rittinger-féle állandó, ami a fajlagos felületi energiával arányos és r pedig az aprítási fok.

A fent említett összefüggés főként a finomőrlés tartományában ($x < 50 \mu m$) alkalmazható eredményesen, ahol a nagy aprítási fok miatt a friss törési felület is nagy. Azonban a hibahelyek csökkenésével a fajlagos felületi energia a durvább fokozatokhoz képest nagyobb. Ez az elmélet azonban a rugalmas deformációs munkát nem veszi figyelembe [13]. A valóságos anyagok aprítása, pedig jelentős *deformációs munkát* is igényel.

2.2.2. Kick-Kirpicsev „térfogati elmélete”

A Rittinger munkáját követő jelentős eredményt Kirpicsev (1874) és Kick (1885) érte el, akik szerint a rideg anyagok törése a rugalmassági határ eléréséig szükséges igénybevétel hatására következik be, vagyis az energiaszükséglet az aprítandó test térfogatával arányos. Az aprítási munka a következőképpen számítható Kirpicsev és Kick szerint [13]:

$$W_K^* = c_K^* V = c_K x^3 \quad (2.13.)$$

amelyből a fajlagos munka:

$$W_K = c_K \left(\lg \frac{1}{x} - \lg \frac{1}{X} \right) \quad (2.14.)$$

ahol c_K a Kirpicsev-Kick-féle állandó, és x ill. X a térfogati átlag-szemcse nagyság. Az összefüggésből kitűnik, hogy a fajlagos törési munka nem szemcsemérettől, hanem az igénybevett térfogattól, és ebből következően az aprítási foktól függ. A térfogat-elmélet viszont csak a durva aprítás ($x > 50 \text{ mm}$) energiaszükségletének a meghatározásához alkalmazható megbízhatóan [4].

Rittinger a törési felületen a kohézió megszüntetéséhez szükséges munkát, Kick és Kirpicsev a törés előtti deformáció munkáját veszi figyelembe. Az egész aprítási munka valójában e két munkarészből tevődik össze.

2.2.3. Bond-féle „harmadik elmélet”

Az előbbieken bemutatott W_R^* és W_K^* mértani közepével számolva a Bond-képlethez (1952) jutunk:

$$W_B^* = 2\sqrt{W_R^* W_K^*} = 2\sqrt{c_R x^2 c_K x^3} = c_B x^{2,5} \quad (2.15.)$$

amelyből a fajlagos törési munka:

$$W_B = c_B \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad [\text{kWh t}^{-1}] \quad (2.16.)$$

ahol c_B a Bond-index, x_{80} és X_{80} a termék és a feladás 80 %-os szemcsemérete. Az aprítási munkaigény Bond szerint az aprításkor keletkező repedések hosszával arányos [13].

A Bond-index megmutatja, hogy egységnyi tömegű (térfogatú) ∞ szemcseméretű anyag $x_{80}=1 \text{ }\mu\text{m}$ -re történő őrléséhez mennyi energiára van szükség. Ennek meghatározása a termék finom szemcsemérete miatt nehézségekbe ütközne, ezért a mutatót a gyakorlatban használt $100 \text{ }\mu\text{m}$ -re való őrlésre határozzák meg, amit W_{iB} Bond-munkaindexnek nevezték el [20].

$$W_{iB} = \frac{c_B}{\sqrt{100}} \quad (2.17.)$$

$$c_B = 10W_{iB} \quad (2.18.)$$

$$W_B = W_{iB} \left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad (2.19.)$$

E három aprítási munkatörvény c_R , c_K és c_B Beke szerint (1975) állandója a következő módon számítható át [11]:

$$c_R = 0,5 c_B x_{B,a}^{0,5} \quad \text{ha } < 50 \mu\text{m} \quad (2.20.)$$

$$c_K = 1,15 c_B x_{B,f}^{-0,5} \quad \text{ha } > 50 \text{ mm} \quad (2.21.)$$

ahol $x_{B,a}$ a Bond érvényességi szemcseméret tartomány alsó határa és $x_{B,f}$ pedig ugyanezen tartomány felső határa.

A fajlagos aprítási munka leggyakrabban használatos mértékegységei a következők:

$$\text{Jkg}^{-1} = \text{m}^2 \text{s}^{-2} = 1/3600 \text{ kWh t}^{-1} \quad (2.22.)$$

A Kick-, Bond- és Rittinger-féle elméletek helytálló közelítést jelentenek egy relatíve szűk szemcseméret tartományra. A Bond-féle összefüggés a 50 μm ... 50 mm (szűkebben véve 0,1 ... 10 mm) aprítási szemcseméret intervallumban való alkalmazása bizonyult eredményesnek, ezért a legtöbb ipari számítás során megbízhatóan ezt az összefüggést használják, figyelembe véve a Bond által meghatározott őrlési körülményeket [6].

Hukki és Reddy [7] szerint az aprítási folyamat komplexitása miatt nem lehet a hasznos munka és szemcseméret közötti kapcsolatot egy függvénnyel sem leírni a teljes aprítási tartományra.

A Bond-féle képletben szereplő c_B értékében a különböző szemcsenagyságok mellett érdemleges eltérés mutatkozhat, annak jeléül, hogy az anyag aprítási ellenállása a különböző szemnagyságoknál eltérő [4].

Az aprítógép hajtásának P_m [kW] teljesítmény szükséglete a fentiek (Kick, Bond vagy Rittiger) szerint meghatározott W_f [kWh/t] fajlagos munka ismeretében és Q [t/h] aprítógép-kapacitás esetén: $P_m = Q W_f$.

Tarján G [13] hangsúlyozza, hogy a „munkatörvények” csak bizonyos szemcsehatárokon belül közelítőleg érvényesek. Nem lehet a törés komplikált fizikai jelenségeit egyszerű képletekkel tág szemcsenagysághatárookra is érvényesen kifejezni.

2.2.4. További munkatörvények

A klasszikusnak számító Bond-féle képlet hibája, hogy a szemcsehalmazt egyetlen mérettel jellemzi (x_{80}). Bizonyos előrelépést jelent a Charles, Holmes és Svenson-Murkes [12] által 1957-ben megadott képlet:

$$W = c \left(\frac{1}{x_2^{n_2}} - \frac{1}{x_1^{n_1}} \right) \quad (2.23.)$$

ahol W az energiaigény, x_1 a feladás és x_2 a termék átlagos szemcsemérete, n_1 és n_2 az egyenletességi tényezők és c pedig állandó. Hátránya az összefüggésnek, hogy agglomeráció esetén $n_2 < n_1$, a képletben W negatív értéket vesz fel [8].

A Rittinger-, Bond-, Kick Kirpicsev-féle munkatörvények mindegyike levezethető Charles [54]

$$dW = -C_c \frac{dx}{x^n} \quad (2.24.)$$

differentiálegyenletéből, ahol dW az x szemcseméret differentiális dx értékkel való csökkentéséhez szükséges differentiális energia, C és n állandók. Az n kitevő értéke Rittingernél 2, Bondnál 1,5, Kicknél 1 [83]. A valóságban azonban C és n értéke is folyamatosan változhat.

Beke (1963) az őrlést stochasztikus folyamatnak fogja fel, ezért az energiaigény számítására statisztikus módszert alkalmaz. Az energiaigény, ha nem is arányosan, de egyértelműen változik a fajlagos felülettel. Ugyanígy az eloszlás szórása, ha nem is arányosan, de szintén

egyértelműen változik a fajlagos felülettel. Mindezek miatt az energiaigény meghatározásához a szemcseeloszlás szórását is számításba veszi [8, 10].

Beke őrlési kísérletei szilikátipari nyersanyagokkal, főleg dobalmokban történtek. A szemcsenagyság eloszlások a Rosin – Rammler – függvényt követték. A függvény szórása:

$$s = a \sqrt{\frac{2}{n}! - 2 \left(\frac{1}{n}! \right) + 1} \quad (2.25.)$$

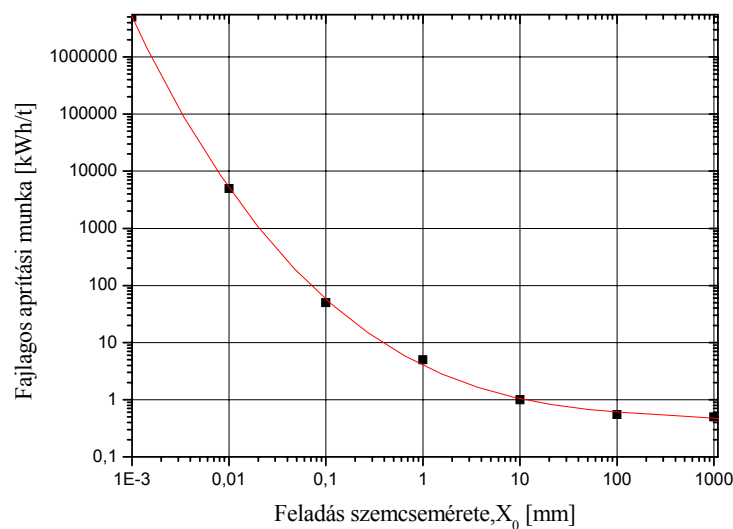
Beke relatív szórással analóg $v = s/a$ hányadost képezi, amit variációs tényezőnek nevez (n az egyenletességi tényező). Legyen az őrlemény variációs tényezője v , méretmodulusza a , a feladás ugyanezen jellemzői V és A . A szükséges energia nagysága:

$$W_{Be} = C_{Be} \left(\frac{v}{a} - \frac{V}{A} \right) \quad (2.26.)$$

A (2.26) képlet alkalmas az őrlés energiaigényének ellentmondásra nem vezető empirikus leírására.

A későbbiekben Rumpf, Patat, Steiner és Schönert [15, 72] is foglalkozott az aprítási munkatörvényekkel. Összefüggést kerestek az egyedi részecske törése következtében keletkezett őrlemény diszperzitásfoka és a mechanikai igénybevétel intenzitása ill. módja között. Az energiaigény növekedését azzal magyarázzák, hogy a részecskék méretének csökkenésével, nemcsak a hibahelyek száma csökken, hanem egyre nagyobb szerepet kap a plasztikus deformáció is.

Hukki és szerzőtársai [7] kvarc mintán végrehajtott őrlési vizsgálat eredményein keresztül bemutatják az energia-szemcseméret összefüggések korábbi és újabb változatait és bevezetnek egy új valószínűségi elméletet (fizikai és statisztikai modell) az energia-szemcseméret kapcsolatra. A száraz őrléssel elért minimális átlagos szemcseméret $2,7 \mu\text{m}$ volt, amit 2880 perc alatt 840 kWh/t munkabefektetéssel kaptak. Nedves őrlés esetében pedig $2,5 \mu\text{m}$ -t sikerült elérni 8640 perc őrlési idő alatt és 2250 kWh/t fajlagos őrlési munka mellett, a $2,6 \mu\text{m}$ -es eredményhez tartozó munkaszükséglet viszont csak 375 kWh/t volt.



2.3. ábra: Fajlagos aprítási munka változása konstans aprítási fok mellett az x_0 feladási szemcseméret függvényében (Hukki adatai alapján)

Az R.T. Hukki - féle *aprítási valószínűség elmélet* kifejtése során becslést kapunk az egyes aprítási lépcsők elméleti energiaigényére. Ez grafikusán ábrázolva a 2.3. ábrán látható.

2. 3. Őrlhetőségi vizsgálati eljárások

Az anyag őrlhetősége olyan mérőszám (anyagminőségi jellemző), mely azt mutatja, hogy mennyi energia szükséges ahhoz, hogy egy meghatározott kiindulási szemcseméret-összetételű, egységnyi tömegű anyagot laboratóriumi malomban egy meghatározott őrlési finomságra megőröljünk. Az őrlési eredményt általánosan a fajlagos felület vagy a diszperzitásfok növekedésével jellemzik [15]:

$$S = k W \quad (2.27.)$$

ahol S a képződő felület, W a felhasznált energia és k az arányossági tényező. Ez az arányosság nem fogadható el az őrlési folyamat egészére, mivel az új felület képzésére eső fajlagos energiaszükséglet a szemcseméret csökkenésével (hibahelyek számának csökkenésével) egyre növekszik, sőt bizonyos finomsági határon túl a további energiaközlés már felületcsökkenést is eredményezhet.

Felmerül a kérdés –mondja Beke, hogy az őrlhetőségi mérőszám mennyiben tekinthető anyagi jellemzőnek. Erre az a válasz - írja, hogy „az anyag őrlhetőségi tulajdonságai és az őrlési eljárás együttesen határozzák meg az ipari méretű őrlés fajlagos energiafogyasztását” [16]. Ez alapján olyan laboratóriumi vizsgálati módszer tekinthető legtökéletesebbnek, amely a vizsgálati körülmények és a kapott értéket tekintve legjobban megközelíti az üzemi gyakorlatot.

Mindemellett csak három őrlhetőségi vizsgálati eljárás terjedt el a gyakorlatban széles körben: a Bond, a Hardgrove és a Zeisel eljárás.

Anyagtulajdonságok és az őrlhetőség

Beke kísérletekkel bizonyította a keménység, szilárdság, rugalmasság és porozitás őrlhetőségre gyakorolt hatását és azt, hogy az *őrlhetőséget főleg a szövetszerkezet befolyásolja* [16, 38]. Nagyobb keménység nem jelent feltétlenül nagyobb őrlési energiaigényt. A kő Mohs-keménysége (2) kisebb, mint a mészkőé (3-3,5), de ez utóbbi mégis jobban őrlődik. Ez a kő egymásba szövődő, az őrlés kezdeti fázisában is széttörendő kristályaival magyarázza. Hasonlóképpen a bazalt és andezit őrlésénél a bazalt nagyobb fajlagos őrlési igényét a szövetszerkezetben lévő különbség magyarázza: a mikrociszolotban a bazaltnál egymásba szövődő kristályok, ezzel szemben az andezitnél az elcsúsztathatóságuk és szórt kristálméretük figyelhető meg.

Opoczky és Gábel 200 üzemi klinker-minta őrlhetőségét vizsgálva a klinker szövetszerkezete és őrlhetősége közötti összefüggést vizsgálva megállapították, hogy a klinkergyártás körülményei (égetés és hűtés) a klinker szövetszerkezetét alapvetően meghatározzák, ezzel összefüggésben változik az őrlhetőségük. A megfelelő égetés és intenzív hűtés mellett kapott porózus (üvegszerű köztes fázisú) klinkerek sok makro-, és mikrorepedést tartalmaznak könnyebben őrlhetők, mint az intenzíven égetett és rosszul hűtött tömör „repedésmentes” sok kristályos köztesfázist tartalmazó klinkerek [31]. A klinker szövetszerkezetét befolyásolja még a nyersliszt mésztelenítése, őrlésfinomsága és homogenitása, a tüzelőanyag fajtája valamint a mellék- és nyomelemek jelenléte, mennyisége [98].

Csóke és szerzőtársai [49] megállapították, hogy a timföld-szemcsék őrlhetősége, amelyek az egyedi kristályok aggregátumai, az őrlési finomsággal oly módon változik, hogy a Bond-index értékek az egyedi kristály-szemcseméretnél ugrásszerűen (3...4-szeresére) megnőnek, ekkor már az őrlés az egyedi kristályokon belüli kohéziós erőt győzi le.

További példaként említhető a jelenségre a lágy grafit esete is, amely kristállysíkjai közötti kötések jelentősen gyengébbek, mint az egyes síkokon jellemző kötőerők, így kis keménysége ellenére egy nehezen őrlhető anyag – Bond-munkaindex kb. 35 kWh/t. A keménységet a kémiai kötések befolyásolják, vagyis kovalens kötések tartalmazó kristályok keményebbek, mint az ionos kötéssel rendelkezők.

Az irodalom ezen részének feldolgozásából összefoglalóan megállapítható, hogy az őrlhetőség a szemcsetulajdonságokban bekövetkező változásokkal van összefüggésben. Az őrlés során a fellépő igénybevétel hatására megváltozik:

1. A szemcseméret.
2. A fajlagos felület.
3. A felületi energia.
4. A repedések és hibák száma a szemcsékben.
5. A kristályos állapot.
6. A hőmérséklet.
7. Valamint kémiai változások történnek.

Az alapfolyamat az alakváltozás és a törés, amelynek következtében bekövetkeznek a fenti változások. A törési sebesség az 1-4 jellemzők időbeli változása.

A többi folyamat a töréssel közvetlenül nem járó (rugalmas és maradandó) alakváltozással fellépő hőmérséklet-változással van összefüggésben (törési valószínűség).

E folyamatok nem csak anyagfüggők, hanem függenek az igénybevétel-közlés módjától (ütés, nyomás, dörzsölés, egyedi szemcse igénybevétele történik vagy szemcsehalmozé?)

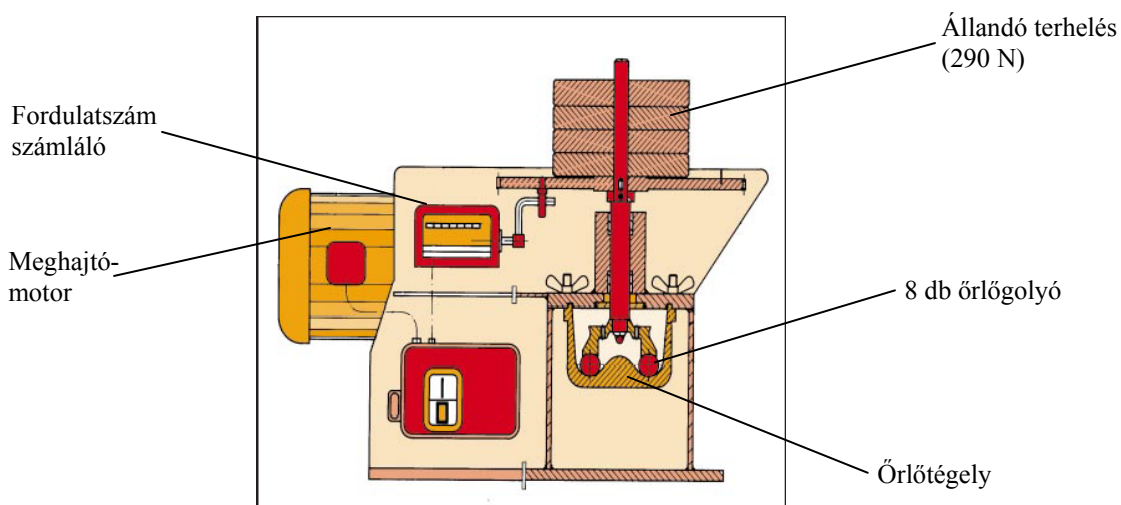
Továbbá ugyanannak a gépnek az üzemmódjától is függ, pl. hengeres törő esetében egyszerű hengerpárról, túltömött adagolásról beszélünk vagy termékágyas törésről.

Következésképpen nem lehet egy minden gépi törésre alkalmas törvényt felállítani, és nem lehet minden esetre alkalmas őrlhetőségi vizsgálati módszert használni.

Jelen esetben (tekintettel az őrlés során legelterjedtebben alkalmazott dobmalmokra, különösen a golyósmalmokra és gyűrűsmalmokra) e területen szélesebb körben alkalmazható őrlhetőségi eljárás kifejlesztésére törekedtem a bevezetésben megadott célkitűzéseknek megfelelően, a Bond- és a Hardgrove-eljárás továbbfejlesztésével.

2.3.1. Hardgrove-módszer

A „Babcock & Wilcox Ltd” angol vállalat neve alatt (Ralph Martin Hardgrove, amerikai feltaláló által) USA-ban 1931-ben bejegyzett és 1934-ben elfogadott szabadalom szerint az eljárás különböző rideg anyagok (érc, talkum, cement, stb...) – de legfőképpen szén – őrlhetőségének a meghatározására szolgál [35]. A szabadalom fő célja egy szabványos őrlhetőségi eljárás megalkotása, amely segítségével a különböző eredményeket összehasonlíthatjuk, továbbá egy olyan eljárás kifejlesztése, amely minimális számításokat igényel, ezáltal egyszerű és gyors.



2.4. ábra: Hardgrove malom vázlati rajza

A módszer a Rittinger-féle törvényen alapszik, azaz a Hardgrove mutató a $H = \frac{\Delta F}{F_0} 100$

képlettel meghatározható, ahol ΔF a fajlagos felületnövekedés és F_0 az etalonanyag őrlésekor nyert fajlagos felületnövekedés [cm^2/g]. Az etalon anyag egy USA-ból a St. Jerome bányából származó szén minta, amelynek fajlagos felület növekedése $565 \text{ cm}^2/\text{g}$. Az őrlőtérben 8 db $\varnothing$

1'' (25,4 mm) átmérőjű golyó 290 N terhelés mellett 60 fordulaton keresztül végzi az őrlést 20 min⁻¹ fordulatszám mellett.

Számos kísérlet alapján a Hardgrove-index számításánál a felületnövekedés figyelembevétele helyett empirikus képletet állapítottak meg, ami szerint:

$$HGI = 13 + 6,93m_{74} . \quad (2.28.)$$

ahol H a Hardgrove-szám és m_{74} pedig a <74 µm őrlemény tömege g-ban.

A feladott minta tömege 50 g, szemcseméret intervalluma pedig: $x=590...1190$ µm [9]. Az őrlés eredményét, azaz a finomodás mértékét szítalással állapítják meg. Az őrlés a gördülő golyók dörzsölő-nyomó hatására megy végbe. A Hardgrove módszer hátránya, hogy leginkább az őrlés durva fokozatára jellemző. Ipari méretű finomőrlés viszonyaira, csak abban az esetben lehet a H-számból következtetni, ha azonos berendezés és hasonló anyagra vonatkozóan sok gyakorlati adat áll rendelkezésre. Továbbá a dörzsölő igénybevétel nem egyezik meg pontosan az ipari golyósmalmokban durvatörésnél fellépő igénybevétellel. Előnye viszont, hogy gyors, egyszerű és nem igényel sok vizsgálati anyagot, valamint a módszer reprodukálhatósága kiváló. A Hardgrove módszer szerint mintánként két párhuzamos mérést kell végezni, amelyek relatív eltérése nem haladhatja meg a 2-3 %-ot [36]. A Hardgrove őrlhetőségi indexek (HGI) valójában nem lineáris mértékűek, pl. amíg egy 40 és 50 értékű szén őrlési kapacitása között óriási különbség van, addig a 90 és 100 közöttié szinte elhanyagolható [30].

A 2.28. képlet segítségével egy dimenzió nélküli mérőszámhoz jutunk, azonban a szakirodalom azt mutatja, hogy a legtöbb esetben lehetőségünk van a Hardgrove-szám Bond-munkaindexre való átszámítására. Ezzel a kérdéskörrel a 2.3.6. és a 2.3.7. fejezet foglalkozik részletesen.

2.3.2. Zeisel-módszer

Németországban (1953) a Hardgrove malom átalakításából nyert eszközt – a Zeisel malmot - alkalmazzák, ahol a ténylegesen a súlyegységenként képződő új felület munkaigényét az őrlemény finomságának függvényében vizsgálják. A mért eredmények jó egyezést mutattak az ipari energiaigénnyel [9].

A Zeisel vizsgálat szerint - ahol az őrlőtányért egy csapágyazott tengelyre helyezték, így azt az őrlési ellenállás elfordíthatja – egy körfolyamatos, többlépcsős őrlést kell elvégezni 25 g 0,75...1 mm szemcseméretű mintán. Az elfordulást dinamométer akadályozza meg. Nagyobb őrlési ellenállás nagyobb rugónyúlással jár. A rugónyúlást elektromosan mérik. Az őrlés 30 mp-ig tart, ami után az őrleményt egy 0,125 mm-es szitán osztályozzák. A durva részt friss feladással 25 g-ra kiegészítve feladják egy újabb őrlésre a malomba. Ezt addig folytatják, amíg a kumulált finom késztermék mennyisége megközelíti a 25 g-ot. Zeisel szerint az üzemi őrlés fajlagos energiaigénye a laboratóriumi mért fajlagos őrlési munka 3-szorosa [20, 88].

2.3.3. A Bond-féle vizsgálat

Bond szerint „A módszer az adatok egyezésén alapszik, nem fizikai jelenségeken (empirikus adatok)”.

A Bond-féle módszer szerint az aprítás teljes hasznos munkája fordítottan arányos a termékszemcsék átmérőjének négyzetgyökével [19, 22, 71]. Az üzemi viszonyokat legjobban megközelítő követelmények az alábbiak:

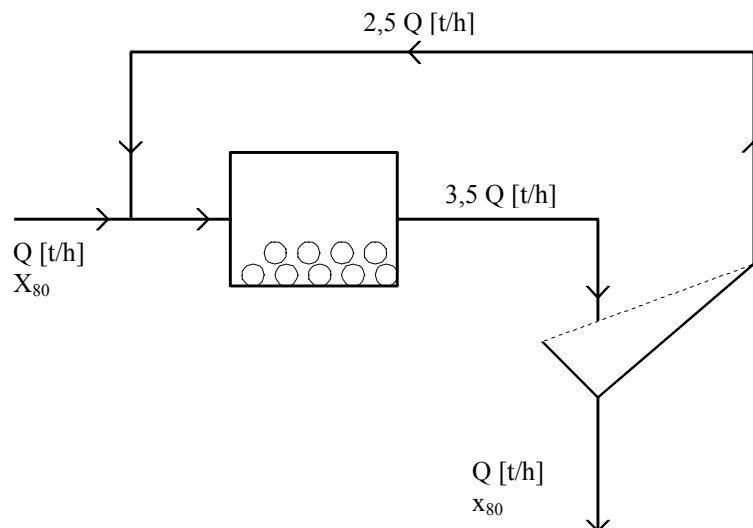
- állandó malomterhelés,
- körfolyamatos őrlés,
- természetes (osztályozatlan) feladás,
- alkalmazhatóság különféle őrlési finomságokhoz,
- malom stacioner állapota,
- reprodukálható eredmények.

Bond a száraz golyósmalom-minősítő vizsgálatokat nedves őrlésre vonatkozó adatokkal hozta összefüggésbe. A száraz őrlésre vonatkozó adatok a nedves őrlés adataiból $4/3$ -dal való szorzással kaphatók [9].

A Bond-féle ún. „harmadik aprításelmélet” szerint az üzemi fajlagos őrlési munka a 2.2.3. fejezetben ismertetett 2.16. és 2.19. képletekkel határozható meg.

Bond az őrlhetőségi mutató kidolgozásához több száz üzemi mérést végzett el. A laboratóriumi körülmények között egy $\varnothing 305 \times 305$ mm –es dobmalomban egy $\varnothing 2,44 \times 2,44$ m-

es ipari malomban elvégzett nedves őrlést modellez. A késztermék aránya a visszajáró durva anyag mennyiségéhez $1 / 2,5$ (2.5 ábra).



2.5. ábra: Bond-modell tömegáram arányai

A laboratóriumban elvégzett körfolyamatos őrlési kísérletből W_{iB} munkaindex a következő empirikus képlet segítségével határozható meg:

$$W_{iB} = \frac{4,9}{x_{\max}^{0,23} G^{0,82} \left(\frac{1}{\sqrt{x'_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X'_{80}}} \right)} \quad (2.29.)$$

ahol $x_{\max}$ a kész finom termék maximális szemcsemérete [μm] (általában $x_{\max}=100 \mu\text{m}$), X'_{80} és x'_{80} a feladás és az őrlemény 80 %-os szemcsemérete [μm], G az őrlhetőségi tényező [g/fordulat] a laboratóriumi malomban egy fordulat alatt képződő friss $x_{\max}$ alatti anyag mennyisége az egyensúlyi állapotban [5, 20, 32, 88].

A mérés lefolytatásához egy speciális (előírt méretű, fordulatszámú) laboratóriumi golyósmalmot – ún. Bond-malmot - használunk előírt körülmények között 70 1/min fordulatszám mellett ($e=0,91$) meghatározott méreteloszlású (2.2. táblázat) 20,125 kg tömegű golyótöltettel [20].

Átmérő [mm]	Mennyiség [db]	Tömeg [g]
40	43	9905
30	67	5780
25,4	10	750
19	71	2790
13,5	94	900
Σ	285	20125

2.2. táblázat: Hagyományos Bond-malom megfelelő golyóösszetétele

A malomba $0,7 \text{ dm}^3$ laza térfogatú, 3,36 (3,15) mm alá tört anyagot adunk fel. Ezt első lépcsőben 100-150 malomfordulatig őrljük, majd a $100 \mu\text{m}$ -tól finomabb részt kiszitáljuk és tömegét megmérjük. A durva részt friss feladással kiegészítjük az eredeti mennyiségre és újabb őrlésre a malomba helyezzük. Az őrlést az egyensúly beálltaig folytatjuk, azaz a G értékének az utolsó 3 lépcsőben konstansnak kell lennie. Az első lépcső után szükséges malomfordulatot a következő képlet segítségével kapjuk meg [18, 19, 22, 88]:

$$N_{i+1} = \frac{0,286m_t - m_{Mi}\Delta m(x < 100\mu\text{m})}{G_i} \quad (2.30)$$

A feladás és a termék 80 %-os szemcsemérete a szemcseméret-eloszlási adatokból határozható meg.

Mosher és Tague szerint a *Bond-eljárás előírásai* 3 csoportba sorolhatóak: *eszközök* (malom mérete, sebessége, őrlőtestek mennyisége) és *minta előkészítés, a teszt végrehajtása és az eredmények kiértékelése* [21]. Szerintük a legfontosabb tényező a G és az x_{80} értéke.

Yap és szerzőtársai munkájukban [23] ismertetik a hagyományos Bond őrlhetőségi vizsgálat lefolytatásának módját, kiemelve annak hátrányos elemeit. Ezek közül fontos a speciális Bond-malom megléte valamint min. 10 kg mintaanyag beszerzése, amelynek előkészítése is speciális berendezéseket igényel. Ezeken felül maga a vizsgálat is nagyon időigényes. Általában egy képzett technikus egész munkanapját (8-10 óra) teszi ki a mérés elvégzése. Természetesen egy malom tervezése érdekében célszerű a fent említett nehézségek ellenére is

elvégezni a körfolyamatos Bond-eljárást. Ha viszont napi üzemi ellenőrzésre használjuk fel a kapott őrlhetőségi mutatót, akkor kisebb mértékű hiba elfogadható a jelentős idővesztés elkerülése érdekében.

Fontos kritériumnak tartják továbbá a feladott anyag szemcseméret eloszlását, amelyen belül a finomrész arányának van nagy jelentősége. A gyakorlati eredmények azt igazolják, hogy a max. 15 %-os finomrész (előírt őrlési finomság: 63, 106, 150 μm) arány az ideális, ugyanis ettől nagyobb érték esetében a száraz szitálás okozta nehézségek (pl. eltömődés) miatt jelentősen megnövekedhet az állandósult állapot elérésére fordított idő (ciklusszám) [23].

Smith és Lee [25] 1968-ban, majd Tüzün [53] 2001-ben a szitaméret őrlhetőségre gyakorolt hatását vizsgálták. Megállapították, hogy a Bond-munkaindex növekszik a szitaméret csökkenésével. Ezzel szemben Magdanilovic [78] rézérc, andezit és mészkő mintákon elvégzett kísérletei szerint a G őrlhetőségi tényező csökken és így a Bond-munkaindex növekszik a szita méret 100 μm -ról 500 μm -re növekedésével. Eredményei szerint a Bond-munkaindex és a szitaméret között egyenes arányosság van, azaz nagyobb lyukbőséghez magasabb munkaindex érték tartozik.

Tüzün azt tapasztalta, hogy amikor az ellenőrző szitanyílás eléri az 53 μm -t, a munkaindex „elfogadhatatlanul” magas értéket vesz fel [53]. Mindez a száraz szitálás hibájából eredhet; úgymint folyóképesség lecsökken, szitarács eltömődik és a szitálási eredmények reprodukálhatósága leromlik. Mindezek különösen a lágyabb anyagoknál jelentkeznek, pl.: dolomit vagy mészkő. A hibák kiküszöbölésére Tüzün nedves őrlést követő nedves szitálást javasolt. A kísérleteit kvarc mintán egy hagyományos méretű, őrlőgolyó összetételű és fordulatszámú Bond-malomban végezte el.

A nedves golyósmalmok általában ~40 %-os térfogati szilárdanyag koncentráció mellett üzemelnek. Mivel az őrlés során a szuszpenzió viszkozitása a szemcsék aprózódásával növekszik a Tüzün által javasolt koncentráció 30 %. A száraz és nedves őrlési vizsgálatból származó adatok összefüggésbe hozhatóak a Bond által tapasztalat útján meghatározott 1,3 szorzó tényező alkalmazásával. Ugyanis Tüzün eredményei szerint is a nedves őrlés fajlagos energiaigénye általában kb. 1,3-szor kevesebb, mint a száraz őrlésé.

Általában az üzemi munkaindex ($W_{iB,ind}$) őrlő körfolyamatok hatékonyságának kiértékelésére szolgál [59]. Az üzemi adatokból származó munkaindexek összevethetőek a laboratóriumi őrlhetőségi vizsgálatok eredményeivel.

Az ipari gyakorlatban a W – munka (P teljesítmény és Q feldolgozóképeség hányadosa), x_{80} – termék szemcsemérete és X_{80} – feladás szemcsemérete mérésével a $W_{iB,ind}$ *üzemi Bond-munkaindex* meghatározható a következő összefüggéssel [57, 61]:

$$W_{iB,ind} = \frac{W}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right)} \quad (2.31.)$$

Bond azt feltételezte, hogy az általuk használt malmok fordulatonkénti energia szükséglete állandó (93 Ws/ford) marad. Levin 1989-ben [58] 71,2 Ws/ford átlagértékre becsüli ezt, és mérései szerint korántsem konstans. Bond a munkaindex számítására szolgáló képletben (üzemi mérésekkel kalibrálva a laboratóriumi malmot) figyelembe veszi fenti értéket.

Levin [58, 80] állítását később Daniel [77] bírálta; véleménye szerint Levin mérési eredményeinek szórása túl nagy. Utóbbi szerző energiaméréssel 91,4 Ws/ford értéket kapott a fordulatonkénti energiaszükségletre.

Az őrlési igénybevételek vonatkozásában a golyósmalmi módszerek (pl. Bond-féle módszer) esetében az ütés, dörzsölés és nyomás vesz részt az aprításban. A fordulatszám csökkentésével (katarakt őrlőtestmozgás helyett a kaszkádmozgás lesz jellemző), azaz a fordulatszám kritikus fordulatszámhoz való viszonyának ($e=n/n_{krit}$) 0,91 értékről való csökkenésekor ($e=0,55 \dots 0,65$ –re) azonban a durvaőrlésre jellemző ütő igénybevétel kisebb arányban fog szerepet játszani. Helyette a finomőrléshez szükséges dörzsölő (nyomó) igénybevétel fog dominálni. Szintén ez a két fő erőhatás a mérvadó a Hardgrove- és a Zeisel-malmok esetében is.

A golyós malmoknál a malombélésnek is nagy jelentősége van az őrlőhatás kialakulásában, ugyanis amíg a bordázott, átlapolt belső köpenyfelület a golyók megemeléseével az ütőhatást élénkíti, addig a sima bélésen történő őrlőtestek visszagurulásával a dörzsölés lesz jellemző.

2.3.4. További vizsgálatok

Az 1960-as évektől kezdődően számos kutató foglalkozott a korábban ismertetett őrlhetőségi vizsgálatok továbbfejlesztésével és egyszerűsítésével. A következőkben ezek közül ismertetek néhányat a teljesség igénye nélkül.

Berry és Bruce (1966) a munkaindex meghatározását egy ismeretlen és egy ismert Bond-munkaindexű anyag feladásának és termékének szemcseméret eloszlásának az összehasonlításával végezte el [24]. A 2000 g minta nedves őrlését hasonló körülmények között végezték el, meghatározott ideig. A munkaindexhez a következő összefüggést felhasználva jutottak:

$$W_{i, referencia} \left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right) = W_{i, ismeretlen_anyag} \left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad (2.32.)$$

A módszer lehetővé teszi az ismeretlen minta munkaindexének közelítő meghatározását a referencia minta hasonló mutatójának ismeretében. Szerzők kihangsúlyozzák, hogy a minta fizikai és reológiai tulajdonságaira nagy hangsúlyt kell fektetni a pontos őrlhetőség meghatározása érdekében. Például ha az őrléseket különböző szilárdanyag koncentráció mellett hajtjuk végre, akkor várhatóan más termék szemcseméret eloszláshoz jutunk.

Smith és Lee (1968) 8 minta őrlhetőségét határozták meg a hagyományos zárt körfolyamatú módszerrel különböző szitaméret felhasználása mellett, majd elvégezték az anyagok szakaszos malomban való őrlését és az eredményeket összevetették. A módszer gyakorlati alkalmazhatósága nem megfelelő [25].

Horst és Bassarear (1976) a Berry és Bruce féle összehasonlításon alapuló módszerhez hasonlít. A vizsgálat során 1000 g referencia és ismeretlen anyag őrlése történik meghatározott ideig azonos körülmények között. A munkaindexet a 2.29. képlet felhasználásával számítja ki. Előnyként megemlíthető, hogy nem igényel speciális malmot, képzett technikust, kevesebb mintaigényű és rövidebb idő alatt végrehajtható [26].

Levin [58, 80] finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségével foglalkozott. Szerinte a standard Bond-féle őrlhetőségi eljárás legnagyobb hátránya az, hogy a finom anyagok – úgymint előkészítőmű meddője vagy középterméke - vizsgálatára nem alkalmas.

Kapur (1970) és *Karra* (1981) algoritmus segítségével matematikai úton határozta meg a Bond-munkaindexet a hagyományos kísérlet első két őrlési lépcsője után [27, 28].

Ugyancsak a Bond-eljárás időtartamának lerövidítését teszi lehetővé matematikai úton a BOKCSŐ algoritmus [89], amely nagyobb pontossággal adja meg a Bond-munkaindexet, mint a korábban ismert hasonló algoritmusok.

A „*Quick Check*” [23] módszer egy empirikus vizsgálati módszer, amely során W_i a következőképpen számítható:

$$W_i = \frac{R}{G_{bp}^{0,82}} \quad (2.33.)$$

$$R = \frac{44,5}{P_1^{0,23}} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}} \right)^{-1} \quad (2.34.)$$

A P_1 - kívánt termék maximális szemcsemérete – Bond szerint a következők lehetnek: 114, 76, 50, 26,7 μm . A 76 μm -nél kisebb szita használata nem megbízható eredményhez vezet.

Yashima (1970) dimenzióanalízist javasolt a Bond-munkaindex számításához, amit a mintaanyag mechanikai tulajdonságainak (sűrűség, ridegségi index, szakítószilárdság, Young modulus, Poisson tényező) ismeretében lehet elvégezni [29].

Az *Anaconda-féle egyszerűsített módszer* [23] egy szakaszos őrlési vizsgálat, amely nem igényel referencia ércet. A módszer alapja a nedves körülmények között történő szakaszos „üzemi” munkaindex meghatározása, amely kapcsolatba hozható a hagyományos módon meghatározott munkaindexszel. Fontos, hogy a feladás szemcseméret-eloszlásai közel essenek egymáshoz. A minta előkészítése során 114 μm ...2 mm frakciót állítunk elő. A dobmalom mérete: $L=210$ mm és $D=251$ mm, az acél őrlőgolyók mérete 22,2 - 38,1 mm közöttiek. A fordulatszám 92 1/min volt, ami a kritikus fordulatszám 96 %-át jelenti. Az őrlés során 1000 g mintát aprít 50 m/m % szilárd anyag koncentráció mellett (tehát 1 dm³ víz hozzáadásával) 10 percig. Majd ezt követi a szitaelemzés a x_{80} és X_{80} értékeinek a meghatározásához. A munkaindex a következő módon fejezhető ki:

$$W_i = \frac{\alpha E}{10} \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right)^{-1} \quad (2.35.)$$

ahol α az arányossági tényező és E pedig a az őrlés alatt befektetett fajlagos energia (kWh/t).

A malom kalibrációs állandó $A = \frac{\alpha E}{10}$ képlettel számítható, ami esetükben 0,5031 kWh/t-ra adódott. Szerzők példákon keresztül bemutatják a módszer előnyeit, alkalmazhatóságát, amelynek pontossága 5 %-os határon belül van. A kísérleti eredmények reprodukálhatósága is jó, mivel az őrlés szabályozható feltételek mellett valósul meg. A vizsgálat 2-3 óra alatt elvégezhető.

Mrákovicsné (1983) további vizsgálati módszereket mutat be munkájában, úgymint a VTI, a Mittag és a Giprocement módszert és ismerteti ezek hiányosságait [32]. Ezen módszerek a berendezés méretében és kialakításában, erőhatás módjában, őrlendő anyag mennyiségében, szemcseszerkezetében és az értékelés módjában különböznek egymástól. *Reményi* [9] a fentiekén túl további laboratóriumi őrlhetőség meghatározó vizsgálatokat ismertet ezek általában porcelán dob-, vagy ventilátor malmot használnak, úgymint CKTI, PM-VTI, OR-VTI vagy VUK módszer, stb... Ezek kevésbé elterjedt eljárások, mint a korábban részletezettek.

Niitti [50] célja egy használható, gyors és egyszerű őrlhetőségi módszer kifejlesztése volt. Az energiafogyasztás méréséhez egy (érzékeny) inga kialakítású malom tengelyén történő nyomatókmérési módszert alkalmazott. A kísérleti eredményeire alapozva szerinte egy megbízható laboratóriumi őrlhetőségi vizsgálatához a következő alapvető feltételekre van szükség:

- A fix fordulatszámon alapuló vizsgálatok hibához vezethetnek, ugyanis a valós teljesítmény függ az anyag jellemzőitől, szemcseméretétől, a folyási- és a súrlódási tulajdonságaitól, ezért mérhető legyen az energiafogyasztás.
- Az ipari őrlési körülményeknek megfelelően elvégezhető legyen mind száraz, mind nedves körülmények között,
- Az iparban megkívánt őrlési finomság elérhető legyen,
- Az eljárásnak egyszerűnek és gyorsnak kell lennie.

Az eredmények kiértékelésével meghatározta a használt golyósmalom optimális üzemi paramétereit.

2.3.5. Mérészámok közötti kapcsolat

A Mrákovicsné által, öt különböző őrlhetőségi vizsgálat összehasonlítása alapján elvégzett matematikai – statisztikai elemzés kimutatta a közelítő kapcsolatokat az egyes módszerek között. Az őrlhetőségi mutatók nagy pontosságú ($\pm 4...7\%$) összefüggést adnak a Bond-Hardgrove értékekre vonatkozó *regressziós egyenleteket* felhasználva. Ennek magyarázata, hogy a kiinduló és végtermék szemnagysága közel azonos [32].

Opoczky és szerzőtársai (2000) által hat klinker mintára vonatkozó mérési adatokból kitűnik, hogy a Bond-munkaindexek jelentősen eltérnek a Zeisel-eljárással meghatározott fajlagos őrlési munka értékektől. Az eredményeik a 2.3. táblázatban találhatók [31].

Minta sorszáma	W_Z [kWh/t]	W_B [kWh/t]	Eltérés [%]
1.	40,1	19,2	108,9
2.	34,2	12,4	175,8
3.	40,0	17,3	131,2
4.	39,2	15,4	154,5
5.	44,7	15,5	188,4
6.	40,5	10,5	285,7

2.3. táblázat: Klinker minták Bond-munkaindexei és Zeisel-féle őrlhetőségi mutatói [31]

A Bond- és Hardgrove-féle őrlhetőségi mérőszámok közötti összefüggést sokan vizsgálták köztük McIntyre és Plitt [33] is, akik egy érvényes korrelációt állapítottak meg 11 különböző ásványmintán (ércek, gipsz, mészkő, szenek) elvégzett kísérletek alapján. A *Bond és Maxson* által 1943-ban bevezetett őrlhetőségi vizsgálatot [71] egy „nehézkés és unalmas” eljárásnak gondolják, aminek a „munkaideje akár a 20 órát is elérheti”, ami behatárolja az alkalmazhatóságát. Bár azzal egyetértenek, hogy a Bond-féle őrlhetőség hasznos az aprítógépek kiválasztásához és méretezéséhez.

Kísérleteik megindítója az volt - írták, hogy jelenleg nincs egy elfogadott módszer, amelynek segítségével a Hardgrove-féle vizsgálat adataiból következtetni lehetne a kívánt aprítási energiára.

Az 1954-ben, majd 1961-ben javított [37, 22] Bond által javasolt W_{iB} munkaindex és HGI közötti összefüggések a következők:

$$W_{iB} = \frac{88}{HGI^{0,5}} \quad (2.36.)$$

$$W_{iB} = \frac{435}{HGI^{0,91}} \quad (2.37.)$$

Fenti összefüggések alátámasztására azonban nem áll rendelkezésre kísérleti adat, továbbá W_{iB} nem kapcsolódik egy konkrét szitamérethez sem, nem úgy, mint a Bond-kísérlet esetében [33].

Lignit minta őrlhetőségének vizsgálata során tapasztalták Csőke és szerzőtársai [89], hogy a homogén szövetszerkezetű kísérőásványok esetében alkalmazható a 2.37. átszámítási képlet, a szálas heterogén anyagok esetében pedig nagy eltérés adódott az így kapott és a hagyományos módon meghatározott Bond-munkaindex között.

A szabványosított ASTM eljárással [36] a korábban említett 2.28. képlet használatával határozhatjuk meg a HGI-t. Ha ugyanazon szemet két különböző Hardgrove malomban vizsgálunk, nem feltétlenül ugyanahhoz az eredményhez jutunk. Ennek két oka lehet: 1) a hiba eredhet a mintaanyag kiválasztásának hibájából, azaz a mintavételezés hibájából, vagy a másik magyarázat szerint 2) nem létezik két teljesen egyforma Hardgrove-malom, amely ugyanazt az őrlési igénybevételt tudja produkálni. Ezek kiküszöbölése érdekében 1971-ben bevezették a minden malomhoz tartozó kalibrációs görbét (interpolációs HGI meghatározás) [36]. A jelen kor magas fokú technológiáján megvalósított fémforgácsolás (programozható CNC) azonban lehetővé teszi két teljesen egyforma őrlőtér kialakítását, amely megfelelő alapot szolgáltat az azonos igénybevételek kialakulásához.

McIntyre és Plitt (1980) által használt Preiser típusú Hardgrove-malom legkisebb négyzetek módszerével történő kalibrációja során kapott egyenlet a következő:

$$HGI = 6,97 W + 15,93 \quad (2.38.)$$

Szerzők által elvégzett Agus és Waters nevéhez fűződő térfogati Hardgrove módszer [34] még különböző sűrűségű anyagok esetében is pontos őrlhetőségi adatot szolgáltat ($V=36 \text{ cm}^3$). A következő egyenlet azonban csak a Presier típusú térfogati őrlhetőségi vizsgálathoz használható:

$$W_{iB} = \frac{87,5}{GI^{0,83}} \quad W_i > 8,5 \text{ esetben} \quad (2.39.)$$

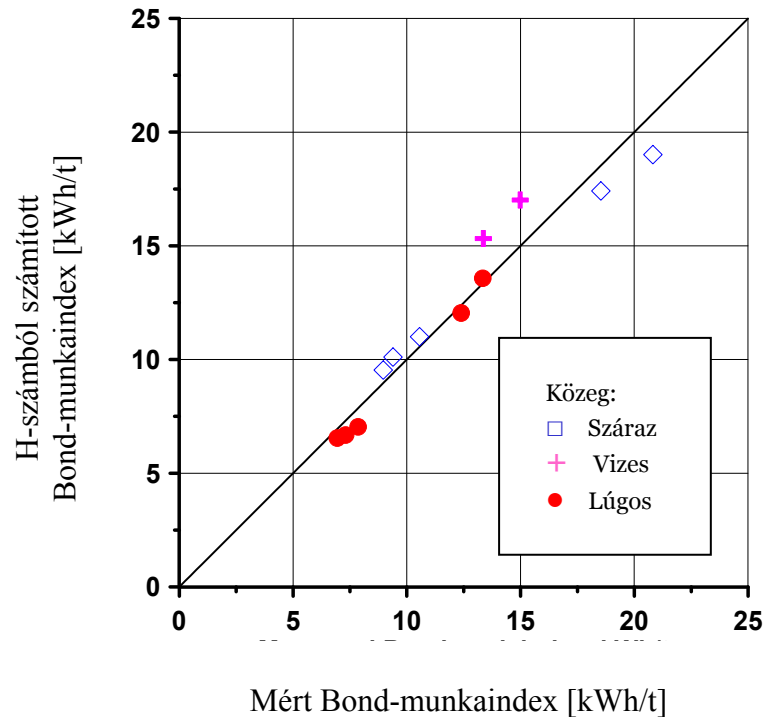
$$W_{iB} = \frac{1622}{HGI^{1,08}} \quad W_i > 8,5 \text{ esetben} \quad (2.40.)$$

Haese és szerzőtársai (1975) mészkő, márga és lösz mintaanyaggal elvégzett Hardgrove, Zeisel és Bond őrlhetőségi kísérletek eredményeit hasonlították össze - kWh/t mértékegységben kifejezve [52]. Végül arra a következtetésre jutottak, hogy a felsorolt módszerek közül egyik sem volt összhangban a másik kettővel.

A Hardgrove- és Zeisel-féle értékek közötti eltérés túl nagyra adódott. Ha figyelmen kívül hagyjuk az alacsony őrlhetőségű lösz mintát, akkor a többi minta egymáshoz képesti őrlhetőségei -23,8 % és +6,3 % közötti sávban változott. Ezzel szemben a *Hardgrove és Bond* eredményeinek összehasonlításakor már valamivel *csekélyebb különbség* mutatkozott (-13,1%...+5,6 %). Végül pedig a Zeisel és Bond kísérletek összevetéséből sem kapunk jobb eredményeket, mint a H-Z összehasonlításából (-18,2 %...14,0 %).

2.3.6. Lúgos közegű Hardgrove-malmi vizsgálatok

Csóke és szerzőtársai [39] a timföldgyártás során alkalmazott lúgos közegű őrlést szimulálták a szabványos Hardgrove malomban a módszer előírását szem előtt tartva ($m_{\text{feladás}}=50 \text{ g}$, $N=60$ fordulat, $x=590\ldots1190 \text{ }\mu\text{m}$) szobahőmérsékleten.



2.6. ábra: Mért és H-számból számított Bond-munkaindexek összevetése [39]

Szerzők a korábban Bond által bevezetett 2.37. képlet módosítását javasolják az adott körülményekre, ugyanis esetükben a 2.41. összefüggést alkalmazva kedvezőbb korreláció adódott a mért Bond-munkaindex és a HGI-ből számított Bond-munkaindex értékei között.

$$W_{iB} = \frac{468}{HGI^{0,82}} \quad (2.41.)$$

Ebből a megfontolásból a későbbiekben a saját kísérletek kiértékelése során is ez utóbbi képletet alkalmazom.

2.4. A dobmalomok

2.4.1. Dobmalom működése és üzemjellemzői

A száraz üzemű ásványelőkészítéskor legfőképpen gyűrűs- és golyós dobmalomokat alkalmaznak a finom szemcseméretű termékek nagy mennyiségben (akár 350 t/h - klinker malom) történő előállítására.

A közelmúltban megjelent munkák [74, 75, 76] szerint a 20-30 μm alatti terméket eredményező finomőrlés esetében a dob golyósmalmok nem hatékonyak és további problémát jelent az őrlőgolyók kopása, ami szennyezi az előállított terméket és ezáltal hatással lehet a további feldolgozó eljárások végkimenetelére is – legyen az lúgzás vagy flotálás.

A legújabb kutatások azonban azt igazolják, hogy fenti hátrányok leküzdhetőek és hatékony finomőrlés valósítható meg vízszintes tengelyű golyósmalomban is. Továbbá az energiafelhasználás csökkenthető és nagyobb kapacitás érhető el különösebb beruházás nélkül a finomőrlés területén is [70].

Amellett, hogy az ultrafinom őrlés ($<25 \mu\text{m}$) tartományában a keverőmalomok hatékonyabban üzemelnek a golyósmalmoknál, a keverőmalomok lehetséges malommérete és feldolgozóképesége is alacsonyabb mértékű ($<100 \text{ t/h}$). Továbbá az ultrafinom őrlés egy rettentően energiaigényes folyamat (akár több ezer kWh/t –t is elérheti), és nagyobb szükséges kapacitásnál a fajlagos termelési költségek (az üzem berendezéseinek vásárlása, telepítése és üzemeltetése) kedvezőbbek lehetnek egy nagyméretű golyósmalmot alkalmazva, mint több kisebb keverőmalom esetén.

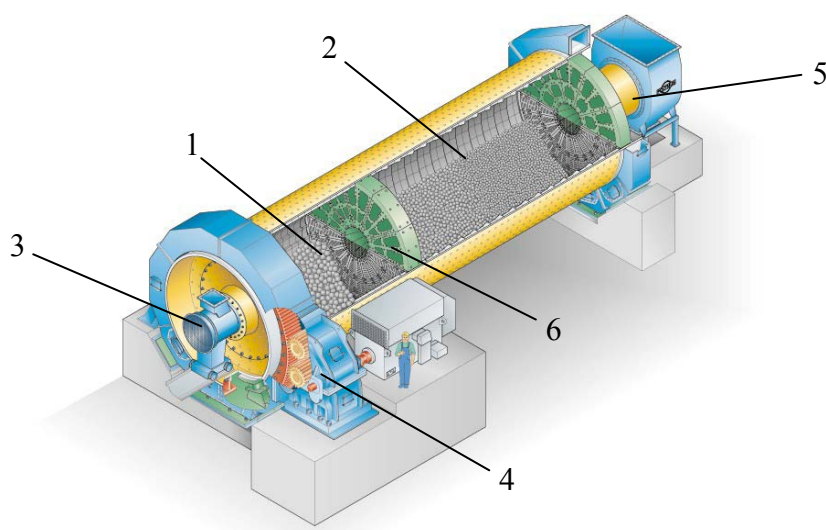
A golyósmalmok mellett szól az az érv is, hogy évtizedek óta használják az ásvány- és ércelőkészítésben, és ezáltal bőséges információ áll rendelkezésre a működésükről.

A dobmalomokban - amelyek elérhetik akár a 25 m hosszt (cső malom) és a 13 m átmérőt (autogén malom) - vízszintes tengelyvonal körül forgó, általában hengeres acélköpenyű őrlőtérben szabadon mozgó őrlőtestek ütéssel, nyomással és dörzsöléssel aprítják a feladott anyagot. Az őrlőtestek leggyakrabban golyók vagy rudak (utóbbi esetben kisebb őrlőfelület $\Rightarrow$ durvább szemcseméretű feladás és termék), de lehetnek még cilpebsz (hengeres alak), flintkövek vagy az őrlendő közet nagyobb méretű darabjai is - ez utóbbi az autogén őrlés. Az őrlőgolyók és rudak anyaga, pedig a felhasználási céltól függően acél vagy kerámia lehet.

Például a kis termék-szennyeződést megkövetelő kerámiaipari őrlés során célszerű a nagy tisztaságú korund ($\rho \approx 4000 \text{ kg/m}^3$) őrlőgolyókat alkalmazni, ahol pedig az őrlőhatás maximalizálás a cél, ott a nagyobb sűrűségénél fogva nagyobb igénybevételre képes vasgolyók ($\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$) a jellemzők [5, 11].

A növekvő őrlési finomsággal a golyók és szemcsék számának aránya kedvezőtlené válik. Következésképpen a lehető legfinomabb őrlőtesteket célszerű alkalmazni az igénybevételek számának növelése érdekében.

A gyakorlatban rendszerint folyamatos működésű berendezéseket alkalmaznak, amelyeknek az egyik végén lép be és a másik végén távozik az anyag. Ez a fajta malom száraz és nedves őrlésre egyaránt alkalmas mind a kemény, mind pedig a lágy anyagok esetében.



2.7. ábra: Diafragmás kétkamrás dobmalom (HOLCIM)

(1-durvaőrlési kamra, 2-finomőrlési kamra, 3-malom feladás, 4-malom meghajtás, 5-malom kiömlés, 6-középső diafragma)

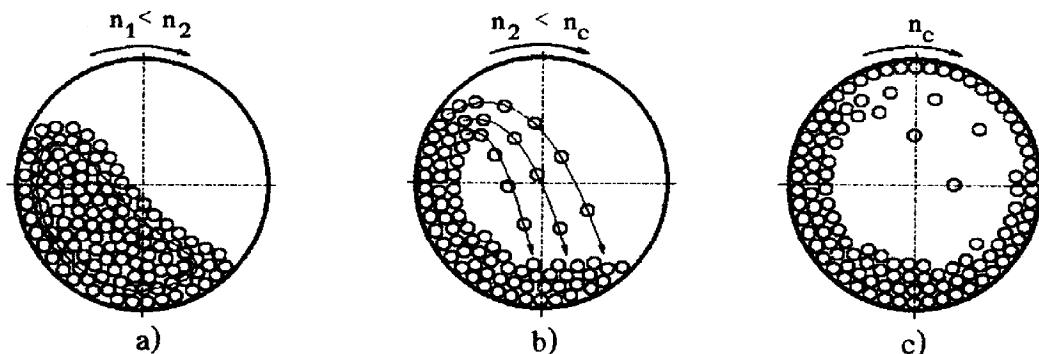
Nagyon elterjedtek az ún. diafragmás malmok (2.7. ábra), amelyeknél a malom kihordó vége előtt rács ún. diafragma van elhelyezve. E 6...25 mm nyílású rács és a kihordócsap fedele között radiális vagy spirális bordák vannak, amelyek az anyagot a malom aljáról a kihordócsapig felemelik. Az osztályozóval zárt körfolyamatban működő diafragmás malmok akár 20-25 %-kal több anyagot is képesek adott finomságúra őrölni, mint az azonos nagyságú és energiaszükségletű centrális kiömlésű malom (nagyobb a kihordási sebessége).

A golyósmalmokban az őrlés részben a röppályát leíró őrlőtestek becsapódása, részben a csúszó és forgó őrlőtestek dörzsölő-nyíró hatása révén megy végbe. Az irodalomban az előbbit katarakt-, utóbbit pedig kaszkád hatásnak nevezik. E mozgásviszonyok kialakulásában a nehézségi- és centrifugális erő, valamint a súrlódás mellett az egyes őrlőtestek és a páncélzat kölcsönhatása is közrejátszik [11].

Amikor a dobkerület tetőpontján a nehézségi erővel a centrifugális erő egyensúlyt tart, a dobbal együtt mozgó testek a dobfalhoz tapadnak. Ez a kritikus szögsebesség, ill. fordulatszám:

$$\omega_{krit} = \sqrt{\frac{g}{R}} \quad \text{ill.} \quad n_{krit} = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (2.42.)$$

Az üzemi fordulatszámot a kritikus fordulatszám százalékában szokás megadni. A dob fal mentén mozgó testre a maximális esési magasságot az $n = \frac{32}{\sqrt{D}}$ fordulatszám mellett érjük el, ami a kritikus fordulatszám 76 %-a. Közismerten ez a malmok szokásos üzemi fordulatszáma.



2.8. ábra: Golyósmalom üzemmódjai: a) kaszkád, b) katarakt, c) kritikus [5]

A golyósmalmok mechanikájából következik, hogy kaszkád működés mindig tapasztalható, a katarakt működés feltétele pedig, a kellő mértékű töltet és megfelelő súrlódási tényező. A két fő működési forma közül a katarakt a durvább (nagyobb töltési fok), a kaszkád pedig, a finomabb őrlési fokozatra alkalmas.

Az őrlőtestek mozgását erősen befolyásolja a páncélozás módja. A sima páncélozás esetében például jobban visszacsúszhatnak az őrlőtestek a malom falán, mint az ún. emelőbordával ellátott páncélon, így a sima páncélozású malom őrlési munkájában nagyobb szerephez jut a

dörzsölés munkája, mint a csúszást akadályozó páncél esetében. Ezért finomőrlésre a sima, durvaőrlésre a hullámos, lépcsős, átlapolat páncélzat választása a gyakoribb.

Az őrlőtestek maximális mérete az aprítandó anyag darabnagyságának és szilárdságának megfelelően úgy választandó meg, hogy a feladás legnagyobb és legkeményebb darabját is egyetlen ütéssel eltörjék. Az apróbb szemcsés anyag finomra őrléséhez viszont a nagyobb darabszámot és nagyobb dörzsölő felületet biztosító kis őrlőtestek használata az előnyösebb.

Az őrlőtestek tömör térfogata rendszerint a malomtérfogat 25-35 %-át teszi ki. A golyótöltés pórusvolumene kb. 35...40 %, úgyhogy 1 m³ golyótöltés súlya kb. $0,63 \cdot 7,75 \approx 4,9$ t és a laza golyótöltés kb. a malomtérfogat 40...55 %-át foglalja el.

A hagyományos golyósmalmok hátrányai közé sorolhatók az alacsony - őrlőtestek és malomméret által korlátozott - energiaközlés ($E_{\text{golyó}} = m_{\text{golyó}} \cdot g \cdot \Delta h$) és a viszonylag nagy térigény. Ezek a típusok általában nagy mennyiségű őrlőtestet igényelnek, továbbá a folyamatirányításuk lassú.

Mindezekkel szemben számos előnye miatt a mai napig is egy gyakran alkalmazott malomfajta. Az előnyök között megemlíthető a nagy teljesítményű – nem érzékeny - üzemelés, a csekély karbantartásigény és a konstrukció egyszerűsége. Továbbá a golyósmalmokkal nagy méretük révén jelentős feldolgozó képesség érhető el és még nagyon koptató anyagok esetében is alacsony kopás tapasztalható. Végül a dobmalom relatíve durva feladást is lehetővé tesz (autogén malmoknál), szemben a keverőmalommal, ahol előőrlés szükséges – legtöbbször golyósmalmokban.

A malomdob kopásálló kemény acél vagy kerámia béléssel van ellátva, amivel megegyező anyagból készül az általában 20-100 mm átmérőjű őrlőtest. Néhány finom őrléményt előállító malom 10-12 mm-es átmérőjű golyókkal is üzemelhet. A golyóméret további csökkenésével elérhetjük a 4-6 mm-es igénybevétel intenzitás határt [55]. Ettől kisebb méretű őrlőtestek nem képesek eltávolítani a rájuk és a malom falazatára tapadó anyagréteget.

Száraz és nedves őrlés

Az őrlött anyag szemcsefinomságának növekedésével együtt nő a fajlagos felület és ugyanakkor a részecskék aggregációs hajlama is [15, 79]. Az elérhető szemcsefinomságot az aprítás és az aggregáció egyensúlyának eredményeként kapjuk. Létezik egy szemcsefinomság

határ, ami után az aggregációs hajlam olyan mértékű lesz, hogy további diszperzításfok növekedést már nem lehet elérni. Ez az aprítási ellenállás, amelynek nagysága a fajlagos felület nagyságán kívül elsősorban a felületek közötti erőhatások (adhéziós erők) nagyságától függ, amit az anyag természete, kémiai összetétele és a felületen adszorbeálódó anyagok határoznak meg.

A részecske - kölcsönhatással járó jelenségeket Juhász és Opoczky szerint két csoportba sorolhatjuk [62]. Ezek közül az első az *aggregáció*, ahol a részecskék van der Waals-féle adhéziós erőkkel történő gyenge összetapadásáról beszélhetünk. A második jelenség során pedig tömör, irreverzibilis összetapadás (összekristályosodás, összehegedés, mechanokémiai reakciók) valósul meg, ahol kémiai kötések is szerepet játszanak. Ezt *agglomerációnak* hívják.

A száraz őrléskor fellépő részecskék aggregációját alapvetően kétféle módon lehet csökkenteni. Az egyik lehetőség, amikor az őrlendő anyagot valamely közömbös anyaggal hígítjuk [62, 79]. Ennek során a nagy mennyiségben jelen levő közömbös anyag megakadályozza a tulajdonképpen őrlendő anyag szemcséinek egymással ütközését és aggregációját. Ez a megoldás az iparban nem alkalmazható.

A második lehetőség, a kis mennyiségben alkalmazott segédanyagok (pl. kalciumsztearát, trietanol-amin) pedig már ipari méretekben is csökkenthetik a részecskék közötti adhéziós erőket, mégpedig oly módon, hogy a felületen vékony réteget képeznek. Az antiadhezív felhasználásával az aprítási hatások jelentősen növelhető [97].

Nedves őrlés esetében a közeg - szilárd részecske kölcsönhatás sokkal jelentősebb, mint a száraz őrlésnél. A folyadék ugyanis megfelelő nedvesedés esetén jelentős dezaggregáló hatást fejthet ki. Ha a szilárd test pórusos szerkezetű ill. a részecskék felületén, hasadásokat, hézagokat találunk, akkor a nedvesítő folyadék behatol a hézagokba és kapillárisokba és azokban olyan erős feszítő, dezaggregáló hatást fejt ki, ami az őrlést jelentősen elősegíti, ill. az őrlési energiát csökkenti. Ezt a hatást nagymértékben fokozni lehet jól adszorbeálódó anyagokkal, pl. elektrolitokkal és felületaktív anyagokkal (Rebinder-féle effektus). Fentiek értelmében tehát elmondható, hogy a nedves őrlés során az anyag nedvesedési és adszorpciós viszonyainak ismerete legalább olyan fontos, mint az aprítást előidéző mechanikai igénybevétele. Száraz őrlés során inkább az ütő, ütköző, nyomó igénybevételek, nedves őrléskor pedig a nyíró, dörzsölő igénybevételek dominálnak [79].

2.4.2. Golyósmalmok méretezése

A 2.3.3. fejezetben ismertetett Bond-modell feltételeitől való eltérés esetében a laboratóriumban mért W_{iB} - munkaindex értékét az új feltételeknek megfelelően korrigálni kell [5]:

$$W_{iB,korr} = k W_{iB} \quad (2.43.)$$

A k tényező tehát a Bond-eljárástól eltérő körülmények figyelembevételére szolgál, azaz

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \quad (2.44.)$$

amelyben a $k_1 \dots k_6$ a Bond által kidolgozott korrekciós tényezők (lásd Melléklet). Pl. szárazőrlés-, finomőrlés faktora, stb...

Ezek figyelembevételével megváltozik a fajlagos őrlési munka értéke:

$$W_{B,korr} = W_{iB,korr} \left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad (2.45.)$$

amelyben X_{80} a feladás, x_{80} az őrlemény 80 %-os szemcsemérete (μm), $W_{iB,korr}$ a korrigált Bond-munkaindex [5, 42, 43].

Az őrlés munka-, ill. teljesítményszükséglete

A fenti módon meghatározott Bond-munkaindex felhasználásával a vizsgált anyagból Q mennyiségű és x_{80} finomságú őrlemény előállításának munka-, ill. teljesítményszükséglete ($P_{\text{őrlemény}}$):

$$P_{\text{őrlemény}} = W_{B,korr} Q, \text{ [kW]} \quad (2.46.)$$

ahol $Q[\text{t/h}]$ a körfolyamatba táplált friss feladás tömegárama, amely megegyezik a körfolyamatból távozó kész őrlemény tömegáramával.

A golyósmalom-hajtás villamos teljesítmény-szükséglete (P_m , kW)

A golyósmalmok hajtómotor teljesítmény-szükségletének meghatározására a szakirodalom általában Rowland és Kjos korrekciójával levezetett összefüggéseit ajánlja, amely függvénykapcsolatot ad meg a golyósmalom energiája (golyók munkavégző képessége), ill. hajtás villamos teljesítménye és a malom méretjellemzői között [42, 43]:

$$P_m = 7,33 e \varphi \rho_g (1 - 0,937\varphi) \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10e}}\right) LD^{2,3} \quad (2.47.)$$

(a hajtó motor-teljesítmény 10-20 %-kal nagyobbra választandó).

A malmok méretét (D, L) az anyag által igényelt munka ($P_{\text{örlemény}}$ teljesítmény) és a gép munkavégző-képességének (P_m teljesítőképességének) egyenlőségéből határozhatjuk meg, azaz

$$P_{\text{örlemény}} = P_m \quad (2.48.)$$

A fenti összefüggésekben:

D	malom átmérője, m
L	malom hossza, m
ρ_g	golyók sűrűsége, t/m ³
φ	örlőtestek töltési (laza) foka,
e	a malom-fordulatszám viszonya a kritikus fordulatszámhoz,
X_{80} és x_{80}	a feladás és az örlemény 80 %-os szemcsemérete, μm
W_i	Bond munkaindex, kWh/t
k	korrekciós tényező.

A malom kapacitása (Q , t/h)

Adott $D \times L$ méretű, és adott feltételek (n , e) között üzemelő malom kapacitását pedig 2.46. és 2.47. összefüggésből kapjuk meg. A golyósmalom feldolgozó képessége tehát [5]:

$$Q = \frac{6,13 D^{3,5} \left(\frac{L}{D} \right)_{-g} \left(\varphi - 0,937 \varphi^2 \right) \left(e^{\frac{0,1e}{2^{9-10e}}} \right)}{k W_i \left(\frac{10}{\sqrt{X_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right)} \quad (2.49.)$$

$$D < 3,81 \text{ m}$$

összefüggéssel határozható meg.

A szakirodalom részletes tanulmányozása alapján megállapítható, hogy a jelenleg rendelkezésre álló fajlagos őrlési energia meghatározására irányuló laboratóriumi módszerek és törvényszerűségek nem alkalmasak a speciális körülmények között történő őrlés esetében. További hiányosságot jelent, hogy az egyes őrlhetőségi vizsgálati eljárások csak meghatározott, előírt szemcseméretekre alkalmazhatóak, nem pedig általánosan.

A szakirodalom, ill. a tudományos előzmények alapján megállapítható:

- **A különleges körülmények mellett lefolytatott őrlhetőségi vizsgálatokkal - úgymint nagy hőmérsékletű lúgos közegű, és extra-finom feladású őrlés - a szakirodalom kellő mélységgel nem foglalkozik.**
- Az őrlési energia - szemcseméret kapcsolatra nincs olyan elméleti megoldás, amely valamennyi körülményre alkalmas. **Az őrlhetőség legmegbízhatóbban az adott őrlési körülmények mellett lefolytatott kísérleti vizsgálattal jellemezhető.**
- **Ugyanakkor a meglévő eszközök és mérési eljárások közvetlenül nem alkalmasak a különleges körülmények közötti vizsgálatok elvégzésére, ehhez új eszközre és új mérési eljárásra van szükség.**

Az általam végzett vizsgálatok, kutatások fő célkitűzése, olyan *őrlhetőség vizsgálati berendezések és eljárások fejlesztése*, melyek egyaránt alkalmazhatók:

- az őrlhetőség meghatározására az érc- és ásványbányászatban, az ásványfeldolgozó-iparban, a cementiparban, a hulladék-feldolgozásban stb.;
- az őrlhetőség különleges őrlési körülmények között - nedves, lúgos vagy savas közegben, 20...200 °C hőmérsékleten - történő meghatározására;
- változó, ill. tetszőleges feladási szemcseméretű anyagok őrlhetőségének vizsgálatára;
- a fajlagos őrlési energia meghatározására, mely felhasználható az üzemi malmok méretezésénél, azok üzemeltetési paramétereinek (örlőtest-összetétel, töltési fok, az osztályozó berendezés működése) optimalizálásánál stb.

Az egyik fontos célkitűzés az, hogy a kifejlesztett őrlhetőség vizsgálati eljárások alkalmasak legyenek az őrlhetőség gyors meghatározására, és így alkalmazhatók az üzemekben az őrlési folyamat szabályozásánál.

A szakirodalom tanulmányozása alapján szerzett tapasztalatokból a kísérleti vizsgálatok kialakításához az alábbiakat kell kiemelnünk:

- 1) Az általánosabb vizsgálatok érdekében kísérleti körülmények kialakításánál az egyik kulcskérdés a mintaanyagok kiválasztása: helyesen akkor járunk el, ha eltérő genetikai sajátságú (vulkanikus, üledékes eredetű...), szövetszerkezetű, homogenitású kőzetekkel végezzük párhuzamosan a mérési eljárás fejlesztését közvetlenül szolgáló alapvizsgálatokat.
- 2) Az örölhetőségi vizsgálat eredmény nem független az alkalmazott eljárástól:
 - a) Az eljárásokban a szemcsék őrlési igénybevétele eltérő: a Hardgrove-malomban a dörzsölés, a Bond-malomban az ütés a jellemzőbb, s erre tekintettel kell lenni.
 - b) Az általánosabb megállapításokhoz legalább két eljárással lefolytatandó összehasonlító szisztematikus vizsgálatra van szükség.
 - c) Az örölhetőségi eljárások vonatkozásában a legjobb korreláció a leggyakrabban alkalmazott Bond- és a Hardgrove-eljárás között tapasztalható. Célszerű tehát ezek továbbfejlesztésére törekedni.

3. Vizsgálati és értékelési módszerek

Az általam végzett kutatómunka a hazai és a nemzetközi szakirodalom tanulmányozását, az értekezésben szereplő kísérletekhez szükséges őrlhetőség-vizsgálati eszközök és módszerek kifejlesztését, laboratóriumi és üzemi kísérleti vizsgálatokat, a kapott eredmények kiértékelését, valamint következtetések levonását foglalja magába.

Elsősorban a 1931-2007-ig terjedő időszakban megjelent golyósmalmi őrlés energiaigényével és anyagok őrlhetőségével foglalkozó tudományos közleményeket tanulmányoztam. E tapasztalatokat javarészt a mérési körülmények kialakításakor, és a mérési eredmények értékelésénél használtam fel.

A disszertációban foglalt tudományos eredményeim jelentős része szisztematikus laboratóriumi kísérleteken alapszik, amelyeket a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében végeztem el. Az itt nyert laboratóriumi eredményeket üzemi méretű kísérletek tapasztalataival hasonlítottam össze a gyakorlati használhatóságuk ellenőrzése céljából.

Munkám fő célkitűzéseinek megfelelően egyrészt a Bond- és Hardgrove-féle módszer ill. berendezéseinek és kiértékelésének továbbfejlesztésével foglalkoztam, másrészt pedig a berendezések alkalmazhatóságát vizsgáltam különböző modell és valós anyagokon.

Kutatómunkám a szakirodalom feldolgozását követő első szakaszában a berendezések továbbfejlesztése volt a fő feladat. Közreműködtem a Hardgrove-malom átalakításban, a Bond-malom átalakítása a közvetlen szakmai irányításom mellett történt. Mind a két malmot fűthetővé alakítottuk át, és elláttuk a villamos teljesítmény, ill. az őrléshez felhasznált munka mérésére alkalmas mérőeszközökkel.

A kísérleti vizsgálatok sarkalatos pontja a szemcseméret-eloszlás pontos meghatározása, amelyhez nedves szitaelemzést (ISO-3310.1 szerinti laboratóriumi szitákat felhasználva) és Fritsch Analysette 22 típusú nedves diszpergáló egységgel rendelkező lézeres szemcseméret-elemzőt használtam.

A laboratóriumba beérkezett mintaanyagok előkészítését az átlagosítást követően mennyiségtől és szemcsemérettől függően negyedelő kereszttel és/vagy Jones-féle mintakisebbitővel végeztem, a törésüket pedig pofás- valamint hengeres törővel hajtottam végre.

A nagyhőmérsékletű mérések elvégzéséhez mindkét malmot fűthető köpennyel láttuk el. Az őrlési energia közvetlen módon történő mérése a Hardgrove-malom esetében egy erőmérő, a Bond-malomnál pedig egy elektromos teljesítménymérő segítségével történt.

Az üzemi méréseket különböző feldolgozóképeségű (4 t/h és 100 t/h) golyósmalmokban folytattuk a MAL Zrt. ajkai és a Holcim Zrt. hejőcsabai gyárában. Ezek részletes bemutatásával a 4. és 5. fejezetek foglalkoznak.

A mérési adatokat táblázatokban diagramokban dolgoztam fel, a kiértékelések az első esetben *hőmérséklet - Bond-munkaindex* diagramok alapján, a másodikban, pedig *őrlemény szemcseméret-energia* diagramokat felhasználva történtek. A kiértékeléshez továbbá az előkészítéstechnika (eljárástechnikai eloszlásfüggvények), a matematikai statisztika és a korrelációs számítás ismert módszereit alkalmaztam: a mérési pontokra, az egyes folyamatok leírásához, különböző függvényeket illesztettem és feltüntettem a hozzájuk tartozó korrelációs együtthatókat és az abszolút vagy relatív hiba nagyságát.

4. Bond- és Hardgrove-féle örölhetőség vizsgálati eljárások ill. berendezések továbbfejlesztése nagyhőmérsékletű lúgos őrlésre

4.1. Célkitűzések és vizsgálati anyagok

E kutató-fejlesztő munkát egy görög megbízás (S&B Industrial Minerals S.A.) indította, amelynek egyik fő kérdése az volt, hogy a nagy keménységű diaszporos bauxitok örölhetősége hogyan javítható.

Bauxit és timföldgyártás

Az alumínium a földkéregben a második leggyakoribb fémes elem, mintegy 300 féle ásványt képez. Ezek közül metallurgiai jelentősége a gibbsitnek, böhmitnek és diaszpornak van. A bauxit kísérőásványa kvarc, sziderit, magnetit és alumínium szilikátok lehetnek [30; 45].

A *gibbsit* [hidrargillit, $\gamma\text{-Al(OH)}_3$] monoklin prizmás, álhatszöges kristályokat alkot. Önállóan ritkán található. Főként a laterites bauxitokban van nagyobb mennyiségben jelen.

A *böhmit* [$\gamma\text{-AlO(OH)}$] rombos, bipiramisos kristályokat alkot. Elsősorban a karsztbauxitok alumíniumtartalmának hordozója.

A *diaszpor* [$\alpha\text{-AlO(OH)}$] rombos, bipiramisos rendszerben kristályosodik. Főként a tektonikus mozgásban részt vett vagy enyhébb metamorf átalakulást szenvedett bauxitlepek jellemző ásványa. Nehezebben tárható fel a vele azonos összetételű böhmitnél [44, 45].

A Föld ismert bauxitkészletét mintegy 60 milliárd tonnára prognosztizálják, ezen belül a műre valónak minősülő rész kb. 30 milliárd tonna. A feltételezett készletek hozzávetőleg 33%-a Afrikában, 30%-a Közép- és Dél-Amerikában, 16%-a Ausztráliában, 12%-a Ázsiában és 4%-a Nyugat-Európában van [46]. Ezek közül a Világ legnagyobb exportálója a Boké bányauzem Guineában, amely Észak-Amerika, Európa, Oroszország és Ukrajna timföldgyáraiba szállít [69].

Nagy előrelépést jelentett a bauxitkutatás területén a Bárdossy által kidolgozott átfogó elmélet a bauxitok közet- és szövettanával összefüggésben [45], majd a Csőke által megalkotott dúsíthatósági elmélet [14].

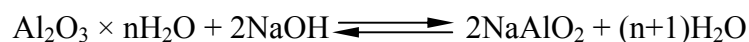
Karl Joseph Bayer 1892-ben szabadalmaztatta a bauxit nátronlúgos feltárását. Jelenleg a világ timföldtermelésének 90 % - át a Bayer-eljárás adja, amely során a bauxit 100...250 °C-on történő marónátronos feltárása történik. A módszer a kis kovasavtartalmú bauxitokra alkalmazható hatékonyan.

Az alumínium előállításának manapság általánosan használt technológiája a Bayer-Hall-eljárás, ami két, jól elkülöníthető lépésből áll:

- a Bayer-féle timföldgyártás (ez voltaképpen tisztítás és dúsítás)
- a Hall-féle elektrolízis.

A timföldgyártás során a következő kémiai reakciók mennek végbe [14]:

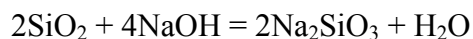
1. A bauxit ásványok oldását és oldatból való kinyerését (kikeverését)



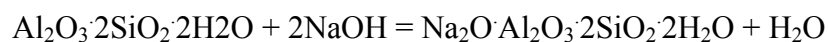
egyenlet írja le.

2. A szilikátásványok a nátrium-aluminát lúgban oldhatatlan nátrium-alumínium-szilikát csapadékot hoznak létre és lúg- ill. alumíniumoxid (timföld) veszteséget okoznak.

A kvarc esetében



és a kaolinitre nézve pedig



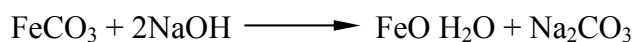
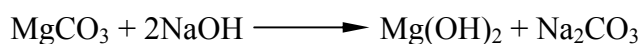
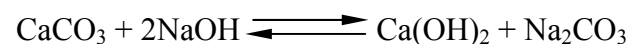
egyenletek írják le a kémiai folyamatokat.

3. A titánásványok a következő képlet szerint nátrium-metatitanátot képezhetnek:



4. A vasásványok közül a hematit és a goethit nem vesz részt a kémiai folyamatokban, mint oldhatatlan maradék a vörösiszapba kerül.

5. A karbonátos ásványok dekauszifikálják a nátrium-hidroxidot, lúgvesztést okoznak.



A Bayer-eljárásnál alkalmazott lúgos közegű bauxit őrlése során az ipari gyakorlat alapján a zagy szilárd anyag koncentrációja őrléskor 35-40 m/m %. Ebből következik, hogy a NaOH relatíve hamar telítetté válik, amely gátat szab az Al_2O_3 további oldódásának. Azonban a fent említett szilárdanyag tartalomtól csak az őrlhetőség rovására lehetne eltérni, ezért a kémiai feltáráshoz szükséges nátronlúg mennyiséget a malom után vezetik a zagyhoz. A hígítás által a keverék szivattyúzhatósága is javul [47].

Az alumínium-oxid-hidrát oldódása az ásvány felületén megy végbe, ezért az oldás sebessége, a felület nagyságától, azaz a bauxit fizikai sajátosságától, szemcseszerkezetétől függ. Az Al-tartalmú ásványokat a bauxit egyéb ásványos alkotói elzárhatják, elszigetelhetik a feltárolúgtól. Az oolitok vagy pizolitok pl. olyan jellegzetes képződmények, amelyekben az Al-tartalmú ásványokat vékony vas-oxid burok veszi körül és elzárja az oldószertől [47].

McCormick és szerzőtársai [56] bauxit mechanokémiai előkészítését vizsgálták mészhajlításában. A Bayer-eljárás közben nemcsak az alumínium-oxid, hanem a kovács is feloldódik, amelynek a bauxitban két formája ismert: a reaktív kovács (kaolinit) és a kvarc. A kaolinitet jobban, a kvarcot viszont alacsony hőmérsékleten kevésbé oldja a Na_2O . A bauxit és diaszporos bauxitok feltáráskor használt nagy hőmérséklet esetében azonban a kvarc is erősen hajlamos a DSP (desilication product) kialakulására, amely nagy nátronlúg és alumínium-oxid veszteséggel jár. Ezért az 5 %-nál nagyobb reaktív kovács tartalmú bauxitok Bayer-eljárással történő feldolgozása nem gazdaságos. Az elő-szilikáttalanítás vagy feltárás során alkalmazott mészhajlítás (CaO vagy Ca(OH)_2) adagolásával kalcium-alumínium-hidroszilikát képződése mellett csökkenthetjük a marónátron veszteséget. Ez a folyamat azonban nem kívánt alumínium-oxid veszteséggel jár, minden tonna mészhajlítás kb. 0,6 t Al_2O_3 veszteséget jelent. Ennek elkerülésére a Bayer-eljárás során alkalmazottól magasabb

hőmérsékleten ($260-340\text{ }^{\circ}\text{C}$) és nyomáson kalcium-vas-aluminium-hidroszilikát ($\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$) képződésével csökkentik a NaOH és Al_2O_3 veszteségeket [56].

Az ipari gyakorlatban világszerte nagy hőmérsékleten történik a bauxitok lúgos őrlése a timföldgyártás során. A kínai CHALCO vállalat például $80\ldots 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on őrl golyósmalomban CaO adagolása mellett [81], az ausztrál ALCAN cég pedig a Bayer-eljárás során $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on valósítja meg a bauxit előkészítését [82] – kétkamrás rudas/golyósmalomban - lúgban ($c= 65\text{ m/m \%}$!).

Mintaanyagok

A kísérletek anyagául szolgáló minták kiválasztása aszerint történt, hogy minél szélesebb körben lehessen vizsgálni a speciális körülmények őrlhetőségre gyakorolt hatását. Ennek érdekében 2 laterites- és 3 karszt bauxitot vontam be a kísérletekbe, nevezetesen egy böhmities típusú magyar (Halimba), két görög - egy böhmities és egy diaszporos - egy gibbsites ausztrál (Weipa) és egy böhmities afrikai (Boké) bauxitot. Ezek közül a két utóbbi laterites típusú, míg az előzőek pedig karszt jellegűek. A modell anyagok ásványos és kémiai összetételét a 4.1. és a 4.2. táblázat tartalmazza.

Összetevő	Weipa, ausztrál gibbsites	Boké, afrikai böhmities
$\text{Al}_2\text{O}_3\text{ [%]}$	53,8	53,4
$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{ [%]}$	15,7	14,2
$\text{TiO}_2\text{ [%]}$	2,9	3,3
$\text{SiO}_2\text{ [%]}$	2,9	2,0
Izzítási veszteség [%]	24,7	27,1
Modulus $\left[\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \right]$	18,6	26,7

4. 1. táblázat: *Ausztrál Weipa és afrikai Boké laterites bauxitok összetétele [92]*

Összetevő	Magyar böhmites	Görög böhmites	Görög diaszporos
Al₂O₃ %			
Gibbsitben	7,4	0,0	0,0
Böhmit	37,0	46,7	38,8
Diaszpor	0,2	2,1	18,7
Kaolinit	5,2	3,9	1,6
Crandallit	0,0	0,3	0,0
Göthit	0,6	0	0,1
Hematit	0,5	0,4	0,4
Összesen	50,9	53,4	59,6
SiO₂ %			
Kvarc	0,0	0,0	0,0
Kaolinit	6,1	4,7	1,9
Összesen	6,1	4,7	1,9
Fe₂O₃ %			
Göthitben	2,8	1,4	2,1
Hematit	19,2	21,5	18,4
Összesen:	22,0	22,9	20,6
TiO₂ %			
Anatáz	2,0	1,7	2,0
Rutil	0,7	0,6	0,8
Összesen	2,7	2,3	2,8
CaO %			
Kalcitban	0,2	2,7	0,4
Dolomit	0,5	0,0	0,0
Krandallit	0,0	0,1	0,0
Összesen	0,7	2,8	0,4
MO %	0,4	0,0	0,0
Izzítási veszteség %	14,7	13,0	12,5
Modulus $\left[\frac{Al_2O_3}{SiO_2} \right]$	8,3	11,4	31,4

4.2. táblázat: Görög és magyar karsztos bauxitok ásványos összetétele [92]

Fentiekben láthattuk, hogy a timföld gyárban történő bauxit őrlése nem szokványos őrlés, mivel először is az őrléssel párhuzamosan kémiai reakciók mennek végbe, amelyek javítják az őrlhetőséget. Továbbá a kémiai folyamatokat a hőmérséklet gyorsítja, befolyásolva ezzel az őrlhetőséget. Végül pedig gyakran a kémiai folyamatok sebességét CaO-val növelik, amely szintén hat az apríthatóságra.

Következésképpen az őrlhetőség vizsgálatának e hatások vizsgálatára is tekintettel kell lennie. A malmok méretezéséhez szükséges hagyományos őrlhetőségi vizsgálatokat azonban száraz közegben és szobahőmérsékleten végezzük el, amelyek nem veszik figyelembe a fent

említett igen fontos körülményeket, úgymint a közeg és a magas hőmérséklet hatását a fajlagos őrlési energiára.

Fentiek alapján a kutatómunkám e szakaszában fő feladatomban volt a hagyományos Bond- és Hardgrove-eljárások továbbfejlesztése, hogy alkalmasak legyenek a bauxitok nagyhőmérsékletű lúgos őrlhetőségének vizsgálatára.

4.2. Bond-féle vizsgálati eljárás és malom továbbfejlesztése

A fent említett célok megvalósítása érdekében a Bond-malmot köpenyfűtéssel láttuk el.

A dobmalom fűtését a homogén hőmérséklet eloszlás érdekében - elektromos úton 3 db, egyenként 1 kW teljesítményű, 230 V feszültségről működtethető fűtőszállal valósítottuk meg. Ez a 3 kW fűtőt teljesítmény elegendő ahhoz, hogy az adott tömegű malomköpenyt és az őrlőtesteket (20,1 kg golyó) aránylag rövid idő alatt a megkívánt hőmérsékletre fűtse. Így az őrlőtérben 20...200 °C közötti hőmérsékletet tudunk elérni $\pm 1^\circ\text{C}$ - os pontossággal, amelynek szabályozását egy mikroprocesszorral vezérelt KD24D típusú elektromos eszköz látja el. A hőmérséklet mérését egy 200 mm hosszú 1 mm átmérőjű Ni-CrNi hőelem végzi. A malom fényképe a 4.1. ábrán, a köpenyfűtés sematikus vázlata, pedig a 4.3. ábrán látható. A fűtőszálak áramellátását csúszógyűrűk és szénkefék segítségével oldottuk meg.

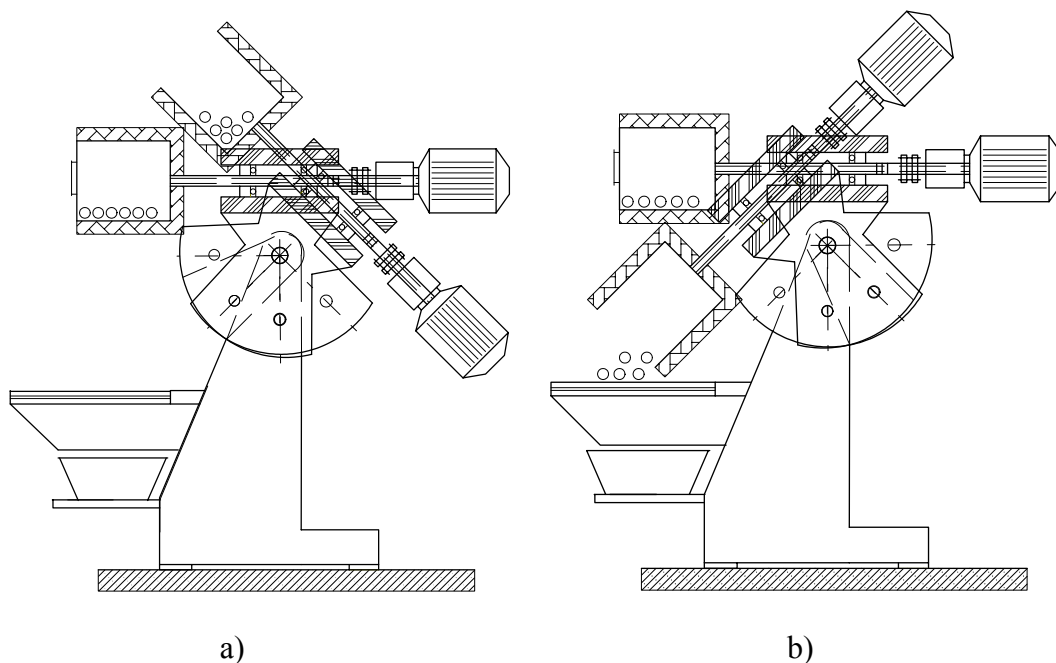


4.1. ábra: Fűthető Bond-malom

A berendezés részei az alábbiak:

- 1 – Malom állvány.
- 2 – Őrlőgolyók.
- 3 – Őrlőgolyók és őrlemény elválasztását szolgáló peremes szitalap.
- 4 – Kézi emelőszerkezet.
- 5 – Elektromos köpenyfűtéssel ellátott dobmalom.
- 6 – Hőmérséklet szabályozó elektronika.
- 7 – Csúszógyűrű és szénkefék burkolt háza.
- 8 – Aszinkron motor.

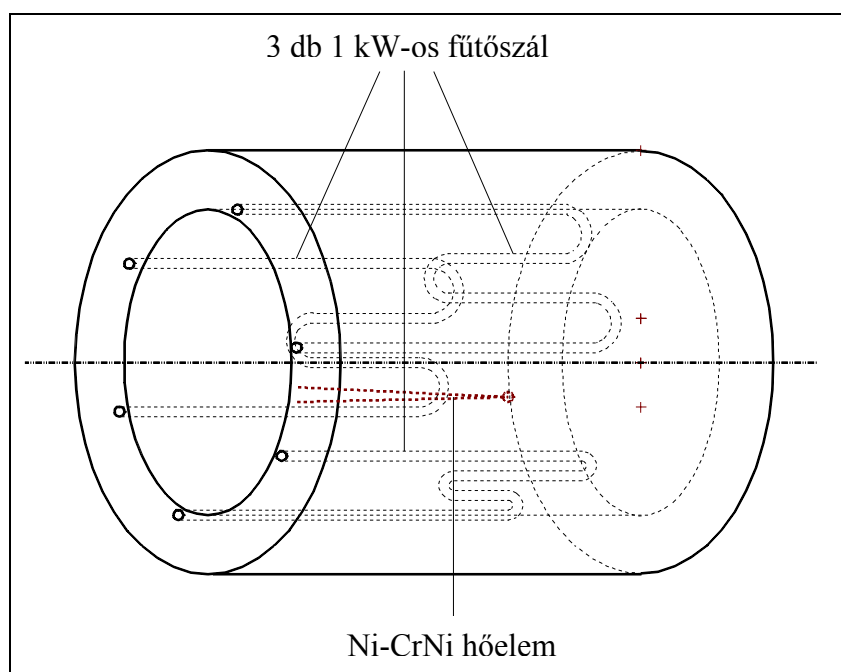
Az egyszerűbb és gyorsabb működtetés és a fent említett fűtőszál áramellátása érdekében a malomtestet új tartószerkezetre helyeztük. A malom hajtása centrikusan történik, továbbá az őrlőtér a vízszinteshez képest $\pm 45^\circ$ – kal dönthető, lehetővé téve a könnyebb töltést és ürítést. Ezt szemlélteti a 4.2. ábra. A malmot vízszintes helyzetben üzemeltetjük.



4.2. ábra: Bond-malom töltése(a) és ürítése (b)

Az elektromos fűtőrendszer felfűtési sebessége $200\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. A malom meghajtómotor névleges teljesítménye $0,75\text{ kW}$, a fordulatszám szabályozását, pedig frekvenciaváltó segítségével tehetjük meg.

A malom záró fedelét kivéve a berendezés hőszigetelését üveggyapot réteggel oldottuk meg. A fedél tömítése a nagy hőmérséklet és a marónátron közeg miatt hő- és lúgálló anyagból készült.



4.3. ábra: *Malomfűtés sematikus ábrája*

A Bond-eljárás előírt feltételei:

- bemért anyag mennyisége a Bond-eljárás alapján $0,7\text{ dm}^3$,
- malom fordulatszám: 70 min^{-1} ($e=90\text{ }\%$),
- Bond szerinti őrlőgolyó összetétel (2.2. táblázat).

Lúgos nagyhőmérsékletű őrlésre bevezetett feltételek:

- a szuszpenzió szilárdanyag koncentrációja $40\text{ m/m }\%$,
- a lúg Na_2O koncentrációja 190 g/l ,
- hőmérséklet $20\ldots 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A nagyhőmérsékletű lúgos őrlés végrehajtására kialakított eljárás:

- A dobmalom és az őrlőgolyók tisztítása után helyezzük bele a golyókat az őrlőtérbe és zárjuk le azt a malomfedéllel.
- Ezután a hőmérsékletszabályozó elektronikán beállítjuk a kívánt hőmérsékletet (20-200 °C tartományban). A felfűtési folyamat a homogén hőmérséklet eloszlás érdekében és az őrlőgolyók nagy mennyisége miatt 80-100 °C esetében kb. 1 órát vesz igénybe.
- A vizsgálati hőmérséklet elérése után a szárítószekrényben előmelegített őrlendő mintaanyagot helyezzük a malomba.
- Ezt követően adjuk hozzá a szintén előmelegített megfelelő mennyiségű tömény NaOH oldatot.
- Ezután digitális hőmérővel ellenőrizzük, hogy mikor éri el a zagy a kívánt hőmérsékletet, és lezárjuk a malmot.
- A malmot vízszintes helyzetbe állítva, 5 perc hőmérsékleten tartás után kezdődik az őrlés. Először 100 fordulatig járattuk, ami után a motor automatikusan leáll.
- Leállás után a 4.2 b) ábrán szemléltetett módon kiürítjük a malom tartalmát a peremes szitalapra és desztillált vízzel öblítsük ki az őrlőtérbe, majd a szítán alaposan átmoszuk az őrlőgolyókat, úgy hogy az örlemény a szitalap alatt elhelyezkedő gyűjtőedénybe kerüljön.
- A malmot töltési pozícióba állítva az őrlőtesteket visszahelyezzük a malomba.
- A felfogott szuszpenziót (desztillált vízzel történő) hígítás mellett nedves szitálásnak kell alávetni egy 100 (106) µm-es lyukbőségű szitával.
- Az egyes őrlési lépcsők előtti anyagmennyiség (700 cm³) beállítását a Tüzün [53] által vizes őrlésre javasolt módon úgy végezzük, hogy az első őrlést követő durva (> 106 µm) termék nedvességtartalmát megmérjük és a későbbiekben ezt használjuk fel, mint állandónak elfogadott érték.
- Jegyezzük le a tömegeket és a <100 µm-es részt tegyük félre.
- A következő őrlési lépcső fordulatainak számát a - korábban ismertetett - Bond által javasolt 2.30 –as képlettel határozzuk meg.

$$N_{i+1} = \frac{0,286m_i - m_{Mi}\Delta m(x < 100\mu m)}{G_i} \quad (2.30.)$$

- Egészítsük ki a $>100\ \mu\text{m}$ -es részt a friss feladásból, úgy hogy ismét elérjük a $700\ \text{cm}^3$ -hez tartozó kiindulási tömeget, adjunk hozzá marónátront majd indítsuk el a malmot.
- Az őrlést addig folytatjuk, amíg az utolsó 3 őrlési lépcsőben el nem érjük az állandó G őrlhetőségi koeficiens értéket, azaz amíg a fordulatonként keletkező friss $100\ \mu\text{m}$ alatti termék mennyiségének állandóvá válik. Ez legtöbbször 6-8 őrlési fokozatot igényel.
- Végül lézeres szemcseméret elemzővel vagy nedves szitálással meghatározzuk a termék 80 %-os szemcseméretét.
- A lúgtól lemosott durva terméket hőálló edénybe helyezve, a finom terméket, pedig durva szűrőpapíron desztillált vízzel átmosva szárítószekrényben kiszáráthatjuk. Ezáltal a továbbiakban kémiai és/vagy mikroszkópi elemzés is elvégezhető az őrleményen.
- A veszélyes körülmények miatt nagyon körültekintően és fokozott óvatossággal, valamint megfelelő védőfelszerelések (hő- és lúgálló kesztyű, védőszemüveg) használata mellett kell elvégezni a fenti műveleteket.

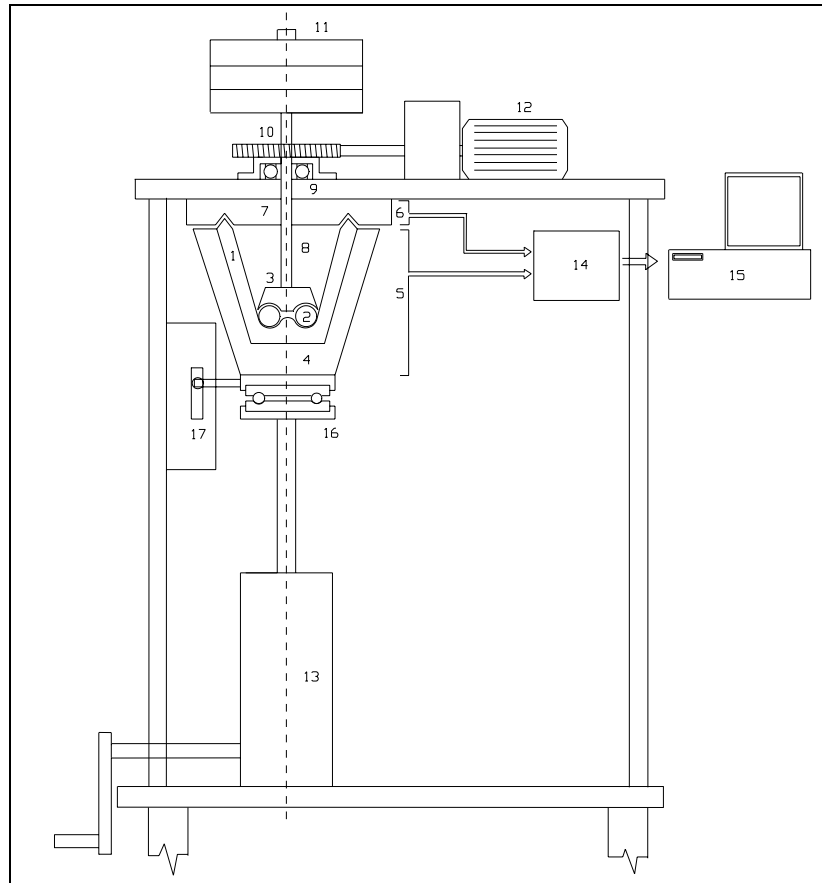
E mérési sorozatban az eredmények kiértékelése a hagyományos módon történt, mégpedig úgy, hogy a mérések végén nyert G őrlhetőségi koeficiens, valamint a feladás és a termék 80 %-os szemcseméretét a 2.29 képletbe behelyettesítve megkapjuk a Bond-munkaindexet:

$$W_{iB} = \frac{4,9}{x_{\max}^{0,23} G^{0,82} \left(\frac{1}{\sqrt{x'_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X'_{80}}} \right)} \quad (2.29.)$$

4.3. Hardgrove-módszer és malom továbbfejlesztése nagyhőmérsékletű vizsgálatokra

Korábban Csőke és szerzőtársai [39] vizsgálták különböző bauxitok őrlhetőségét szobahőmérsékleten lúgos közegben a Hardgrove-malommal. Ezután a valós ipari körülményekhez megfelelőbb nagy hőmérsékletű lúgos vizsgálatot vezettem be.

A különleges őrlési körülmények vizsgálata céljából a Hardgrove-malom átalakításával egy új berendezéshez jutottunk (4.4. ábra), amely univerzális abban a tekintetben, hogy az őrlőhetőség tetszés szerinti körülmények - száraz, nedves (vizes), lúgos, savas közegben, ill. 20...300 °C közötti hőmérsékleten (± 1 °C tűréssel) - között elvégezhető.



4.4. ábra: *A kísérleti malom vázlatrajza*

A berendezés részei (4.4 ábra) az alábbiak:

- 1- Őrlőtégely,
- 2- Őrlőgolyók,
- 3- Alakos záró test a golyók lenyomására,
- 4- Fűthető őrlőtér: hőszigetelő burkolat, benne 3 db 230 V/500 W fűtőszál és 3 db PT100 platina hőellenállás,
- 5- Elektromos csatlakozó mező a fűtőszálak és a hőellenállások csatlakoztatására,
- 6- Elektromos csatlakozó mező a fűtőszál és a hőellenállás csatlakoztatására,
- 7- Fűthető őrlőtér fedele: hőszigetelő burkolat, benne 1 db 230 V/500 W fűtőszál és 1 db PT100 platina hőellenállás,
- 8- Csapágyazott, axiális irányban elmozduló tengely,

- 9- Csapágyazás,
- 10- Csigakerék-hajtás,
- 11- Állandó súly,
- 12- Aszinkronmotor,
- 13- Kézi emelőszerkezet,
- 14- Mérő elektronika,
- 15- Mérésadatgyűjtő és A/D kártya, mérő és vezérlő számítógép, mérő és vezérlő szoftver,
- 16- Csapágyazás,
- 17- Erőmérő-távadó a nyomaték mérésére.

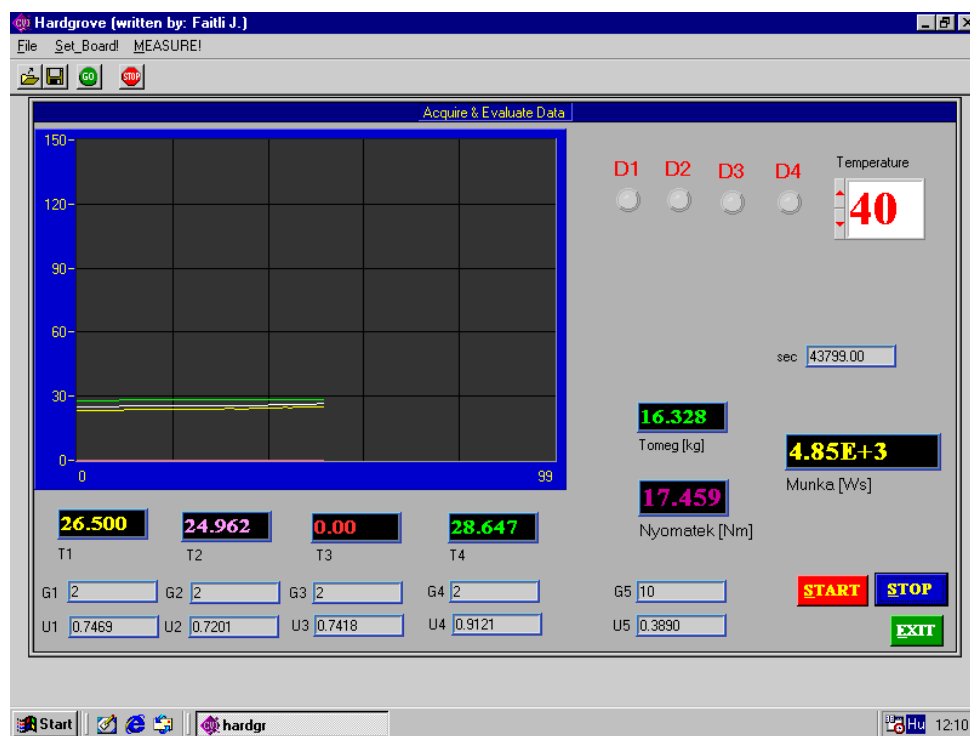
A mérések során az (1) öntöttvas tégelybe helyezzük az előkészített mintát és az (2) őrlőgolyókat. A (13) kézi emelőszerkezet segítségével a tégelyt az őrlőgolyókkal és a mintaanyaggal együtt megfelelő magasságba emeljük. Ekkor a (3) alakos test illeszkedik a golyókra, majd a (8) tengelyen keresztül –amelynek a csapágyazása lehetővé teszi, hogy axiális irányban elmozduljon- a (11) súly (290 N) is felemelkedik. Ezáltal a golyókra és a mintaanyagra a gravitációs erő révén meghatározott konstans nyomóerő hat. A (12) rögzített fordulatszámú aszinkronmotor a (16) csigakerék-hajtáson keresztül forgatja a (9) megfelelően csapágyazott tengelyt. Mivel a motor teljesítménye elegendően nagy, így a fordulatszám gyakorlatilag konstans, ill. az összenyomó erő is állandó, következésképpen az állandó körülmények biztosítottak a reprodukálható mérések elvégzésére.



4.5. ábra: Univerzális malom és szabályozó-, mérésadatgyűjtő rendszere
(1-nyomcsapágy, 2-erőkar, 3-erőmérő, 4-őrlőtégely, 5-számítógép, 6-jel erősítő)

A fejlesztés egyik célja, hogy az üzemi viszonyokat jobban megközelítő magasabb hőmérsékleteken is el lehessen végezni az őrlhetőségi vizsgálatokat. Ezért a malmot (az őrlőtégelyt) a fűtést szolgáló tégelykemencével vettük körül.

A kísérleti berendezés fűtött tömege alapján elvégzett számítások szerint a szükséges fűtőteljesítmény 2000 W. E teljesítmény elégendően nagy ahhoz, hogy rövid idő alatt felfűthessük az őrlőteret. A tégelyben a homogén hőmérséklet eloszlás megvalósítása érdekében több fűtőszál beépítése szükséges (ha túl sok fűtőszálát építünk be, akkor a kemence szerkezete válik bonyolulttá). A megvalósított berendezésbe 4 db 230V/500W jó hőálló ötvöztött anyagú villamos fűtőszálát építettünk be, amelyeket kerámia szigetelők vesznek körül, az elektromos kivezetések a nagyhőmérsékletű villamos kemencéknél alkalmazott szabványos, hőálló csatlakozók.



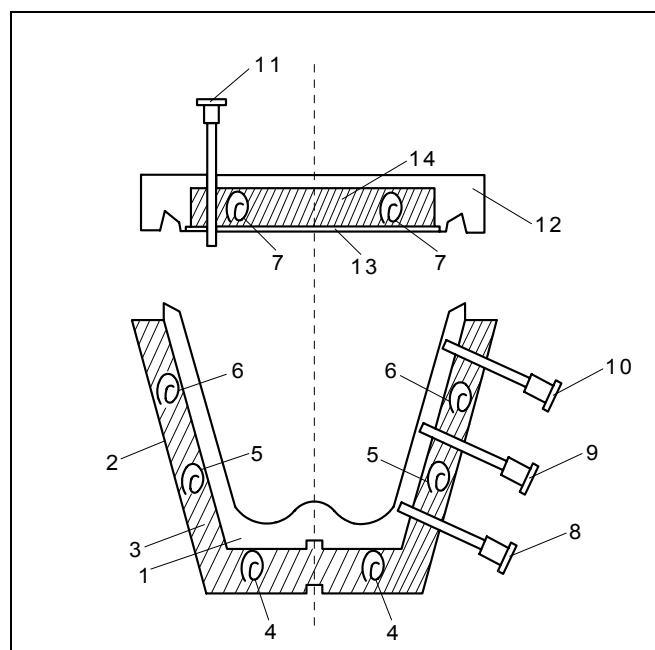
4.6. ábra: Hőmérséklet szabályozás és munka mérésének számítógépi megjelenítése

A hőmérséklet és a hőmérséklet gradiens mérésére - a 4 db fűtőszálnak megfelelően - 4 db PT100-as platina hőellenállás szolgál. A hőellenállások 4 db, rezisztív elemekből felépített mérőhíd részei, amelyeket stabilizált 10 V-os tápfeszültség táplál. A mérőhidak kimenetei a mérőszámítógépben található mérésadatgyűjtő kártya differenciáló bemeneteire

kapcsolódnak. A LabWindows CVI programkörnyezetben C nyelven Dr. Faitli József, egyetemi docens által megírt mérésadatgyűjtő és vezérlő program (4.6. ábra) méri a hőmérséklettel arányos feszültséget.

A hőellenállások beépítés előtti kalibrálása megtörtént: a 4 db hőellenállást és referencia hőmérőket (analóg, digitális) azonos, melegített olajba helyeztünk, és felvettük a hőmérséklet – feszültség karakterisztikákat. Mivel nemcsak a hőellenállásokat, hanem a mérő elektronikát és az A/D átalakítást is figyelembe vettük, így a teljes mérőrendszer esetleges nem lineáris jellegét ki lehetett küszöbölni. A mérőprogram a megmért 4 hőmérséklet alapján már képes eldönteni, hogy be kell-e valamelyik fűtőszálát kapcsolni, hogy a hőmérséklet eloszlás lehetőleg homogén legyen. A számítógéppel való mérés és vezérlés bizonyos „intelligens” műveletek elvégzését is lehetővé teszi, ill. rugalmasan alakítható. A fűtőszálak bekapcsolását az A/D kártya 4 digitális kimenete végzi, amelyek egy optikai leválasztón keresztül egy tranzisztor segítségével kapcsolják a relét, amelyek már elvégzik a nagyfeszültségű kapcsolást.

A megépített kísérleti berendezés segítségével az őrlőtégely hőmérséklete $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ tűréssel, 20 ... 300 $^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet tartományban beállítható, szabályozható. A hőmérséklet állandó szinten tartását a – 4.7. ábrán látható - fűthető őrlőtér biztosítja.



4.7. ábra: Fűthető őrlőtér sematikus ábrája

Fűthető őrlőtér részei (4.7. ábra):

- 1 - Öntöttvas tégely.
- 2 - A fűtőszálak fémburkolata.
- 3, 14 - Kerámia- és villamos szigetelés.
- 4...7 - 4 db 500 W-os fűtőszál.
- 8...11 - 4 db PT100-as platina hőellenállás.
- 12 - Esztergált fémfedél.
- 13 - Zárólemez.

Az őrlhetőség nagy hőmérsékletű vizsgálatának (nedves, lúgos körülmények között) kidolgozott menete:

- Tisztítsuk meg az edényt és a golyó őrlőtesteket, majd rakjuk be a golyókat az edénybe.
- Kezdjük el a malom felfűtését a kívánt hőmérsékletre (20-300 °C). Ez a művelet a berendezéshez kapcsolt számítógép segítségével irányítható a „Hardgrove” nevezetű LabWindows programmal a *Set Board*, *Measure* majd *Start* gombok megnyomásával. A *Stop* gombbal bármikor megállítható a felfűtés folyamata.
- A kívánt hőmérséklet beállítása után a folyamat figyelemmel követhető a monitoron. A beállított hőmérséklet elérésekor a fűtés leáll, majd ha a -2 °C-os tűréshatár alá esik, akkor újra beindul.
- Az előzetesen kívánt hőmérsékletre melegített mintát egyenletesen helyezzük az őrlőtérbe.
- Ezt követően adjuk hozzá az előmelegített (m=85,5 g) tömény NaOH oldatot, így beállítjuk a bauxit-lúg zagy tömegkoncentrációját 37 %-osra – ipari adat alapján.
- Amikor a zagy eléri a beállított hőmérsékletet (digitális hőmérővel ellenőrizzük), 5 perc hőmérsékleten tartás következik, majd állítsuk az edényt őrlési (zárt) pozícióba egy csigás emelőszerkezet segítségével és indítsuk el a hajtómotort.
- A mérés során 60 fordulatot kell megtennie a golyókat mozgató acélgyűrűnek, ami a 20 1/min fordulatszám mellett 3 percet jelent. A 60 fordulat után a motor automatikusan leáll.

- Leállás után az őrlőtérből távolítsuk el a golyókat egy acélkanállal és az őrlőtér felett mossuk le azokat egy szitán, majd a vákuum rendszer segítségével ürítsük ki az őrlőteret egy 500 cm³-es légmentesen záró műanyag edénybe. Itt célszerű desztillált vizet használni a zagy hígítása és könnyebb eltávolítása céljából.
- Az így nyert szuszpenziót öntsük egy tálba, ezután a műanyag edényt és a golyókat alaposan tisztítsuk meg a tál felett és az őrlőtesteket helyezzük vissza az őrlőtérbe.
- A szuszpenziót (desztillált vízzel történő) hígítás mellett nedves szitálásnak kell alávetni egy 75 µm-es lyukbőségű szitával, vagy ha nem áll rendelkezésünkre ilyen szita, akkor 63, 71 és 80 µm-es szitával végezzünk szitaelemzést.
- Az így keletkezett lúgtól lemosott durva terméket hőálló edénybe helyezve, a finom terméket, pedig durva szűrőpapíron desztillált vízzel átmosva szárítószekrényben kiszárítjuk. Ezáltal a továbbiakban az őrlemény kémiai és/vagy mikroszkópi elemzése is elvégezhető.
- A szárított termékek tömegét 0,01 g pontossággal kell mérni. A szitálás megengedett tömegvesztesége 0,75 g. Amennyiben a tömegveszteség meghaladja az előírt értéket, a mérést meg kell ismételni. A finom rész tömegéből vonjuk le az esetleges adalékanyag tömegét.
- Célszerű minimum két párhuzamos mérés elvégzése. A két mérés eredménye közötti eltérés nem haladhatja meg a 3%-ot.

Mérési eredmények kiértékelése

A képződött <75 µm anyag tömegét úgy határozzuk meg, hogy az őrlemény kiszárított szitamaradékának tömegét (m_{durva}) levonjuk a bauxit feladás tömegéből (m_0). A Hardgrove-szám kiszámítása az ismert

$$H = 13 + 6,93(m_0 - m_{durva}) \quad (4.1.)$$

képlettel történik.

Az így nyert Hardgrove számból a Csőke-féle képlettel (2.41.) Bond-munkaindexet kapunk kWh/t dimenzióban.

$$W_{iB} = \frac{468}{HGI^{0,82}} \quad (2.41.)$$

4.4. Nagyhőmérsékletű Bond- és Hardgrove őrlhetőségi kísérleti vizsgálatok eredményei

A kísérleti alapvizsgálatokat két nehezen őrlhető görög bauxitmintával folytattam le. Elsőként azt kell megvizsgálnunk, hogy a kialakított berendezések és mérési-kiértékelési eljárások megfelelőek-e. E célra a Bond- és Hardgrove berendezéssel a fenti módon nyert mérési adatokat vetjük össze.

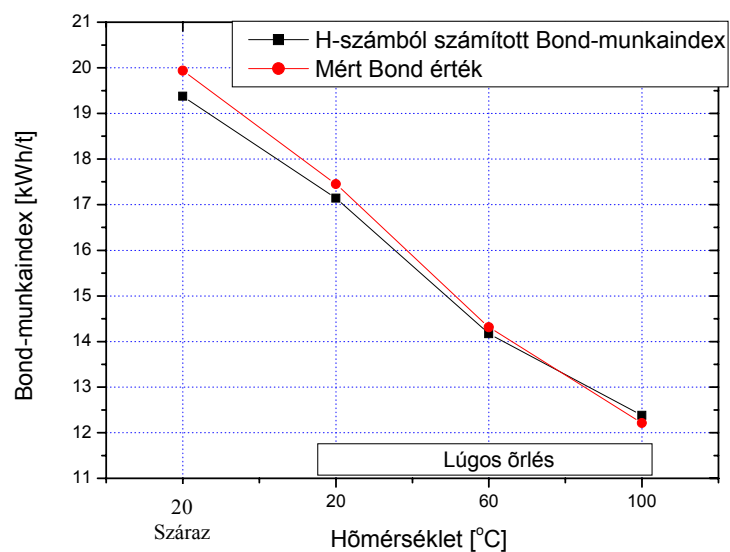
Feltételezzük, hogy amennyiben a száraz standard eljáráshoz hasonlóan, a két eljárással kapott Bond-munkaindexek megegyeznek, akkor az új módszerek megbízhatóak. Erre a feltételezésre az is feljogosít, hogy Csőke és szerzőtársai összevetették a Hardgrove malmi normál hőmérsékletű lúgos, nedves és száraz őrlésből származó Bond és Hardgrove eredményeket és jó egyezést találtak [39].

A fűthető Bond-malommal végrehajtott nagyhőmérsékletű lúgos őrléskor használt anyagmennyiségek a következők voltak:

- a bauxit tömegei $m_{\text{diaszporos}}=1382,6$ g, $m_{\text{böhmites}}=1236$ g,
- a marónátron mennyisége: 2073,9 g(diaszporos) és 1854 g (böhmites),
- adalékanyag 2% (böhmites) és 4% (diaszporos) CaO por volt.

A Hardgrove kísérleteknél pedig az 50 g mintához 85,5 g lúgot mértem, a CaO mennyisége pedig megegyezett a Bond vizsgálatoknál alkalmazottakkal.

A 4.8. és 4.9. ábrán láthatjuk a két mérési módszerrel nyert őrlhetőségi mutatók hőmérséklet függését a görög böhmites és diaszporos bauxitra vonatkozóan. Az egyes esetekben mért és számított Bond-munkaindexeket pedig a 4.3. és 4.4. táblázat tartalmazza, ahol a különböző módon kapott eredmények közötti relatív eltérést is feltüntettem.

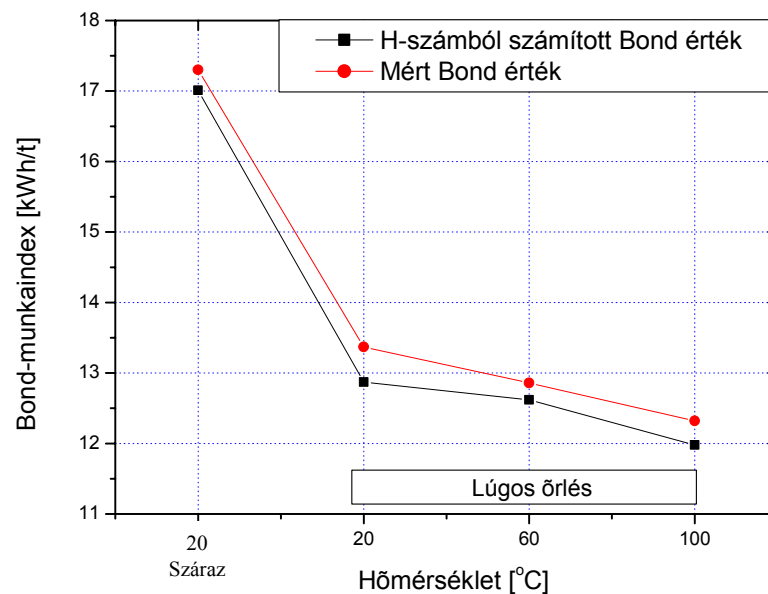


4.8. ábra: Bond és H-számból számított Bond-munkaindex értékek összevetése görög böhmities bauxit esetében

Hőmérséklet [°C]		H-számból számított Bond érték[kWh/t]	Mért Bond érték [kWh/t]	Relatív eltérés [%]
20 (szárász)		19,38	19,94	-2,89
20	Lúgos őrlés	17,14	17,45	-1,81
60		14,17	14,31	-0,99
100		12,38	12,21	+1,39

4.3. táblázat: Mért és H-számból származó Bond-munkaindexek összevetése görög böhmities bauxit esetében

A diaszporos görög bauxitra vonatkozó mérési eredmények a 4.9. ábrán és a 4.4. táblázatban található.

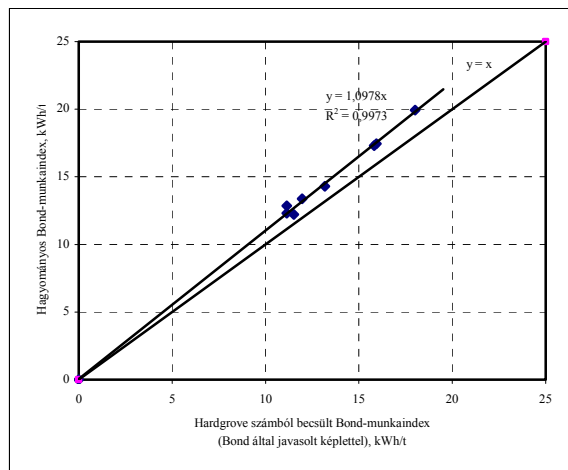


4.9. ábra: Bond és H-számból számított Bond-munkaindex értékek összevetése görög diaszporos bauxit esetében

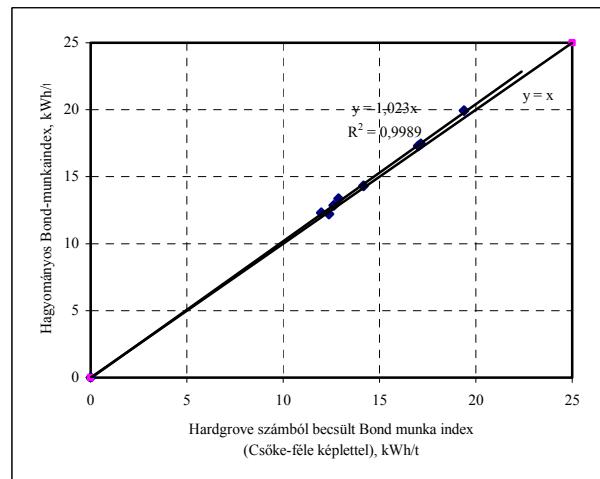
Hőmérséklet [°C]		H-számból számított Bond érték [kWh/t]	Mért Bond érték [kWh/t]	Eltérés [%]
20 (szárász)		17,01	17,30	-1,70
20	Lúgos őrlés	12,87	13,37	-3,70
60		12,62	12,86	-1,90
100		11,98	12,32	-2,84

4.4. táblázat: Mért és H-számból származó Bond-munkaindexek összevetése görög diaszporos bauxit esetében

A fent bemutatott mérési eredmények lehetővé teszik, hogy összevessük a Hardgrove szám Bond-munkaindexé történő átszámításához használt hagyományos (2.37.) és Csőke-féle képlettel (2.41.) kapott eredményeket. Ennek érdekében a 4.10.a) és b) ábrák ordinátáin a hagyományos Bond-munkaindex értékeket, abszcisszáin pedig a Hardgrove számból Bond által javasolt (2.37. képlettel) módon (a) és Csőke-féle (2.41.) képlettel számított (b) munkaindexeket tüntettem fel.



a)



b)

4. 10.a) és b) ábra: Csőke-féle Hardgrove szám - Bond munkaindex átszámítási képlet alkalmazhatósága: a) Bond által javasolt és b) módosított képlettel

Fenti eredmények alapján a következő megállapításokat teszem:

- A nagyhőmérsékletű őrlési körülményekre továbbfejlesztett Bond- és Hardgrove-eljárással közel azonos eredményeket kaptunk, amely bizonyította az alkalmazhatóságukat.
- Mindez azt jelenti, hogy a kifejlesztett mérési eljárás és az értékelési módszer is alkalmas a Bond-munkaindex hagyományostól eltérő körülmények melletti meghatározására.
- A két módszerrel kapott eredmények közötti relatív eltérés -3,70 % ... +1,39 % között változott. A különböző módon nyert eredmények korrelációja kiváló. A két módszer koherens, mivel átszámításuk bizonyított.
- A 4.10.a) és b) ábrák alapján a nagy hőmérsékleten elvégzett bauxitos kísérletek esetében is célszerű a Csőke és szerzőtársai által javasolt módosított átszámítási képletet (2.41.) alkalmazni, ami a Bond-munkaindex pontosabb becslését teszi lehetővé.
- Bizonyos esetekben az akár két munkanapot is igénylő Bond-eljárás helyettesíthető a gyorsabban elvégezhető továbbfejlesztett univerzális Hardgrove-módszerrel - különösképpen üzemi gyors adatszolgáltatás esetében.

5. Különböző típusú bauxitok őrlhetőségének vizsgálata

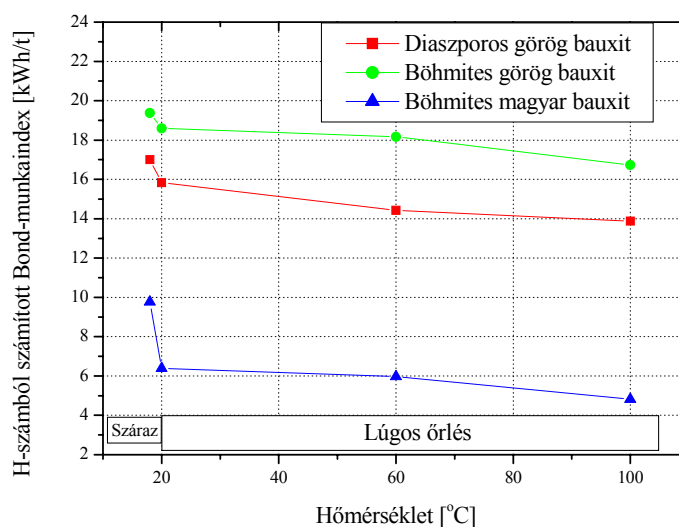
Ebben a fejezetben a kialakított mérési eljárással különböző bauxitok (eltérő típusú, szövet- és közszerkezetű, ásványos összetételű) őrlhetőségét vizsgáltam meg. Beke, Opoczky és Gável, valamint Csőke is foglalkozott hasonló kérdéssel. Beke egy munkájában általában a szövetszerkezet fontosságát hangsúlyozza [16, 38], Opoczky és Gável a klinker szövetszerkezete és őrlhetősége közötti összefüggéseket állapítottak meg, Csőke pedig kimutatta a különböző bauxitok szöveti elemeinek eltérő őrlhetőségét [14].

5.1. Bauxitok őrlhetőségének hőmérsékletfüggése

E kísérlet-sorozat célja a különböző típusú bauxitok hőmérséklet – őrlhetőség közötti összefüggésének feltárása volt.

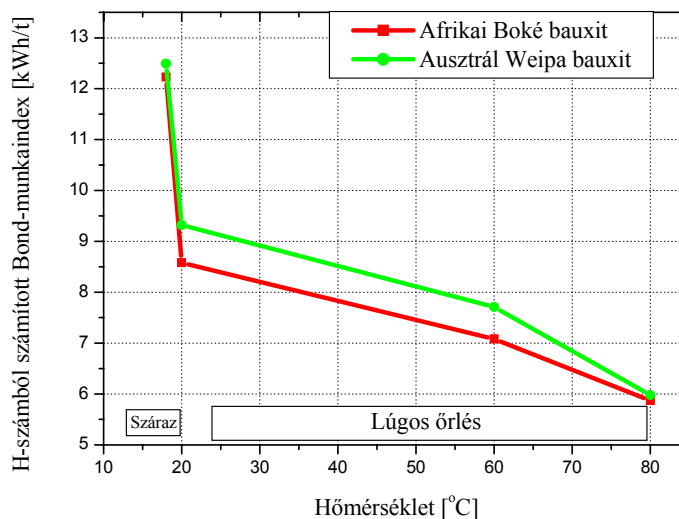
A magyar és görög karszt bauxitokkal – CaO és Ca(OH)_2 nélkül - elvégzett kísérletek eredményeit az 5.1. ábra mutatja meg. Az ábrán látható görbék kiindulási (legmagasabb) pontjai a száraz körülmények mellett elvégzett kísérletek eredményeit jelentik.

Az első munkaszakaszban egy diaszporos és egy böhmities görög, valamint egy böhmities magyar bauxit (karszt bauxitok) Hardgrove számából számított (2.41. képletet alkalmazva) Bond-munkaindexeit hasonlítom össze és bemutatom a hőmérséklet egyes minták őrlhetőségére gyakorolt hatását, majd pedig két laterites bauxit (Boké-afrikai, Weipa-ausztrál) őrlhetőségét ismertetem.



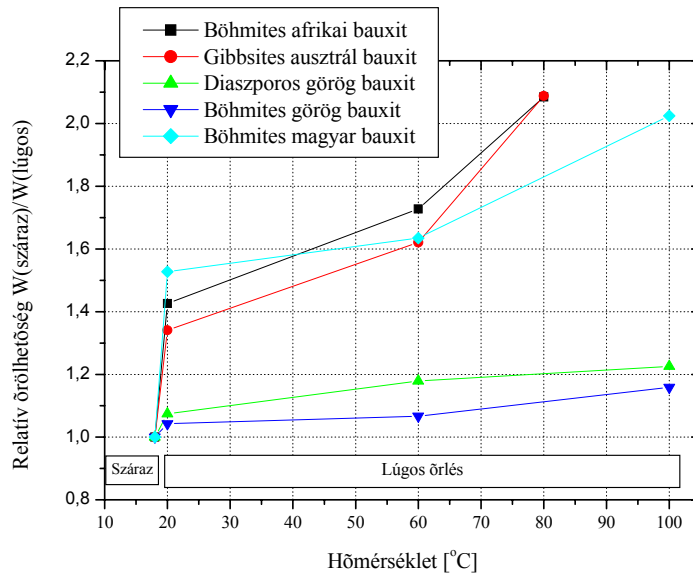
5.1. ábra: Számított Bond-munkaindex hőmérséklet függése karszt bauxitokra

A laboratóriumi kísérletek kiterjedtek két, a világ bauxitvagyonában jelentős részt képviselő területről származó laterites bauxit vizsgálatára, nevezetesen az ausztrál Weipa (gibbsites) és az afrikai Boké (böhmities) bauxitokra. Az eredményeket a 5.2. ábra szemlélteti.



5.2. ábra: Számított Bond-munkaindex hőmérséklet függése laterites bauxitok esetében

A szobahőmérsékletű száraz körülmények mellett és lúgos nagyhőmérsékleten kapott Bond-munkaindexek egymáshoz viszonyított arányát a relatív őrlhetőség fejezi ki (5.3. ábra).



5.3. ábra: Relatív őrlhetőség hőmérséklet függése

Az ismertetett mérési adatok, összefüggések alapján megfigyelhető, hogy:

- A nagyobb hőmérsékletnek egyértelmű őrlést elősegítő hatása van.
- A különböző típusú bauxitok Bond-munkaindex csökken a hőmérséklet növekedésével, de az őrlhetőség változásának mértéke különböző.
- A hasonló autogén szövet-fajtájú minták (afrikai és ausztrál oolitos, pizolitos, és jelentős oolitos szövetet hordozó halimbai) esetében a száraz kísérletekhez képest már 20 °C-on lúgban jelentős őrlhetőség javulás következett be, amely 60 °C-on erősödött, a relatív őrlhetőség elérte az 1,6...1,7 értéket. Ezzel szemben a pelitomorf szerkezetű görög karszt bauxitoknál azt tapasztaltam, hogy 60 °C-os hőmérséklet mellett mindössze 1,08...1,18 relatív őrlhetőség érhető el.
- Az őrlhetőség-változás a száraz Bond-munkaindex

$$- W_{iB,korr} = \frac{W_{iB,száraz}}{k_i} \quad (4.2.)$$

korrekciójával vehető figyelembe, ahol a „k” (a bauxit-típustól és a hőmérséklettől függő) relatív őrlhetőség-változási korrekciós együttható.

- A jelenség a szöveti és közetjelleg eltéréseivel van összefüggésben. Bárdossy [45] és Csöke [14] nyomán megállapíthatjuk: kőzettani szempontból a szöveti elemek közötti

kötés az ausztrál és az afrikai laterites, valamint a halimbai karszt bauxitoknál gyengébb, mint az összecementálódott, kemény pelitomorf szövetű görög bauxitoknál. E különbség a közetmegjelenésben is megfigyelhető: magyar és a laterites bauxitok-közetszemcsék rétegzett, inhomogén szerkezetűek, a görög bauxitok pedig rétegzetlenek, homogének.

- A lazább laterites szerkezetű (oolitos, pizolitos) Boké és Weipa bauxitok esetében a 80 °C-on elvégzett mérések esetében tapasztaltam a legmagasabb relatív őrlhetőséget: ezek az értékek 2,08 és 2,09-re adódtak. Ezeknél a bauxit-mintáknál a legintenzívebb a relatív őrlhetőség-növekedés.

5.2. Égetett- és oltott mész bauxitok őrlhetőségére gyakorolt hatása

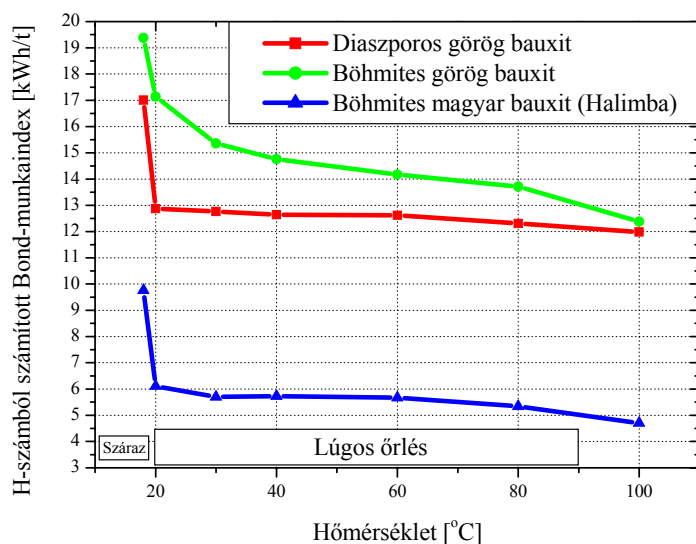
A nehezen feltárható bauxitok (különösen diaszporos) feltárhatósága és őrlhetősége bizonyos mennyiségű (bauxit tömegére vonatkoztatva 2-5 %) CaO jelenlétében jelentősen javul. Tehát a CaO aktiváló hatást fejt ki mind az őrlés, mind pedig a feltárás során. Ez magyarázható egyrészt azzal, hogy a *mész vegyi tényezőként* szerepel és főként közbeeső vegyületek képződésében vesz részt kalcium-hidroaluminátok formájában, amelyek aztán a marónátron hatására nátriumalumináttá alakulnak át [48]. Ezen kívül *kristályszerkezet bontó szerepe* van a CaO-nak; közvetlenül vagy közbeeső vegyületek formájában az alumínium-oxid tartalmú ásványok felületén adszorbeálódik és ezáltal a kristályrácsot meglazítva, azt kevésbé ellenállóvá teszi. Lehetséges azonban, hogy a *bauxit szennyezőire van hatással*; megbontja azokat a hártákat, amelyek az alumínium-hidroxidot elszigetelik az oldószertől.

A CaO hatását egyéb katalizátorok jelenléte – mint SO_4^{2-} -, Fe^{2+} - vagy Mn^{2+} -ionok – tovább fokozzák, illetve a CaO adagolással előállított vashidrogránát adalék önmagában is igen hatékony. A CaO adagolás hatására a nátrium-titanátok és a nátrium-alumínium-szilikátok részlegesen kausztifikálódnak és ezáltal a kötött Na_2O veszteség kb. 20%-kal csökkenthető [48].

A kutatómunkám e szakaszában a CaO és $\text{Ca}(\text{OH})_2$ őrlhetőségre gyakorolt hatását vizsgáltam. Ennek érdekében adalékanyagos és anélküli nagyhőmérsékletű őrlhetőségi kísérleteket folytattam le az Univerzális Hardgrove malommal.

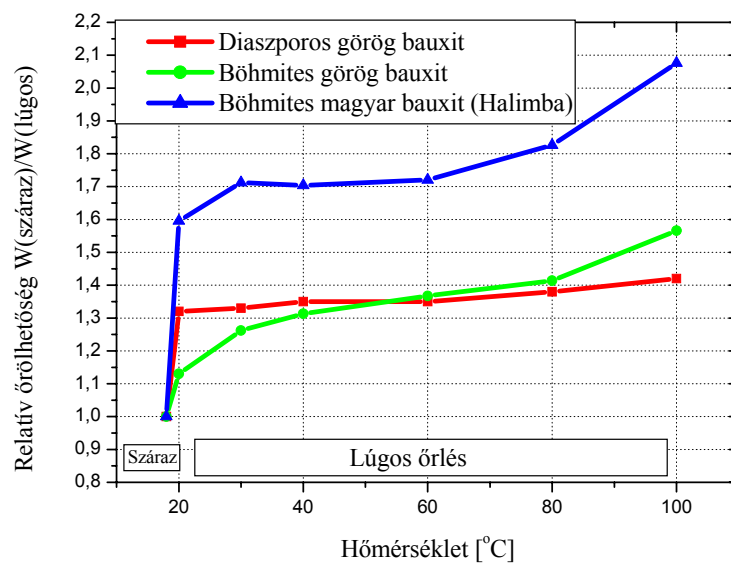
A mérési procedúra jelen esetben annyiban tér el a 4.3. fejezetben ismertetettől, hogy a bauxit tömegére vonatkoztatva 2-4 % adalékanyagot keverünk a feladáshoz. Az őrlési adalékanyag a böhmities (magyar és görög) bauxitok esetében 2% és a diaszporosnál pedig 4% (görög) CaO vagy $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por, amelynek maximális szemcsemérete $<75\ \mu\text{m}$ volt. Erre a kritériumra az őrlés utáni szitálási eredmény kiértékelése miatt van szükség, ugyanis ez befolyásolhatja a képződött finom rész mennyiségét.

Az üzemi gyakorlatnak megfelelően csak a 3 karszt bauxit esetében alkalmaztam mészes adalékanyagot az őrlhetőségi vizsgálat során. A 5.4. és 5.5. ábrán figyelemmel követhetjük abszolút és relatív őrlhetőségét.



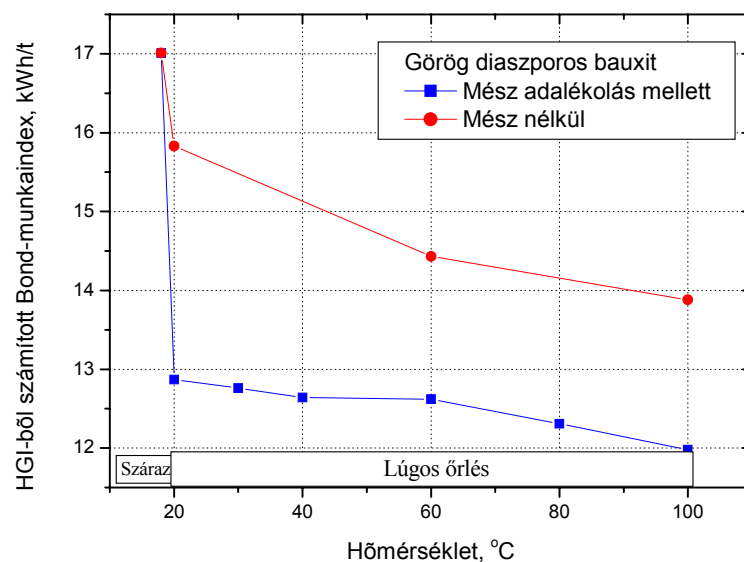
5.4. ábra: Számított Bond-munkaindex hőmérséklet függése CaO alkalmazása mellett

A mészes adalék egyes bauxit típusok őrlhetőségére gyakorolt hatását az 5.6 - 5.8. ábrákon követhetjük figyelemmel úgy, hogy összevetjük a CaO-val és anélkül kapott Bond-munkaindexeket.

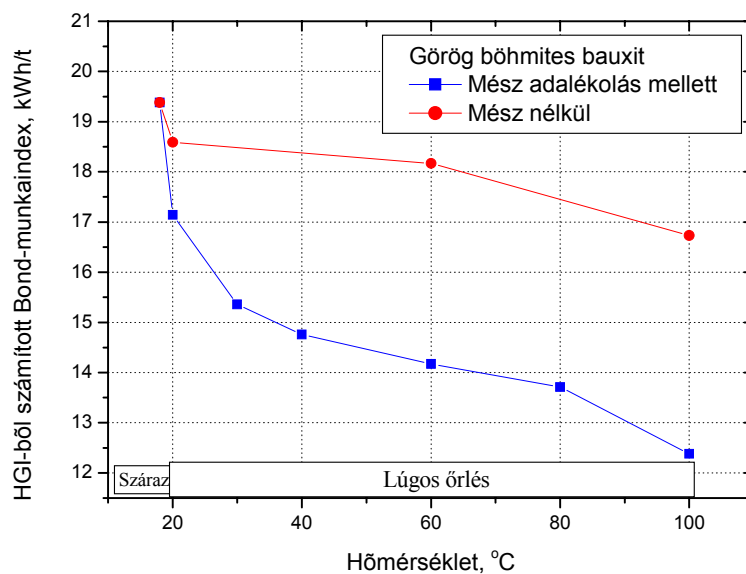


5.5. ábra: Relatív őrlhetőség hőmérséklet függése
CaO alkalmazása mellett

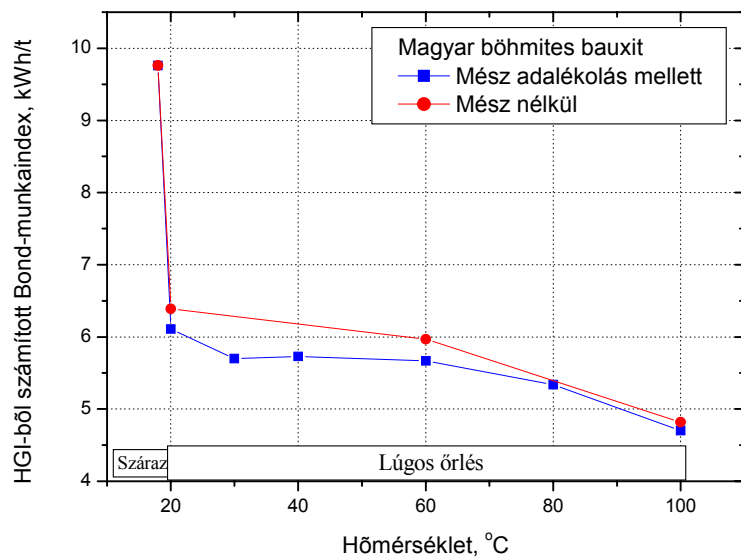
A következő diagramok szemléltetik a mész hatását az egyes minták Bond-munkaindexére.



5.6. ábra: CaO hatása a számított Bond-munkaindexre
a hőmérséklet függvényében görög diaszporos bauxit esetén

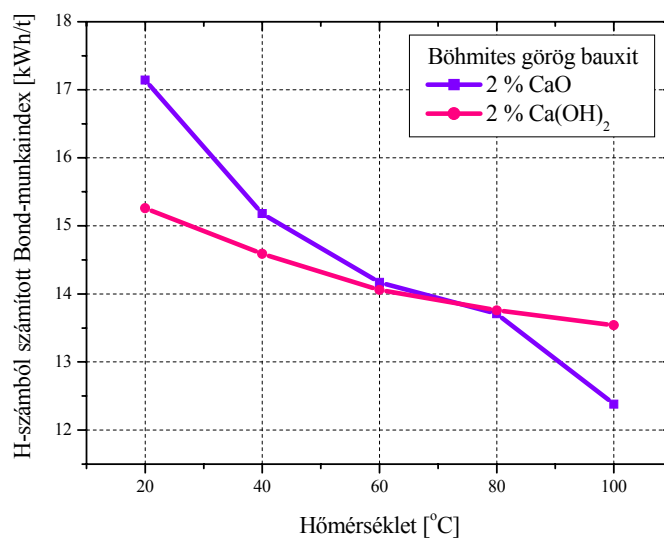


5.7. ábra: *CaO hatása a számított Bond-munkaindexre a hőmérséklet függvényében görög böhmities bauxit esetében*

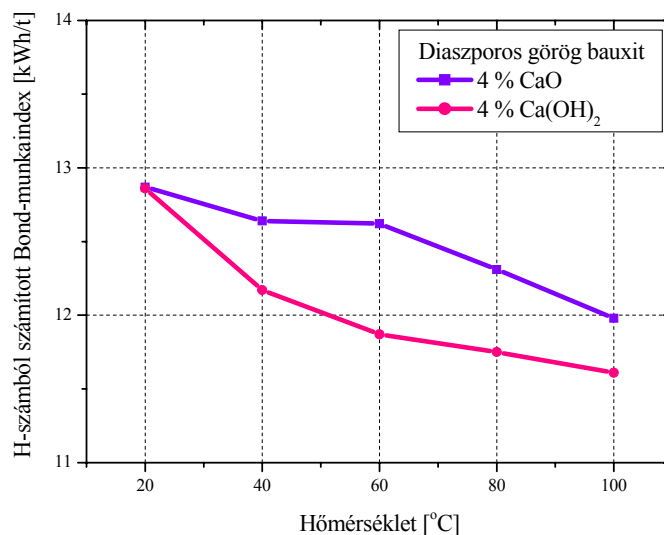


5.8. ábra: *CaO hatása a számított Bond-munkaindexre a hőmérséklet függvényében magyar böhmities bauxit esetében*

A további kísérletek célja kétféle segédanyag, úm. az égetett mész (CaO) és az oltott mész (Ca(OH)_2) őrlhetőségre gyakorolt hatásának vizsgálata volt a görög diaszporos és böhmities bauxitokra nézve.



5.9. ábra: CaO és Ca(OH)_2 böhmities görög bauxit őrlhetőségére gyakorolt hatása



5.10. ábra: CaO és Ca(OH)_2 diaszporos görög bauxit őrlhetőségére gyakorolt hatása

A mérési eredmények alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- A fajlagos őrlési energia drasztikusan csökkenthető a magas őrlési hőmérsékleten túl a CaO vagy Ca(OH)_2 segédanyag alkalmazásával.
- A görög diaszporos bauxitnál megfigyelt párhuzamos lefutású görbék közül látható, hogy a hirtelen bekövetkezett munkaindex csökkenés után azonos mértékben javul az őrlhetőség CaO-val és anélkül (5.6. ábra).
- A nagyobb kaolinit-tartalmú görög böhmite bauxit esetében a hőmérséklet emelkedésével fokozódik a CaO őrlést elősegítő hatása, ennek magyarázata lehet az, hogy a kaolinit-CaO reakciója intenzívebbé válik (5.7. ábra).
- A laza szerkezetű – viszonylag jó minőségű – magyar (kiseb kaolinit tartalmú) böhmite halimbai bauxitnál nem tapasztalható a mész jelentős hatása, a görbék szinte együtt futnak (5.8. ábra).
- A böhmite görög bauxit (CaO: 2,8 %, SiO_2 : 4,7 %) esetében alkalmazott adalékanyagok összehasonlítása során a 5.9. ábrán látható, hogy a reaktívabb Ca(OH)_2 őrlhetőség javító szerepe kezdetben jelentősebb, mint a CaO-é. A 80 °C-os hőmérséklet elérésekor azonban ez a hatás kiegyenlítődik, majd 100 °C-nál a CaO bizonyul jobbnak az őrlési energiaigény csökkentése tekintetében. Ez a CaO beoldódásával magyarázható.
- A diaszporos bauxitnál (CaO: 0,4 %, SiO_2 : 1,9 %) viszont a kezdeti 20 °C-os kísérletek esetében közel azonos Bond-munkaindex adódott (5.10. ábra). A hőmérséklet növekedésével, pedig a két adalékanyag őrlhetőséget befolyásoló hatása közötti különbség növekszik, mégpedig a Ca(OH)_2 javára, egészen a 60 °C eléréséig, ezután ugyanis csökkent a differencia.

6. Őrlhetőségi vizsgálatok továbbfejlesztése az őrlésre fordított munka közvetlen módon történő mérésével

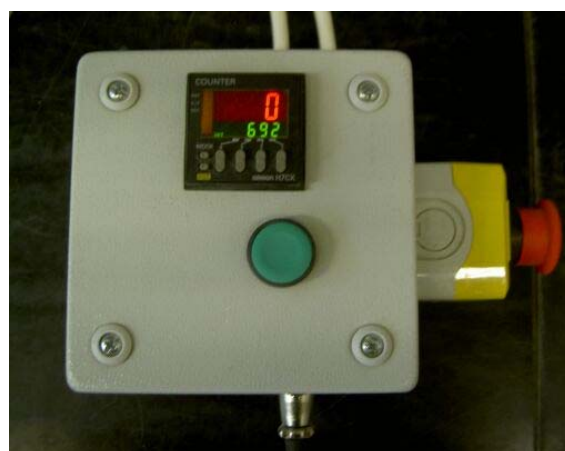
Ahogy az értekezés bevezető részében már kifejtettem, a kutatómunka másik tématerületének célja a Bond- és Hardgrove-eljárások és a hozzá tartozó berendezések olyan jellegű továbbfejlesztése, hogy azok alkalmassá váljanak a fajlagos őrlési munka közvetlen módon történő meghatározására, függetlenül az anyag szemcseméret tartományától – amelyek egyébként a hagyományos módszereknél kötöttek.

6.1. A Bond-malom, valamint mérési- és kiértékelési eljárás továbbfejlesztése

Fenti cél elérése érdekében a 4.2. fejezetben bemutatott Bond-malmot alkalmassá tettük a befektetett munka mérésére. Az őrlés során felvett elektromos teljesítményt egy microcomputerrel vezérelt Carlo Gavazzi WM1-DIN típusú digitális energiaméter segítségével mérjük (6.1.a) ábra). Az eszközzel mérhető az I áramerősség, az U feszültség és a $\cos\varphi$, továbbá meghatározható a pillanatnyi $P(t)$ elektromos teljesítmény és az őrléshez szükséges W elektromos munka. Ezen kívül a malmot felszereltük egy fordulatszám-mérő és leállító elektronikával, amelyet a 6.1.b) ábrán figyelhetünk meg.



a)



b)

6.1.a és b ábra: a) Carlo Gavazzi WM1-DIN típusú digitális energiaméter és
b) fordulatszám számláló és leállító elektronika

A 6.1.a) ábrán bemutatott energiaméter az elektromos munkát kumulálva regisztrálja, így az őrlés során végzett munka a végső- és kiindulási érték különbségeként határozható meg. Mivel a teljesítménymérőt a háromfázisú meghajtómotor egyik fázisába illesztettük, ezért a kijelzett értéket szoroznunk kell hárommal.

Mérés végrehajtása:

- A dobmalom és az őrlőgolyók tisztítása után - töltési pozícióban - helyezzük bele a golyókat és a 700 cm^3 mintát az őrlőtérbe, majd zárjuk le azt a malomfedéllel.
- Ezután tegyük a malmot vízszintes helyzetbe, állítsuk be a kívánt fordulatok számát (első lépcsőben általában 100 fordulat), indítsuk el a hajtómotort.

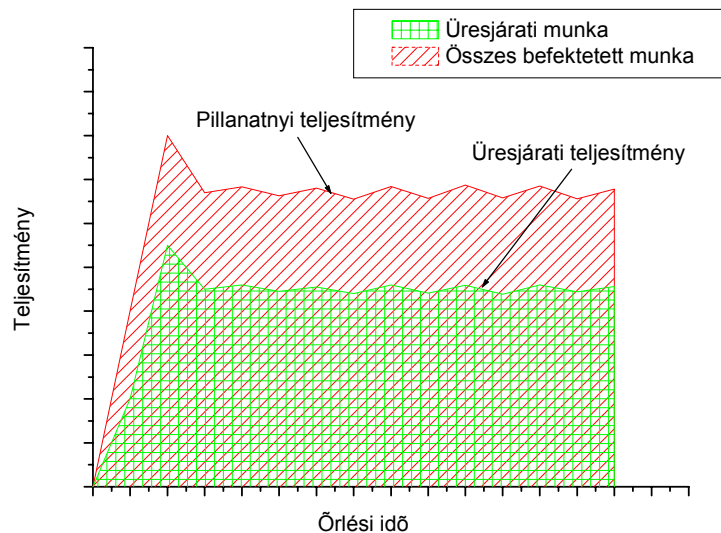
- A 100 fordulat megtétele után a malom automatikusan leáll. Ezt követően jegyezzük le az energiaméter által mért munka értékét és ürítsük ki a malom tartalmát a golyóleválasztó rácsra.
- Tisztítsuk meg a golyókat és az őrlőteret úgy, hogy a lehető legkevesebb veszteséggel gyűjtsük össze az őrleményt a rács alatt elhelyezkedő edényzetben.
- A malmot állítsuk töltési pozícióba és az őrlőtesteket helyezzük vissza a malomba.
- A felfogott anyagot száraz szitálásnak kell alávetni egy 100 (106) μm -es lyukbőségű szitával. Jegyezzük le a tömegeket és a $<100 \mu\text{m}$ -es részt tegyük félre.
- A következő őrlési lépcső fordulatainak számát a Bond által javasolt 2.30. képlettel határozzuk meg.
- Egészítsük ki a $>100 \mu\text{m}$ -es részt a friss feladásból, úgy hogy ismét elérjük a 700 cm^3 -hez tartozó kiindulási tömeget, majd indítsuk el a malmot.
- Az őrlést addig folytatjuk, amíg az utolsó 3 őrlési lépcsőben el nem érjük az állandó G őrlhetőségi koefficiens értéket, azaz a fordulatonként keletkező friss $100 \mu\text{m}$ alatti termék mennyiségének állandóvá válásáig.
- Minden őrlési lépcső után jegyezzük le az őrléshez felhasznált munkát (teljesítményt).
- Végül lézeres szemcseméret elemzővel vagy nedves szitálással meghatározzuk a termék 80 %-os szemcseméretét és a 2.31. képletet felhasználva kiszámítjuk a Bond-munkaindexet.
- Mérjük meg az üresjárási munkát (teljesítményt).

Mérési adatok kiértékelése:

A mérések során mért őrlési munka a következőképpen fejezhető ki:

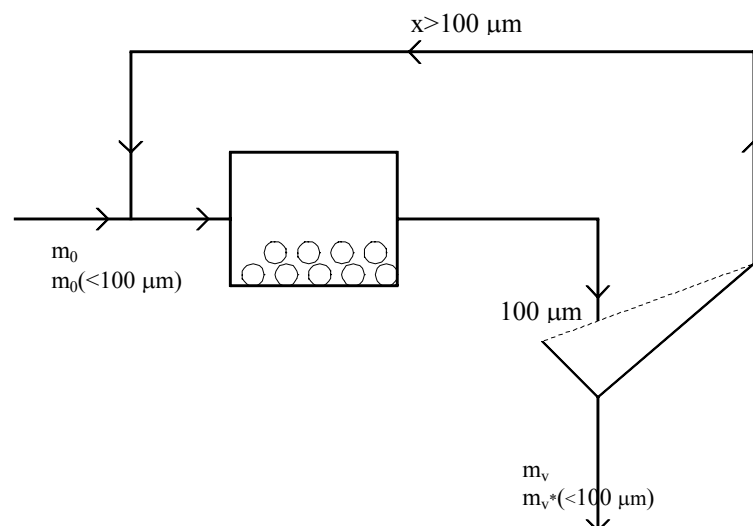
$$W_{\text{őrlési}} = \int (P(t) - P_0) dt \quad (6.1.)$$

ahol $P(t)$ a mért pillanatnyi elektromos teljesítmény és P_0 az üresjárási teljesítmény.



6.2. ábra: Pillanatnyi és üresjárat teljesítmény viszonya

A módszer azon alapszik, hogy amint a hagyományos Bond-vizsgálat során az utolsó három őrlési lépcső G őrlhetőségi koefficiens értéke állandósul, úgy az őrléshez tartozó munka is állandó értéket vesz fel.



6.3. ábra: Egyensúlyi állapot bemutatása körfolyamatos őrlésnél

A 6.3. ábrán szemléltetett egyensúlyi helyzetben az m_0 friss feladás és az m_v végtermék tömege közel megegyezik, állandó értéket vesz fel, akárcsak az N malom fordulatainak száma és a G őrlhetőségi koefficiens. Ez utóbbi a következő módon számítható:

$$G = \frac{m_v^*(<100\mu m)}{N} = \frac{m_v - m_0(<100\mu m)}{N} \quad (6.2.)$$

ahol

$m_0(<100\mu m)$ – a feladásban lévő $100\mu m$ alatti szemcsék tömege,

m_v - a végtermék tömege,

$m_v^*(<100\mu m)$ - a végtermékben lévő őrlés során képződött $100\mu m$ alatti szemcsék tömege.

Egyensúlyi helyzetben a fordulatonkénti őrlési munka (Ws/ford vagy Wh/ford) az N fordulatok számának ismeretében a következő képlet segítségével meghatározható:

$$W^* = \frac{\int (P(t) - P_0) dt}{N} \quad (6.3.)$$

Ezek alapján a fajlagos őrlési munka a következő módon számítható:

$$W_f = \frac{W^*}{G} \quad [\text{Ws/g}] \quad (6.4.)$$

ahol W^* - a fordulatonkénti munkaszükséglet [Ws/ford],

G – őrlhetőségi koefficiens, azaz egységnyi fordulat mellett az őrlés során keletkező friss $< 100\mu m$ -es termék tömege [g/ford].

Ebből a W_{iB} Bond-munkaindex a következő módon számítható:

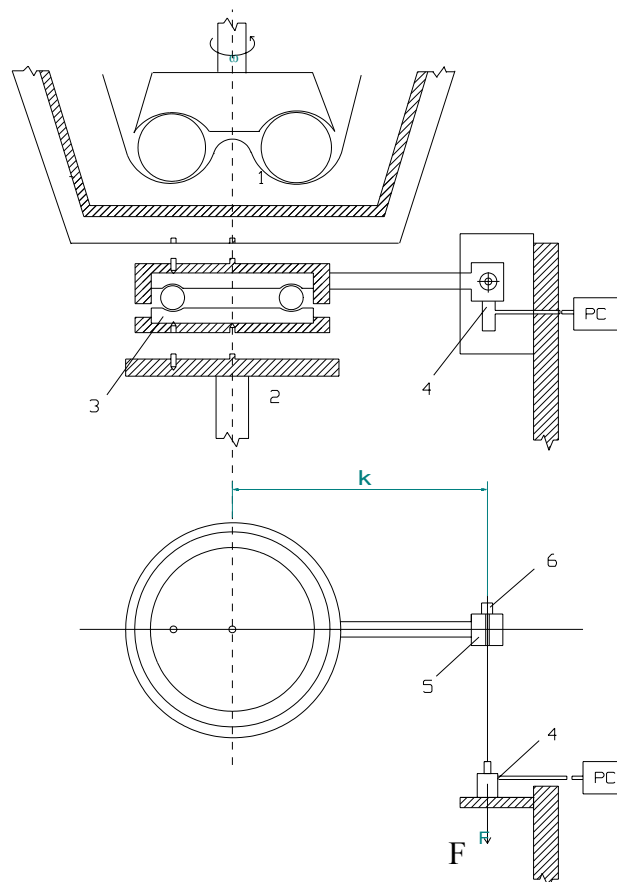
$$W_{iB} = \frac{W_f}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right)} \quad (2.31.)$$

ahol x_{80} és X_{80} a termék és a feladás 80 %-os szemcsemérete.

6.2. A Hardgrove-féle eljárás és malom őrlési munka mérésére történő átalakítása

A Bond-malomhoz hasonlóan a Hardgrove-malmot is teljesítmény mérésére alkalmas eszközzel láttuk el. Mivel ebben az esetben a Hardgrove-malmi csigahajtás energetikailag nagyon veszteséges, valamint a kisebb teljesítményű motor miatt (ami mérési pontatlansághoz vezetne) nem alkalmazhattuk a villamos energia mérését, így az őrlési munka meghatározását nyomaték mérésével oldottuk meg.

Az őrlő nyomaték-mérés eszköze a 6.4. ábrán látható. Az őrlőtér (1) és az emelő-szerkezet (2) között egy axiális csapágy (3) biztosítja az őrlőmalom-test szabad elmozdulását, amelyet felül sem gátol semmi, mivel a malomtest nem ér hozzá a fedélhez. Az (4) erőmérő távadó a berendezés falához van rögzítve. A távadó drótkötéllal csatlakozik a (5) nyomatékmérő karhoz. A drótkötél végén csavarral rögzíthető véglezáró (6) található, amivel a szükséges kötélhossz beállítható, ill. a nyomatékmérő kar végén található nútból kivehető. Ezáltal a nyomatékmérő rendszer könnyen szétszerelhető, az őrlőtér hozzáférhető.



6.4. ábra: Nyomatékmérés eszköze

- 1 – Őrlőtér,
- 2 – emelőszerkezet,
- 3 – axiális csapágy,
- 4 - erőmérő-távadó a nyomaték mérésére (Típus: MOM Kaliber 8964, névleges terhelés: 50N, névleges cellatényező: 2mV/V, be- és kimeneti ellenállás: 353 ohm.),
- 5 – nyomatékmérő kar,
- 6 – véglezáró.

Nyomaték mérése

A csapágyon szabadon elmozduló malomtest elforgását egy nyomatékmérő erőkar akadályozza meg, amely adott hosszúságú k karból, ehhez csatlakozó drótszálból, valamint a drótszál végéhez csatlakozó (a tartószerkezet falához rögzített) erőmérő cellából (4) áll.

Az így mért nyomaték (6.4. ábra):

$$M_1 = kF \quad (6.5.)$$

E nyomaték megegyezik az őrlőgolyókat mozgató őrlőgyűrű forgatórúdjára ható forgatónyomatékkal: $M_1 = M_2$. E tengely szögsebessége ω , így:

$$P = M_2 \omega \quad (6.6.).$$

Az M őrlési nyomaték és a szögsebesség ($\omega = 2\pi n$) ismeretében (ahol $n = 20 \text{ min}^{-1}$) a pillanatnyi őrléshez szükséges teljesítmény számítható. A mérőszámítógép t órajelét felhasználva a mérőprogram az őrlési teljesítmény idő szerinti integrálját, azaz az őrlésre fordított munkát számítja.

Egységnyi tömegű termékre vonatkozó fajlagos őrlési munka tehát:

$$W_s = \frac{\int_0^{\tau} \{2\pi n [M(t) - M_0]\} dt}{m_p} \quad (6.7.)$$

ahol

$M(t)$ - mért nyomaték [Nm];

M_0 – üresjárási nyomaték [Nm];

n - fordulatszám [1/s];

m_p - szitaáthullás (<75 μm végtermék) tömege [g].

A mérés végrehajtása a következő módon történik:

- Helyezzük a golyókat és az elemzési mintát az őrlőtérbe, majd állítsuk a malomtestet mérési pozícióba, úgy hogy a malomfedél ne gátolja az őrlőteret a szabad elmozdulásban.
- Ezután rögzítsük az erőkart a tartószerkezet falához és indítsuk el a malmot, amit céltól függően a kívánt ideig járatunk.
- A „Hardgrove” nevezetű LabWindows programmal a *Set Board*, *Measure* majd *Start* gombok megnyomásával tudjuk elindítani az őrlési nyomatékot mérő és regisztráló programot.
- Leállás után feljegyezzük az őrlés során befektetett munkát (amit a számítógép számol a mért nyomaték és az eltelt idő alapján), majd eltávolítjuk az őrlőtérből a mintaanyagot és a golyókat.
- Az őrleményt szitáljuk le 75 μm -es szitán és mérjük meg a finom termék tömegét. A tömegmérés pontossága 0,01 g. A szitálás megengedett tömegvesztesége 0,75 g. Amennyiben a tömegveszteség meghaladja az előírt értéket, a mérést meg kell ismételni.
- Finomőrlés esetében végezzünk részletes szemcseméret-eloszlás vizsgálatot.
- Célszerű minimum két párhuzamos mérés elvégzése. A két mérés eredménye közötti eltérés nem haladhatja meg a 3%-ot.

A Bond-eljáráshoz hasonlóan ebben az esetben is a keletkezett finom rész (<75 μm) tömegét és 80 % os szemcseméretét vesszük alapul a Bond-munkaindex számításához:

$$W_{iB}^* = \frac{W_s}{10 \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right)} \quad (6.8.)$$

ahol x_{80} a szitaáthullás (<75 μm végtermék) és X_{80} pedig a feladás (600...1200 μm) 80 %-os szemcsemérete.

6.3. Hagyományos és energiamérésen alapuló mérési eredmények összevetése

Mintaanyagok

A fajlagos őrlési munka közvetlen módon történő méréséhez az összetétel és szilárdság szempontjából eltérő tulajdonságú mintákat választottam. Ezek a következők voltak: mészkő, zúzott kavics, zeolit, bazalt és bauxit. A mészkő és a kavics egy kisebb, ill. nagyobb szilárdságú homogén, szinte egyásványos, nem rétegzett megjelenésű kőzet. A bazalt ugyanakkor homogén összetételű és nagy szilárdsággal rendelkezik. Az inhomogén, nem egységes megjelenésű kőzetek közül is egy nagyobb és egy relatíve kisebb szilárdságú kőzetet választottam, a bauxitot és a zeolitot. A modellanyagok származási helyeit és fő összetevőit a 6.1. táblázat tartalmazza.

	Minta	Származási hely	Fő összetevők
1.	Mészkő	Miskolc-Tapolca	CaCO ₃ tartalom: 95 %
2.	Zúzott kavics (0/4)	Nyékládháza	Kvarc tartalom: 86 %
3.	Bazalt	Uzsa	olivin, piroxén, plagioklász
4.	Bauxit	Görögország	Böhmít, diaszpor: 57 % Kvarc < 2,5 % Kalcit < 0,8%
5.	Zeolit	Mád	Montmorillonit: ~30-40 % Klinoptilolit: ~40 % Devitrifikált vulkáni üveg: ~20-30%

6. 1. táblázat: *Mintaanyagok származási helyei és fő összetevői*

Mérések és mérési eredmények

A kísérletek első szakaszában hagyományos Bond- és Hardgrove-kísérleteket végeztem az előírt feladási szemcseméret, és végtermék leválasztási szemcseméret alkalmazása mellett. Majd a korábban – a 6.1. és 6.2. fejezetben- bemutatott módszerekkel direkt módon történő munkamérésen alapuló őrlhetőségi vizsgálatokat végeztem párhuzamosan mind a Bond, mind pedig a Hardgrove malommal. A Bond-malommal nyert őrlhetőségi mutatókat a 6.2. táblázat tartalmazza.

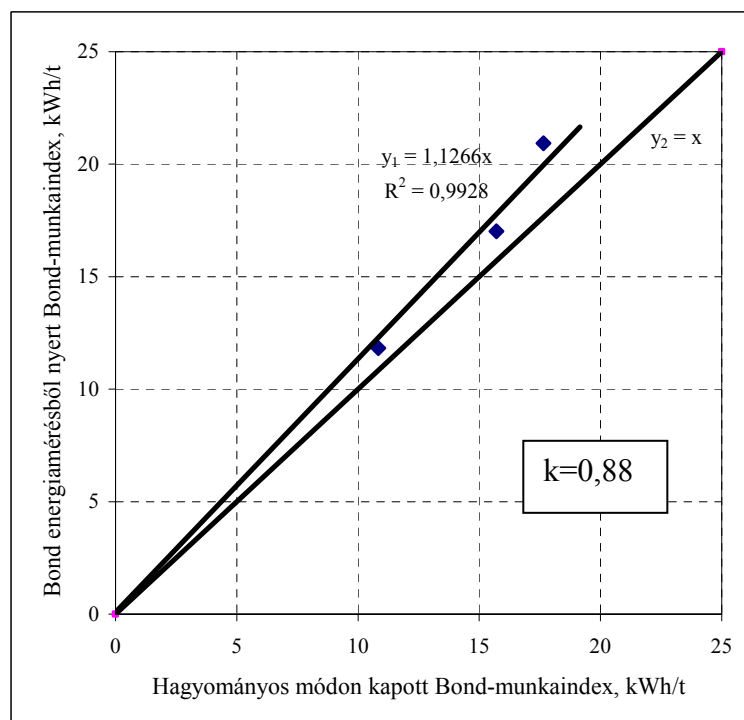
A hagyományos Bond-munkaindexet a 2.29. képlet segítségével határoztam meg.

	Minta	Bond-malom		Hagyományos Bond-eljáráshoz viszonyított relatív eltérés [%]
		Hagyományos	Teljesítménymérés	
	Feladási szemcseméret	< 3,36 mm		
	Termék max. szemcsemérete	106 µm		
Bond-munkaindex, W_{iB} [kWh/t]	Mészke	10,84	11,82	+9,04
	Tört kavics	15,71	17,02	+8,34
	Zeolit	11,05	-	-
	Bazalt	18,65	-	-
	Bauxit	17,65	20,93	+18,58

6.2. táblázat: Bond-féle golyósmalommal meghatározott Bond-munkaindexek

A következő 6.5., 6.6., és 6.7. korrelációs diagramon az ordinátán ábrázoltam az energiamérés elvén meghatározott, az abszcisszán pedig a hagyományos módon kapott Bond-munkaindexet. A mért pontokra illesztett egyenes $y_1 = m_1 x$ iránytangensének és a 45°-os egyenes $y_2 = x$ iránytangensének hányadosa a korrekciós tényező:

$$k = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{m_1} \quad (6.9.)$$



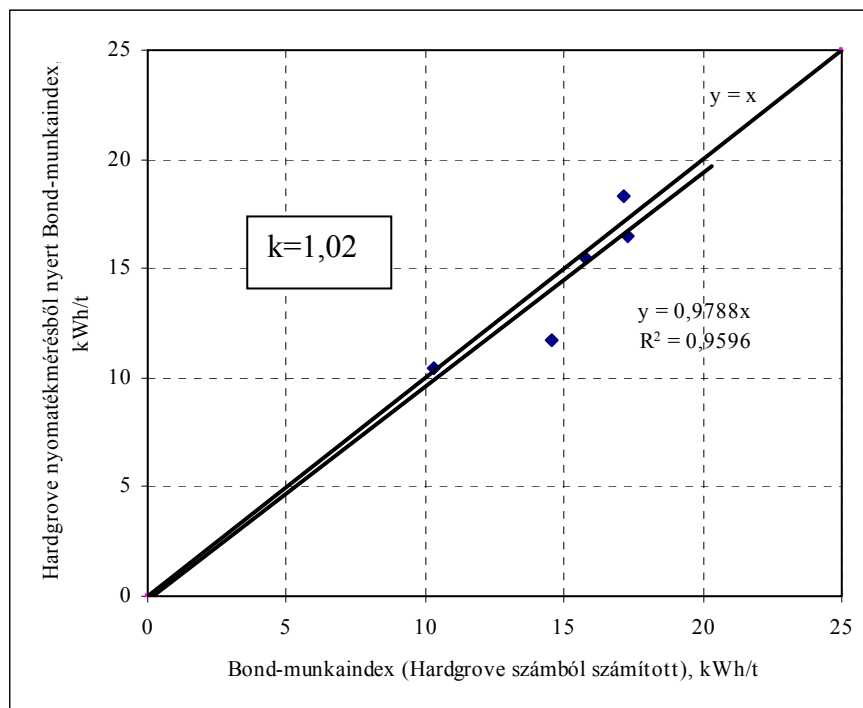
6.5. ábra: Bond-malommal különböző módon meghatározott Bond-munkaindexek korrelációs diagramja

A 6.3. táblázatban és 6.6. ábrán láthatjuk a Hardgrove malommal mért Bond-munkaindexek viszonyát. A Hardgrove-számból becsült Bond-munkaindex értékeket a 2.41. átszámítási képlettel határoztam meg.

$$HGI = 13 + 6,93m_{74} \qquad W_{iB} = \frac{468}{HGI^{0,82}}$$

	Minta	Univerzális Hardgrove Malom		Hagyományos
		Hagyományos	Nyomatékmérésből származó	Bond-eljáráshoz viszonyított relatív eltérés [%]
	Feladási szemcseméret	0,6...1,18 mm		
	Termék max. szemcsemérete	75 μm		
Bond-munkaindex, W_{iB} [kWh/t]	Mészke	10,29	10,47 $x_{80}=58\mu\text{m}$, $X_{80}=1063\mu\text{m}$	+1,75
	Tört kavics	17,3	16,48 $x_{80}=57\mu\text{m}$, $X_{80}=998\mu\text{m}$	-4,74
	Zeolit	14,56	11,72	-19,5
	Bazalt	17,14	18,31 $x_{80}=63\mu\text{m}$, $X_{80}=1060\mu\text{m}$	+6,83
	Bauxit	15,81	15,44 $x_{80}=61\mu\text{m}$, $X_{80}=1020\mu\text{m}$	+2,34

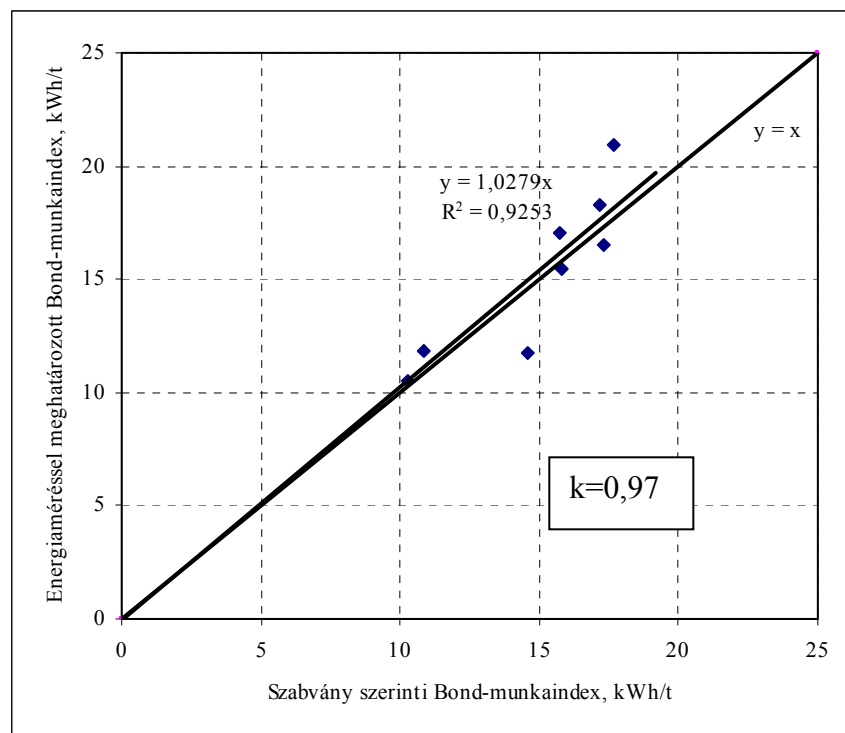
6.3. táblázat: Hardgrove-féle malommal meghatározott Bond-munkaindexek



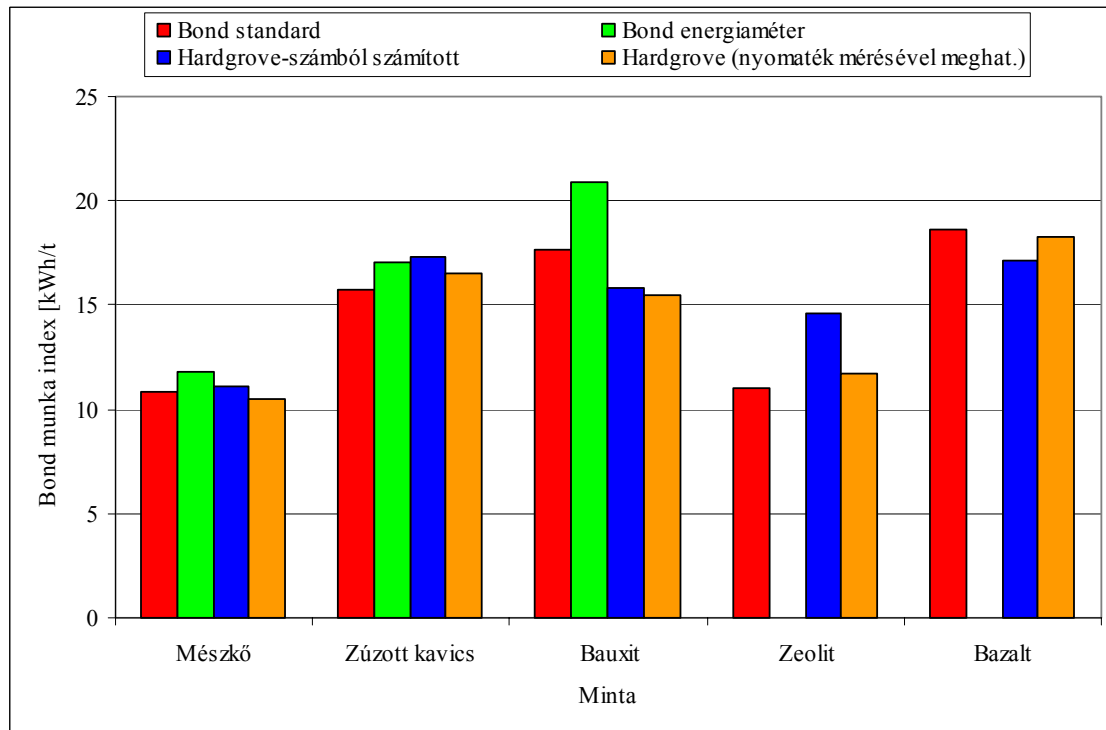
6.6. ábra: *Hardgrove-malommal különböző módon meghatározott Bond-munkaindexek korrelációs diagramja*

Ahogy azt a 6.5. és 6.6. ábrán megfigyelhetjük a Bond-malommal végzett kísérletekhez képest kisebb mértékű korrekcióra van szükség a Hardgrove malom esetében. Az inhomogén szövetszerkezetű zeolit kivételével jó egyezést tapasztaltam a két módszer között (relatív eltérés -4,74...+6,83 % közötti volt).

A 6.7. és 6.8. ábrákon mind a hagyományos, mind pedig az új kifejlesztett módszerrel kapott Bond-munkaindex eredményeket ábrázoltam.



6.7. ábra: Bond- és Hardgrove-malommal különböző módon meghatározott Bond-munkaindexek összesített korrelációs diagramja



6.8. ábra: Bond-munkaindex értékek összehasonlítása

A hagyományos módszerek hiányossága, hogy mind a Bond- és mind a Hardgrove-eljárás során a feladás és a végtermék szemcseméretét alapul véve, egy empirikus összefüggést felhasználva határozzuk meg a vizsgált anyag őrlhetőségét, azaz a Bond-munkaindexet (kWh t^{-1} -ban) és a HGI értékét (dimenzió nélküli szám). Ez utóbbiból szintén egy tapasztalati képletet alkalmazva becsülhető a Bond-munkaindex.

A kísérleti eredményekből megállapítható, hogy:

- A kapott mérési eredmények igazolták, hogy a Bond-munkaindex meghatározható az energiamérésen alapuló módszerekkel.
- A különböző őrlhetőségi eljárások különböző pontossággal alkalmazhatóak.
- A módszerek közötti jó korreláció igazolja a kifejlesztett eljárások alkalmazhatóságát.
- Egymásba átszámíthatóak:

$$W_{i,B}^{\text{szabványos}} = 0,97 W_{i,B}^{\text{energiamérés}} \quad (6.10.)$$

- - A Hardgrove malom esetében kisebb mértékű „*átszámítási tényezőre*” van szükség a hagyományos és az energiamérés módszerek között:

$$W_{i,B}^{H,\text{szabv}} = 1,02 W_{i,B}^{H,\text{nyomatékmérés}} \quad (6.11.)$$

- Az átszámítási tényező mértéke függ a vizsgált kőzettől. A teljesítményméréssel történő Bond- ill. Hardgrove- méréssel nyert Bond-munkaindexek relatív eltérése az inhomogénebb szövetű bauxit és a zeolit esetében a legnagyobb (+18,58 %, -19,5 %), legkisebbek az eltérések a homogénebb szövetű mészkő, kavics és bazalt esetében.
- A teljesítményméréssel történő Bond-méréssel nyert ún. „üzemi” Bond-munkaindexek pedig rendre nagyobbra adódtak, mint a hagyományos módon kapott munkaindexek.
- A hagyományos módon nyert Bond-munkaindex és a nyomatékmérésből származó Univerzális Hardgrove malmi kísérlettel meghatározott „munkaindex” közötti relatív különbség -3,4...+6,06 % -ra adódott, ha az inhomogén szövetszerkezetű bauxit mintát nem vesszük számításba.
- Bond-munkaindex és a Hardgrove őrlhetőségi mutatóból számított (2.38.) érték közötti relatív különbség pedig -8,1...+24,1 % volt. A Bond által javasolt eredeti

átszámítási képletet (2.34.) használva ez a különbség nagyobbra adódott (-16,71...+22,53 % tartományban változott).

- Ha a mai napig legszélesebb körben használt és elfogadott hagyományos Bond-munkaindexet elfogadjuk egy referencia értéknek az anyagok őrlhetőségének jellemzésére és malmok méretezéséhez, akkor kijelenthető, hogy a vizsgált 3 alternatív munkaindex meghatározási módszer közül a nyomaték mérésen alapuló Univerzális Hardgrove malmi eljárás vezetett a legmegbízhatóbb eredményhez.

6.4. Körfolyamatos energiamérésen alapuló őrlhetőségi vizsgálati eljárás kifejlesztése

A Hardgrove-vizsgálat, szemben a Bond-vizsgálati eljárással nem körfolyamatos egyensúlyi helyzetben elért eredmények értékelésén alapul, hanem egyetlen őrlésen, körfolyamat és egyensúly nélkül. Az energiamérés, de különösen a fajlagos energiaigény megállapítása megköveteli, hogy a felhasznált energián túl, a végtermék mennyisége is meghatározott, őrlési egyensúlyi helyzetbe megállapított legyen.

Ez okok miatt és a Bond-malmi őrléssel való korrektebb összevetés miatt is, szükségessé vált a körfolyamatos őrlési vizsgálat kialakítása az Univerzális Hardgrove malommal történő vizsgálatra is.

Az előzőekben bebizonyítottuk a szakaszos üzemű Hardgrove-malom nyomaték mérés elvén történő fajlagos őrlési munka és Bond-munkaindex meghatározására való alkalmasságát. Jelen fejezetben pedig a Bond-kísérlethez hasonló mérési körülmények mellett elvégzett „körfolyamatos” Univerzális Hardgrove malmi mérési eredmények kerülnek bemutatásra.

A vizsgálatot a Bond-eljárással való összevethetőség okán, az ott megkövetelt szemcseméretű (0...3,15 mm) feladással végeztem. Az ellenőrző szita nyílásmérete 106 µm-es volt. Az egyenként 60 fordulatig végzett őrlést az egyensúly beálltaig folytattam úgy, hogy minden őrlést követően a <106 µm-es részt kiszitáltam és a kiszitált finom termékkel azonos tömegű friss anyaggal pótolni. A feladás mennyisége minden esetben 50 g volt.

Az egyensúlyi helyzetnek azt az állapotot tekintetem, amikor a két egymást követő utolsó mérésnél a felhasznált energia - eltérés max. 0,1 % volt, a < 106 µm-es végtermék mennyisége egymástól már nem változott.

A mérési eredmények kiértékelése a következő tömeg és munka értékek mérésével történt:

- m_{v60} : a végtermék tömege az egyensúlyi helyzetben,
- $m_{0,60}^*$: a friss feladással bevitt <106 µm-es szemcsék tömege,
- W_{60} (mért) egyensúlyi helyzetben 60 fordulatnyi őrlés alatt befektetett munka.

Ezeket felhasználva meghatározható az egy fordulatra vonatkozó munka:

$$W_{1/60} = \frac{W_{60}}{60} \quad (6.12.)$$

és az egy fordulattal képződött végtermék tömege

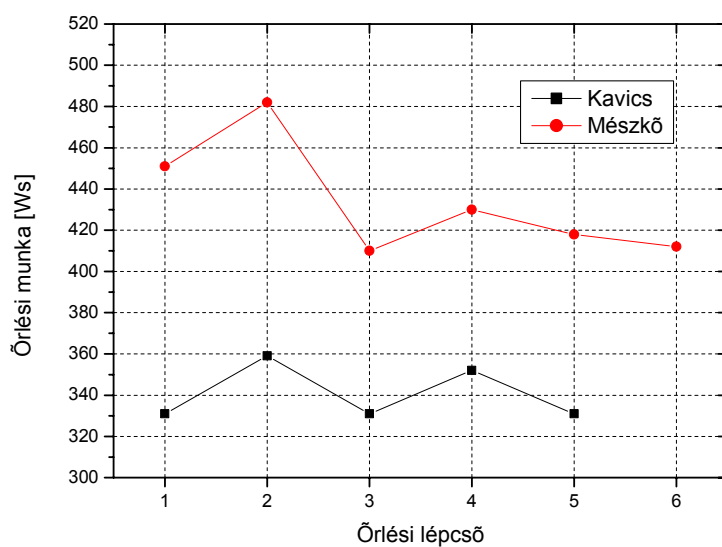
$$m_{1/60} = \frac{m_{v60} - m_{0,60}^*}{60} \quad (6.13.)$$

$$\text{Így a fajlagos őrlési munka számítható: } W_f = \frac{W_{1/60}}{m_{1/60}} \quad (6.14.)$$

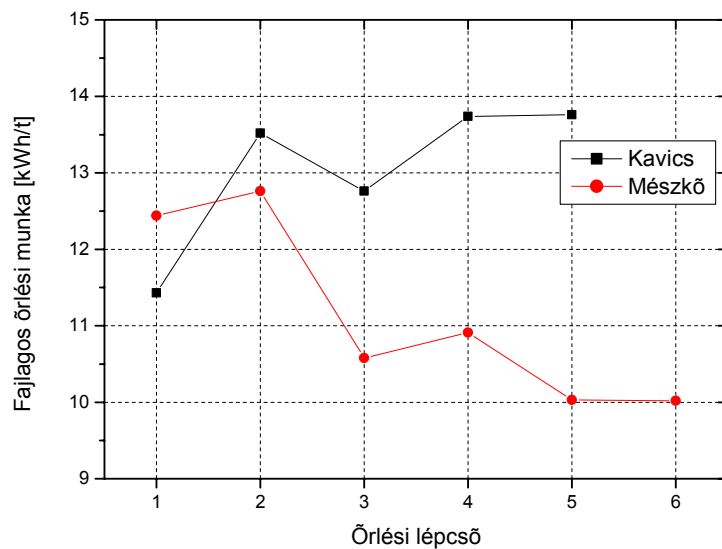
	Őrlési lépcső	1	2	3	4	5	6
Tört kavics	m [g]	8,045	7,374	7,203	7,118	6,681	-
	W [Ws]	331	359	331	352	331	-
	Fajlagos őrlési munka [kWh/t]	11,43	13,52	12,76	13,74	13,76	-
	Őrlési lépcső	1	2	3	4	5	6
Mészke	m [g]	10,07	10,49	10,76	10,95	11,58	11,42
	W [Ws]	451	482	410	430	418	412
	Fajlagos őrlési munka [kWh/t]	12,44	12,76	10,58	10,91	10,03	10,02

6.4. táblázat: Tört kavics és mészke fajlagos őrlési munkaigénye
körfolyamatos őrlés esetében

A részletes mérési eredmények a 6.4. táblázatban találhatók. Az őrlési munka mért értékeit a 6.9. ábrán, az egyes őrlési lépcsőkhöz tartozó fajlagos őrlési munkát pedig a 6.10. ábrán tüntettem fel.



6.9. ábra: Mért őrlési munka változása az egyes őrlési lépcsők során



6.10. ábra: Fajlagos őrlési munka változása az egyes őrlési lépcsők során

A 6.5. táblázatban feltüntettem a hagyományos Bond-malmi és három különböző Hardgrove –malmi módszerrel meghatározott Bond-munkaindexeket, zárójelben a hagyományos eljárásból származó értékhez képesti relatív eltérést.

<i>Minta</i>	<i>Bond-malom</i>	<i>Hardgrove-malom</i>		
	<i>Hagyományos Bond</i>	<i>H számából számított - W_B^H</i>	<i>Hardgrove szakaszos nyomatékmérés $W_{B,sz}^{HE}$</i>	<i>Hardgrove körfolyamatos nyomatékmérés $W_{B,k}^{HE}$</i>
	<i>Bond-munkaindex, kWh/t</i>			
<i>Mészke</i>	10,84	10,29 (5,07 %)	10,47 (3,41 %)	10,58 (2,40 %)
<i>Tört kavics</i>	15,71	17,3 (10,12 %)	16,48 (4,90 %)	14,86 (5,41 %)

6.5. táblázat: *Különböző módon nyert Bond-munkaindexek összehasonlítása*

A kapott kísérleti eredménye alapján a következő megállapításokat teszem:

- A kezdeti fluktuáció után a fajlagos őrlési munka egy állandó értéket vesz fel, ahogy ezt a 6.10. ábra mutatja.
- Mind a szakaszos, mind pedig a körfolyamatos nyomatékmérés elvén működő módszerrel pontosabb Bond-munkaindexet kaptunk, mint a Hardgrove-számból tapasztalati képlettel számított érték.
- A nyomatékmérés alapján meghatározott szakaszos és körfolyamatos Hardgrove-malmi kísérletekkel kapott munkaindexek közel azonos mértékű eltérést mutatnak a hagyományos Bond-módszerhez viszonyítva (lásd 6.5. táblázat).
- A mérési pontosság tehát a fent leírt módon elvégzett kísérleti eredmények alapján nem javult számottevően a körfolyamatos őrléssel.

7. A közvetlen energiamérésen alapuló őrlhetőségi vizsgálati eljárások gyakorlati alkalmazása

Ahogy a bevezetésben olvashattuk, munkám egyik fő célja a hagyományos őrlhetőségi vizsgálatok továbbfejlesztése az előírtnál finomabb feladású anyagok őrlésére.

Az előzőekben (6. fejezet) láthattuk, hogy a munkám során kifejlesztett energiamérés elvén alapuló őrlhetőségi vizsgálatok alkalmasak a hagyományos feladási szemcseméretű rideg anyagok őrlhetőségének meghatározására.

E fejezetben az ipari golyósmalmi őrlési adatokat felhasználva bizonyítom a kialakított eljárás alkalmazhatóságát a finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségének jellemzésére.

Mivel ezekben az esetekben nincs lehetőség a Bond-munkaindex meghatározására, ezért a fajlagos őrlési munkát célszerű mérni.

7.1. Nagy finomságú őrlmények őrlhetőségének meghatározása

A különleges finom őrlmények előállításának fajlagos őrlési energiaigényét timföld és erőműi pernye mintákon végrehajtott kísérletek során vizsgáltam. A pernye esetében három különböző laboratóriumi malommal, a timföld mintával pedig ezeken túlmenően üzemi golyósmalommal is végeztem méréseket.

Mérések leírása

A laboratóriumi kísérletek során három különböző módon határoztam meg ugyanazon anyag fajlagos őrlési energiáját: 1. Bond-malommal és 2. keverőmalommal elektromos teljesítménymérés elvén, továbbá 3. Hardgrove-malommal nyomatékméréssel.

A méréseket a következő körülmények között hajtottam végre:

1. Bond-malom: A hagyományos Bond-féle őrlőgolyó összetételt (20,1 kg) alkalmazva különböző őrlési idő (5, 10, 30, 60 és 100 min) mellett folytattam le a szakaszos üzemi vizsgálatokat a 700 cm³ térfogatú mintán. A malom fordulatszáma szintén a Bond által megadott 70 min⁻¹ volt, ami a Ø305 mm-es dobmalom kritikus fordulatszámának 90 %-a. A

mérések alatt az őrléshez felhasznált munkát a korábban (6.1. fejezetben) bemutatott eszközzel és módon mértem, amelyből kiszámítottam a fajlagos őrlési munkát.

2. Keverőmalom: Az eredmények minél szélesebb körben történő összevetése érdekében a finomőrlési tartományban nagyobb őrlési hatékonysággal üzemelő keverőmalommal is végeztem kísérleteket.



(a)



(b)

7.1. ábra: a) Keverőmalom és b) Frekvenciaváltó, energiaméter fényképe

A kísérletekhez használt Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet által kifejlesztett vertikális helyzetű szakaszos üzemű keverőmalom a 7.1. ábrán látható [95]. A köpenyhűtéssel (fűtéssel) rendelkező malom gépi és üzemi paraméterei a következők:

- Mérete: $\varnothing 200 \times 160$ mm, $V = 5$ dm³,
- Őrlőgolyók mérete: 2 mm (anyaga korund),
- Perforált keverőtárcsák kerületi sebessége: $v = 7,5$ m/s,
- Motor névleges teljesítménye: $P = 2,2$ kW,
- Malom töltési foka: $\varphi = 40$ %.

A kívánt fordulatszám frekvenciaváltóval állítható be. A fűthető őrlőtér pozicionálása érdekében egy elektro-mechanikus mozgatószerkezetet építettünk be. Továbbá a kritikus tengelytömítést egy kerámia-szén csúszógyűrű látja el.

A mérés első lépéseként a kitisztított malomtérbe töltöttem az őrlőtesteket és az őrlendő anyagot, amely a golyók közötti pórust 100 %-osan töltötte ki ($V=380 \text{ cm}^3$). Ezután a gumitömítéssel ellátott fedéllel lezártam a malmot és működési pozícióba állítottam (180° -kal elforgatva). Ennek az az előnye, hogy őrlés közben a statikus fedéltömítést tesszük ki nagyobb igénybevételnek, szemben a sokkal érzékenyebb tengelytömítéssel.

Ezután a frekvenciaváltó segítségével beállítjuk a kívánt frekvenciát (kerületi sebességet) és elindítjuk a malmot. Őrlés közben folyamatosan mérjük az elektromos teljesítményt és munkát.

Az őrlés befejezését követően egy edénybe ürítjük az őrlőgolyókat és az őrleményt, majd egy 1 mm lyukbőségű szita és egy ecset segítségével megtisztítjuk a golyókat, így megkapjuk a malomterméket, amelyet szemcseméret-eloszlás vizsgálatnak vetünk alá. A mért munka és a feladott anyag tömegének hányadosaként pedig meghatározzuk a fajlagos őrlési energiaigényt.

3. Hardgrove-malom: Szintén szakaszos üzemű őrlési kísérleteket folytattam le az átalakított Hardgrove-malommal is, ahol az őrlési idő 12, 24, 36, 78 és 120 min volt. A mérések során 50 g finom szemcseméretű anyagot adtam fel a malomra, amelyet 8 db $\varnothing 25,4$ mm-es vasgolyó őrlött 290N terhelés mellett. A fajlagos őrlési munkát a 6.2. fejezetben ismertetett nyomatókmérés elvén határoztam meg.

7.1.1. Timföld őrlhetősége

A laboratóriumi vizsgálatokhoz szükséges timföld mintát a MAL Zrt. bocsátotta rendelkezésünkre a finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségének vizsgálata céljából. Az anyag 80 %-os szemcsemérete $77,8 \mu\text{m}$, sűrűsége $\sim 4.000 \text{ kg/m}^3$, tisztasága: 99,8 % Al_2O_3 .

Timföld malom

Az üzemi adatok a MAL Zrt. timföldőrlő golyósmalmi kísérleteiből származnak [49]. A dobmalom fő méretei $\varnothing 2 \times 5,8 \text{ m}$ ($L/D=2,88$), ami $V=18,2 \text{ m}^3$ térfogatot jelent. A

kerámiabéléssel ellátott malomban alumínium-oxid őrlőgolyók végzik az aprítást. A feladás kapacitása 1, 2, 3 és 4 t/h volt.

A használt golyótöltet paraméterei a következők voltak:

- méreteloszlása egyenletes, mérete 12...40 mm közötti,
- tömege 14 t, amely kb. 6-7 m³ laza térfogatot jelent.

A malom töltési foka $\sim 40\text{-}45\%$, fordulatszáma pedig $n=21\text{ 1/min}$ volt, ami a kritikus fordulatszám $e = 69\%$ -át jelenti.

A kísérletek alatt zárt körfolyamatban működött az üzem, a mintákat azonban nem az osztályozott termékből, hanem a malomból kilépő anyagáramból vették.



7.2. ábra: Üzemi golyósmalom (MAL Zrt., Ajka)

Az üzemi Bond-munkaindex meghatározásához szükséges meghajtómotor (névleges teljesítménye 240 kW) pillanatnyi elektromos teljesítményét [kW] és a feladás anyagáramát [t/h] folyamatosan mérték.

Mérési eredmények

A timföld minta fajlagos őrlési energiáját az előzőekben bemutatott 4-féle módon, 3 laboratóriumi és egy üzemi malommal elvégzett kísérletekből származó adatokból határoztam meg. A feladás és termék szemcseméret-eloszlását Fritsch Analysette 22 lézeres elemzővel

mértem meg. Az őrlemény medián és a fajlagos őrlési munka eredményeit a 7.1. táblázat tartalmazza és a két paraméter közötti függvénykapcsolatot a 7.3. ábra szemlélteti.

Univerzális Hardgrove malom		Üzemi golyósmalom		Bond-malom (elektromos telj. mérés)	
x_{50} [μm]	W [kWh/t]	x_{50} [μm]	W [kWh/t]	x_{50} [μm]	W [kWh/t]
27,1	1,63	8,4	17	16,55	11,94
9,81	5,72	6	23	7,75	23,87
8,48	10,28	4,5	34	5,75	55,7
8,33	12,78	3,9	68	3,88	87,53
6,83	21,44	-	-	3,39	91,51
5,22	29,61	-	-	-	-

7. 1. táblázat: *Timföld minta üzemi és laboratóriumi fajlagos őrlési munkája és őrleményének medián értéke*

A laboratóriumi Hardgrove-malmi őrlési vizsgálat adatait a 7.2. táblázatban találhatjuk.

Őrlési idő	n (egyenletességi tényező)	x_{50} [μm]	x_{80} [μm]
Timföld feladás	0,584	45,95	77,77
12 min őrlés	1,662	9,81	32,237
24 min	2,007	8,48	28,548
36 min	2,552	8,33	34,206
78 min	2,639	6,83	16,264
120 min	1,033	5,22	9,459

7. 2. táblázat: *Univerzális Hardgrove malmi őrlés „n” egyenletességi tényezője és nevezetes szemcseméretei*

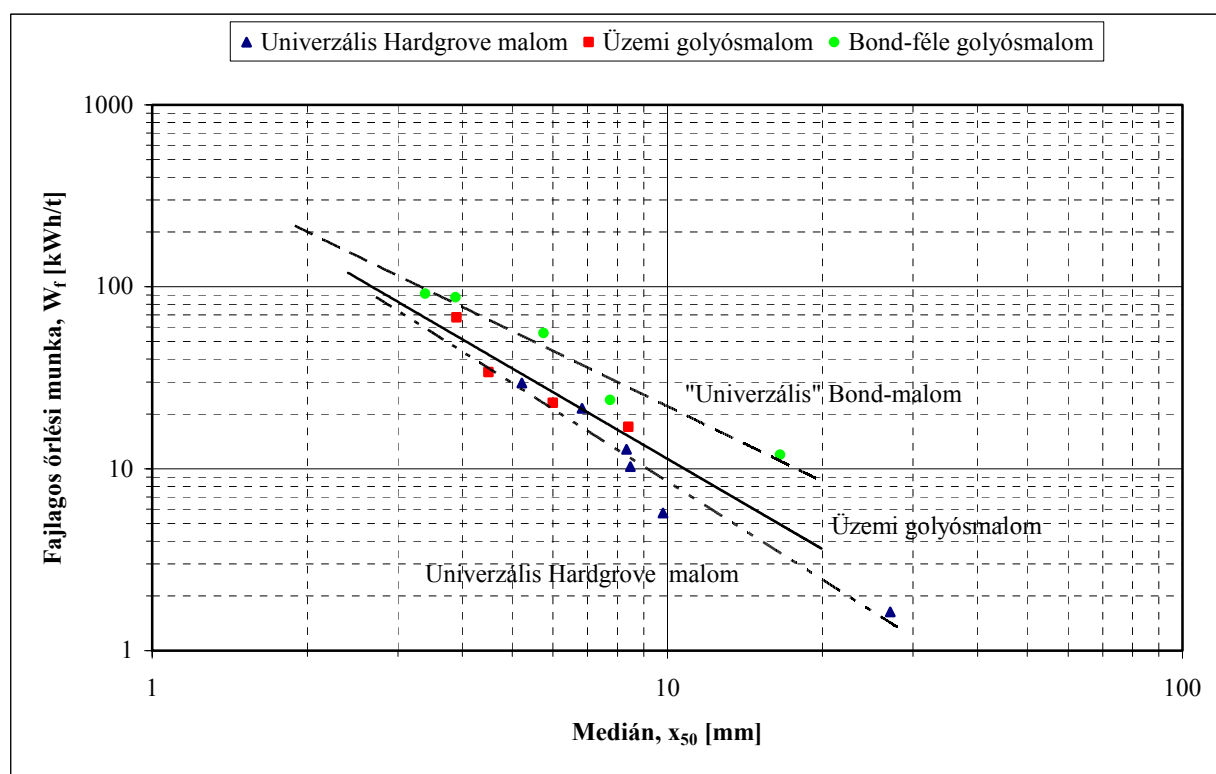
Mivel a finom tartományban a Bond-munkaindex nem értelmezhető, ezért az őrlhetőséget az x_{50} - W_f ill. S - W_f kapcsolattal szokták jellemezni.

Az őrlemény 50 %-os szemcsemérete és a fajlagos őrlési munkaigény értékei közötti kapcsolat hatványfüggvénnyel írható le mind a négy vizsgált esetben egyaránt (7.3. táblázat).

Megállapítható, hogy az üzemi őrlési munkaigény korrekciós tényező alkalmazásával a laboratóriumi kísérletek eredményeiből becsülhető.

A Hardgrove-malmi kísérletek során azt tapasztaltam, hogy (az energiafelhasználással kapcsolatban) a korábbi kísérletekben mért durvább szemcsemérethez viszonyítva a finom anyagok pillanatnyi őrlési munkája a kedvezőbb sűrűlási viszonyoknak köszönhetően kisebb volt.

A teljes őrlési időre vonatkozóan azonban nagyobb őrlési idő és munka mellett a szemcsékben lévő hibahelyek csökkenése miatt a görbe elhajlik, azaz csökken az őrlés hatásossága, vagyis azonos mértékű aprózódáshoz több energia szükséges.



7. 3. ábra: Timföld őrlemény mediánja - x_{50} és fajlagos őrlési munkája – W_f közötti kapcsolat

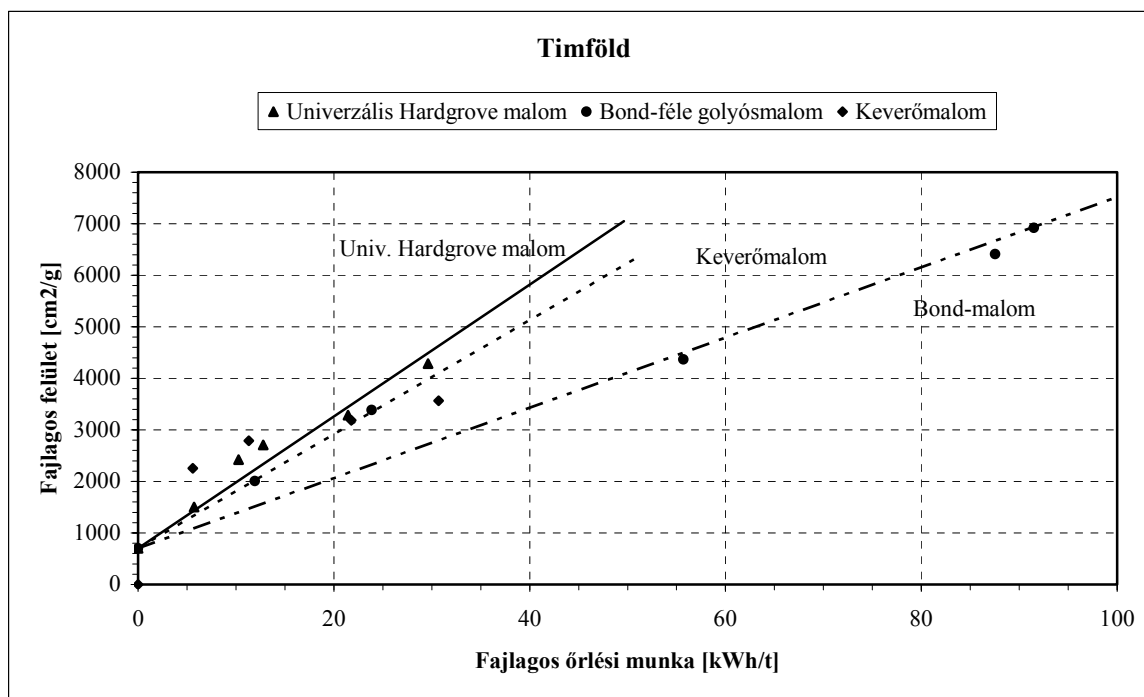
Malomtípus	Függvény	R^2
Univerzális Hardgrove malom	$W_f = 527,22 x_{50}^{-1,7922}$	0,9471
Ipari golyósmalom	$W_f = 505,94 x_{50}^{-1,6494}$	0,8728
Laboratóriumi golyós malom	$W_f = 516,85 x_{50}^{-1,3701}$	0,9625

7.3. táblázat: Timföld őrlésének energia-medián függvényei és korrelációs koefficiensei

Az 7.3. ábrán látható, hogy a mérések szerint a Bond-malommal elvégzett kísérletnek volt a legnagyobb energiaigénye. Ez annak tudható be, hogy az ehhez hasonló kisméretű golyósmalmok nagyon rossz hatásfokkal üzemelnek.

Másrészről az Univerzális Hardgrove malommal lefolytatott energiamérésből származó érték alacsonyabbra adódott, mint az üzemben mért fajlagos energia. Ebben az esetben mindössze egy enyhe korrekció szükséges az ipari adat meghatározásához. Továbbá megállapítható, hogy kb. $7\ \mu\text{m}$ medián alatti tartományban az ipari golyós- és a laboratóriumi Univerzális Hardgrove malmi mérésből származó pontokra illesztett görbék szinte együtt futnak.

Végezetül ugyanazon mintára vonatkozó őrlemény fajlagos felület - fajlagos őrlési munka függvénykapcsolatát tárjuk fel a laboratóriumi mérések adataiból (7.4. ábra).



7. 4. ábra: *Timföld őrlemény számított fajlagos felülete - S és fajlagos őrlési munkája – W_f közötti kapcsolat*

Az őrlemény - egész szemcseméret tartományát reprezentáló - szemcseméret-eloszlásból számított fajlagos felület függvényében ábrázolja a fajlagos őrlési munka változását a 7.4. ábra. A fajlagos felületet a szemcseméret eloszlás adataiból nyertük hatványmódszer segítségével (lásd Melléklet).

Malomtípus	Függvény	R^2
Univerzális Hardgrove malom	$S = 127,93W_{\text{fajl}} + 700,09$	0,9531
Bond-malom	$S = 68,15W_{\text{fajl}} + 700,9$	0,9514
Keverőmalom	$S = 110,67W_{\text{fajl}} + 700,09$	0,7013

7. 4. táblázat: *Timföld őrlésének energia-fajlagos felület függvényei és korrelációs koefficiensei*

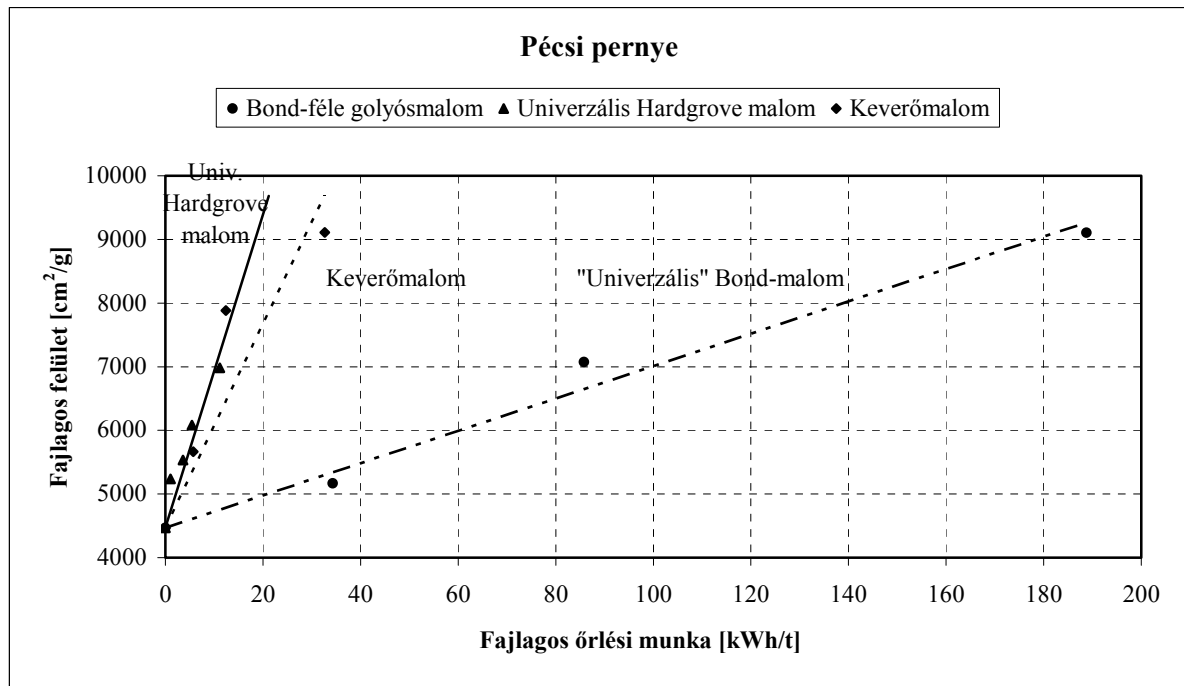
A két vizsgált paraméter (fajlagos felület és fajlagos őrlési munka) közötti kapcsolat a rendelkezésre álló adatokból lineáris függvénnyel írható le mind a 3 malom esetében. Ezek részletesen a 7.4. táblázatban találhatók.

7.1.2. Erőműi pernye őrlhetősége

A timföld minta vizsgálatát követően - egy inhomogén összetételű anyag - egy szénerőműi pernyeminta (pécsi pernyehányó) finomőrlési kísérletét is elvégeztem a 3 laboratóriumi malommal. A feladási minta mediánja $26,26 \mu\text{m}$ ($x_{80} = 43,1 \mu\text{m}$) volt. A 7.5. ábrán látható, hogy csakúgy, mint az előző esetben itt is lineáris függvény illeszthető a különböző módszerekkel nyert mérési pontokra. Az egyenletek és az R^2 értékek a 7.5. táblázatban találhatók.

Malomtípus	Függvény	R^2
Univerzális Hardgrove malom	$S = 246,2W_{\text{fajl}} + 4469,1$	0,8809
Bond-malom	$S = 25,41W_{\text{fajl}} + 4469,1$	0,9820
Keverőmalom	$S = 160,17W_{\text{fajl}} + 4469,1$	0,8129

7.5. táblázat: *Szénerőműi pernye őrlésének energia-fajlagos felület függvényei és korrelációs koefficiensei*

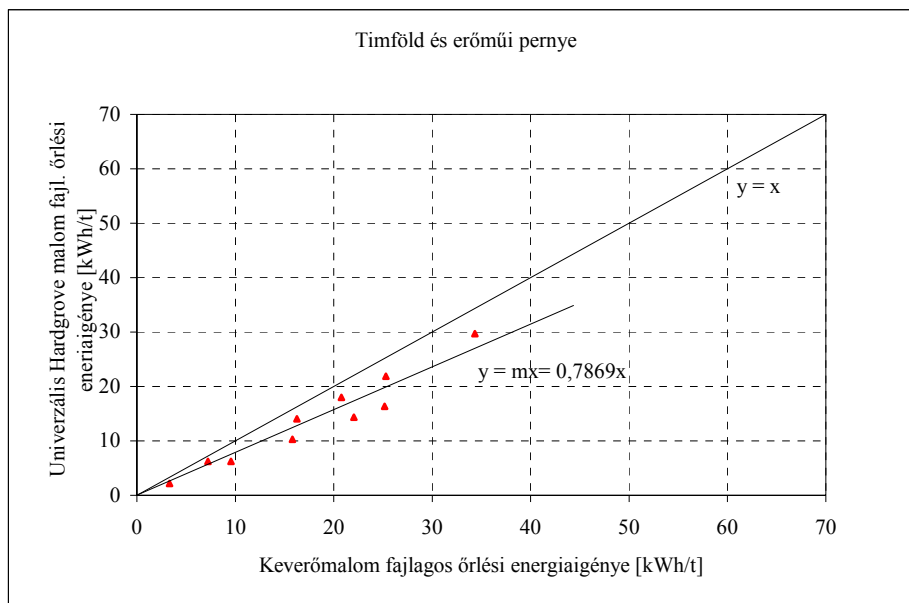


7.5. ábra: Szénerőműi pernye őrlemény számított fajlagos felülete - S és fajlagos őrlési munkája – W_f közötti kapcsolat

A fentiekből következik, hogy finom anyagok továbbőrlésekor az őrlhetőség jellemzésére az Univerzális Hardgrove malom alkalmasabb, mint az Univerzális Bond malom. Mindemellett az Univerzális Hardgrove malommal kapott eredmények korrekcióra szorulnak:

$$W_{fajl}^{keverőmalom} = kW_{fajl}^{mért} \quad (7.1.)$$

Fenti összefüggésben a k korrekciós tényező a 7.6. ábra alapján $k = 1/m = 1/0,7869 = 1,27$.



7.6. ábra: *Keverőmalom – Univerzális Hardgrove malom korrelációs diagramja timföld és erőműi pernye őrlemény esetében*

Mind a két mintaanyag esetében a golyósmalmi őrlés fajlagos őrlési energiája többszörösére adódott a másik két módszerrel nyert értéknél. A különbség oka az igénybevétel módjában keresendő, ugyanis amíg a Hardgrove- és keverőmalmi őrlésnél a dörzsölés dominál, addig a Bond-malmi őrlés esetében (ahol a kritikus fordulatszám 90 %-án üzemeltetjük a malmot) az ütőmunka a mérvadó. Ez utóbbi igénybevétel az őrlés, előző pedig a finomőrlés tartományában hatékony. Ezért a nagyobb hatásfokkal működő Hardgrove- és keverőmalom kisebb energia befektetéssel üzemelnek a finomabb szemcseméretű ($x < 50 \mu\text{m}$) anyagok őrlésekor, mint a golyósmalmok.

A 7.7. ábrán továbbá látható, hogy az üzemen használt $e = n/n_{\text{krit}} = 69 \%$ és a Bond-malmi $e = 90 \%$ -os fordulatszámhoz tartozó golyómozgások is lényegesen eltérnek egymástól. Míg a nagyobb fordulatszám esetén (katarakt) az ütőmunka, addig az alacsonyabb (kaskád) fordulatszámú malmoknál a dörzsölő igénybevétel lesz jellemző.



e=69 %
a)



e= 90 %
b)

7.7. ábra: Golyómozgás dobmalomban különböző fordulatszám mellett

A 7.4 és 7.5 ábrán látható, hogy az anyagok őrlhetőségét leíró görbék hasonló lefutásúak a megvizsgált fajlagos felület tartományban.

Az eredmények jól korrelálnak a Bond által megadott finomőrlési tényezővel ("Fineness of Grind Factor") [22], ami akkor alkalmazandó finomőrléskor, amikor a termék 80%-os szemcsemérete kisebb, mint 75 μm .

$$A_1 = \frac{x_{80} + 10,3}{1,145x_{80}} \quad (7.2.)$$

E tényező szükségessége (7.2. egyenlet) a golyósmalmok alacsony „hatásosságával” magyarázható a finom szemcseméret tartományban, úgymint a nem megfelelő golyótöltet (túl nagy méretű őrlőgolyók), azaz a golyók felületén képződött fedőréteg tompítja a szemcsék fémmel történő érintkezését (száraz őrléskor), egy sűrű viszkózus zagy az őrlőtestek tompítását okozhatja (nedves őrléskor) és a hibahely mentes kristályrács őrlése hatalmas energiát igényel.

A laboratóriumi őrlési kísérletek alapján a következő megállapításokat tehetjük:

- Finomőrlés esetében a fajlagos őrlési munka és örlemény diszperzitásfok közötti kapcsolatot leíró görbék hasonló lefutást mutattak a Bond-, az Univerzális Hardgrove-, a keverőmalom és az ipari golyósmalom esetében egyaránt. Az Univerzális Hardgrove

malom eredményei jobban megközelítették az üzemi adatokat, mint a Bond-féle golyósmalommal számítottak.

- Az új Hardgrove-módszer legfőbb előnyei a következők: egy egyszerű és könnyen kezelhető és szabályozható laboratóriumi malom, mindössze 50 g mintára van szükség, a mérés lefolytatható kb. 60...90 perc alatt. Ez utóbbi kiemelten fontos abban az esetben, amikor finom szitákat kell használni ($<75\ \mu\text{m}$).
- Az Univerzális Hardgrove Malommal nyert fajlagos őrlési munka értékei megbízhatóan alkalmazhatók napi üzemi ellenőrzésre.
- A durvaőrlés területén a Bond- és Hardgrove-eljárás átjárható, azonban a finom tartományban nem vezet azonos eredményre, ugyanis az igénybevétel módja jelentős hatással van az őrlés hatásfokára.

A Hardgrove-malommal nyert értékek, a laboratóriumi golyósmalomhoz viszonyítva közelebb állnak az üzemi golyósmalmi eredményekhez, mivel a Hardgrove-malomnál is a hatékonyabb dörzsölő munka érvényesül, akárcsak a kaszkád golyómozgást produkáló golyósmalmok esetében (7.7. ábra).

- Ezért finomőrlés esetében célszerű a gyorsabb és pontosabb eredményt szolgáltató Hardgrove-malmot alkalmazni az üzemi fajlagos őrlési munka és a napi kapacitás becslésére.

7.2. Keverékek őrlhetőségének vizsgálata

A cementgyárak egyre nagyobb mennyiségben állítanak elő többkomponensű, ún. kompozitcementeket, amelyek komponenseinek (klinker, granulált vaskohósalak, szénerőművi pernye, gipsz, trassz, mészkő) együtt- ill. különőrlése egy igen fontos kérdéskör. Jelenlegi módszerek nem alkalmasak az említett cement kiegészítő anyagok őrlhetőségének (pontos) meghatározására. Egyrészt az alapanyagok finom kiindulási szemcsemérete miatt, másrészt pedig a végtermék finomsága nem felel meg a jelenleg gyártott cementek őrlési finomságának.

Ezzel kapcsolatban olyan laboratóriumi méréseket kívánok elvégezni, illetve mérési eljárást kidolgozni, amelyek segítségével optimalizálhatjuk az őrlési körülményeket azáltal, hogy gyors megbízható mérési módszert vezetünk be a komponensek együtt és külön őrlése

energiaszükségletének becslésére. Ez lehetővé teszi malomkapacitás előrebecslését, és ezáltal a malmok kapacitásának teljesebb kihasználását.

Ez azért is kiemelt fontosságú feladat, mert az eltérő őrlhetőséggel rendelkező alapanyagokból gyártott őrlemény szemcseméret-eloszlása, ill. fajlagos felülete, és ezáltal vízigénye, valamint a belőle gyártott beton termék szilárdsága, minősége is eltérő lesz.

Cement malom

Az üzemi mérés a Holcim Hungária Zrt. hejőcsabai gyárának III. számú cementmalmával történt. A kísérletet az „Üzemi mérések megfelelő finomságú klinkertakarékos cementek előállítására” című innovációs projekt keretében valósítottuk meg [96].



7.8. ábra: *Holcim Zrt. III. számú cementmalma, Hejőcsaba*

A kétkamrás golyósmalom (7.8. ábra) névleges kapacitása 110 t/h, mérete: $D \times L = \varnothing 4,4 \times 15,25$ m, kritikus fordulatszámhoz való viszonya: $e = n/n_{\text{krit}} = 0,72$ és a golyótöltési fok mind a két kamrában kb. 30 % volt. A malom hajtás névleges teljesítménye 2x2,1 MW.

Mind a hazai, mind a külföldi szakirodalom [84, 85, 86] részletesen foglalkozik a kompozitcementek együtt ill. különőrlésének előnyeivel és hátrányaival. E téma terület egyik fontos kérdésköre az őrlés energetikai vonatkozása.

Mérések

A üzemi mérések során a korábban említett klinker, kassai granulált kohászati salak és REA-gipsz együttőrlése történt 7.8. ábrán látható golyósmalommal. A kísérletek során a malom motorok által felvett elektromos teljesítmény és a friss feladási tömegáram (ami egyensúlyi helyzetben megegyezett a termék tömegáramával) segítségével számítottam a fajlagos őrlési energiát:

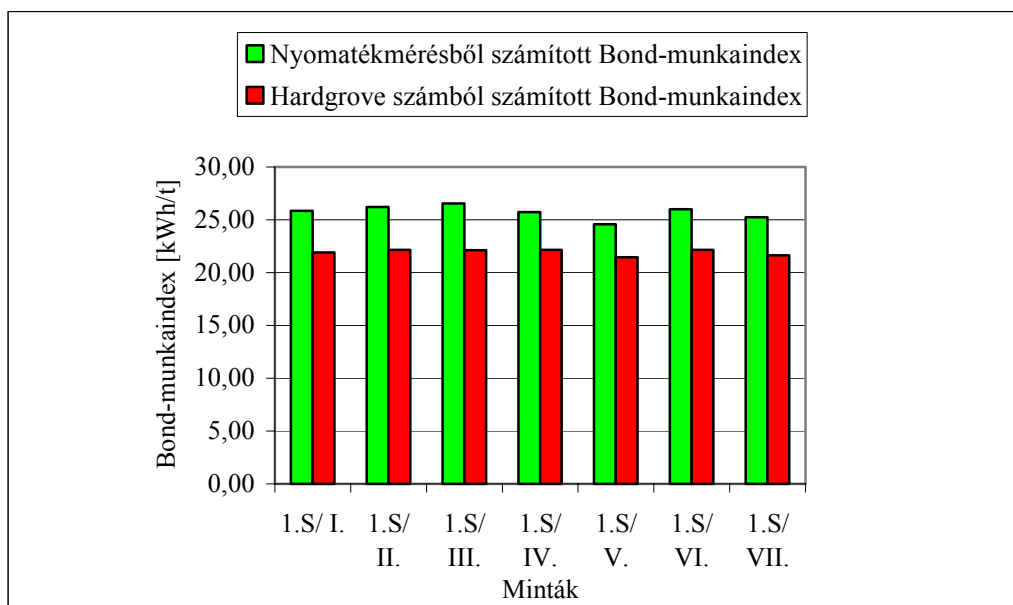
$$W_{fajl} = \frac{P_{motor}}{Q_{malom}} \quad (7.3.)$$

Ezt az értéket és a feladás valamint a termék 80 %-os szemcseméretét felhasználva meghatároztam az ún. üzemi Bond-munkaindexet, ahol a Bond által javasolt korrekciós tényezőket figyelembe vettem, úgymint a finomőrlés, a szárazőrlés és a $D > 2,4$ m átmérőjű malom faktorát.

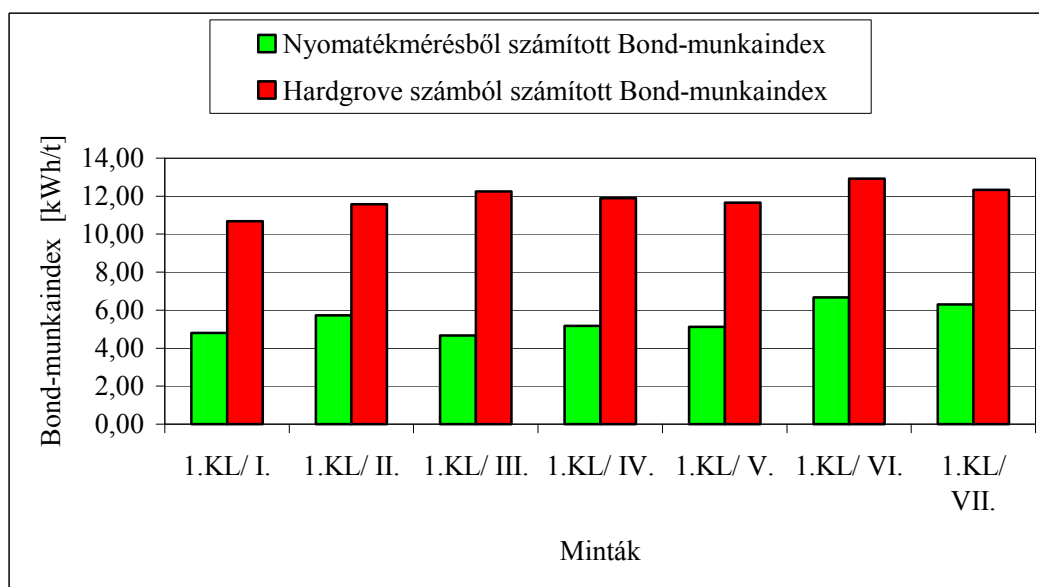
A laboratóriumi kísérletek esetében pedig az egyes összetevőket külön és együtt egyaránt őrltük Hardgrove- és Bond-malomban, majd ezek Bond-munkaindexeit feladási arányaiknak megfelelően súlyozottan vettem figyelembe a keverék rendszer őrlhetőségének meghatározásakor.

Mérési eredmények

A 7.9. ábrán látható, hogy a granulált kohászati salak mérési eredményei között nincs jelentős különbség. A klinker (7.10. ábra) esetében azonban a Bond-munkaindexek egy viszonylag széles tartományban változnak.



7.9. ábra: Granulált kohászati salakminták különböző módon számolt Bond- munkaindexei



7.10. ábra: Klinker minták különböző módon számolt Bond- munkaindexei

Az egyes klinkerminták Bond-munkaindexei közötti eltérés magyarázható a különböző gyártástechnológiai paraméterekkel ill. a tárolási idő hatásával [90, 91].

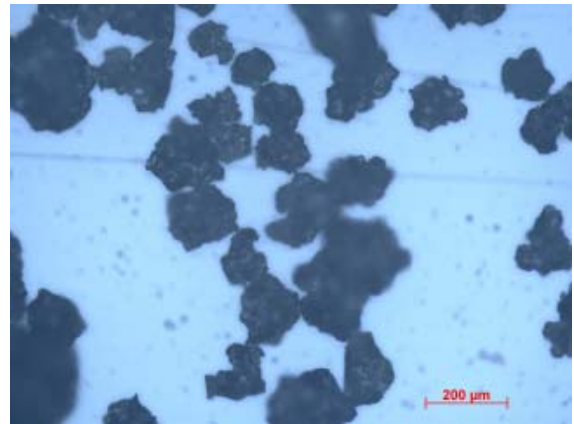
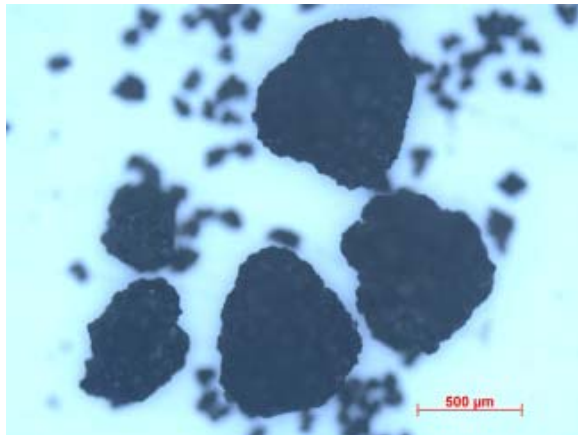
Az együtt- és különőrlés laboratóriumi és üzemi Bond-munkaindexeit a 7.6. táblázat tartalmazza.

		Bond-munkaindex [kWh/t]					
	Össze- tétel [%]	Bond-malom (Cemkut)	Hardgrove- számból	Nyomatékm.	Üzemi	Hardgrove- számból	Nyomaték- mérésből
		különőrlés			együttőrlés		
Klinker	63,14	9,01	11,89	5,49	-	-	-
Granulált kohósalak	32,12	20,45	21,91	25,73	-	-	-
Gipsz	4,74			11,42	-	-	-
Bond- munkaindex súlyozott átlaga		12,79	15,07	12,26	16,34	11,50	5,89

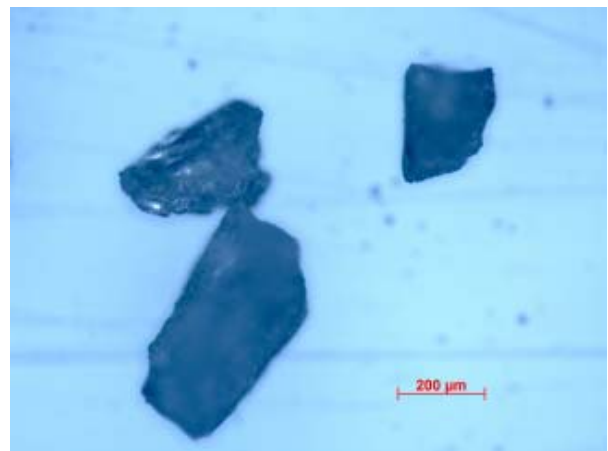
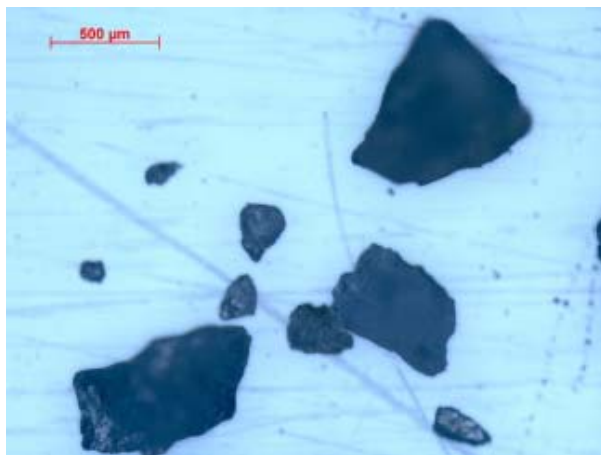
7.6. táblázat: Kompozitcement Bond-munkaindex együt- és különőrlés esetén

A két módon történő Bond- munkaindex meghatározás között tapasztalható nagy eltérés megkérdőjelezi a nyomatékmérésen alapuló módszer használhatóságát a klinkerre vonatkozóan. Emiatt megvizsgáltam a klinker és más minták (mészkő, kavics) szemcséinek alakját egy Zeiss Axioskop 2 MAT optikai mikroszkóppal. Ennek eredményeként arra a következtetésre jutottam, hogy valószínűleg a klinker szemcsék szferikus alakja okozza a közel 50 %-os eltérést a két őrlhetőségi módszer eredményei között, ugyanis a gömbszerű részecskék kisebb őrlési ellenállást fejtenek ki, mint a szögletes, szabálytalan alakú mészkő és tört kavics szemcsék (7.12. ábra), ahol korábban jó egyezést találtam.

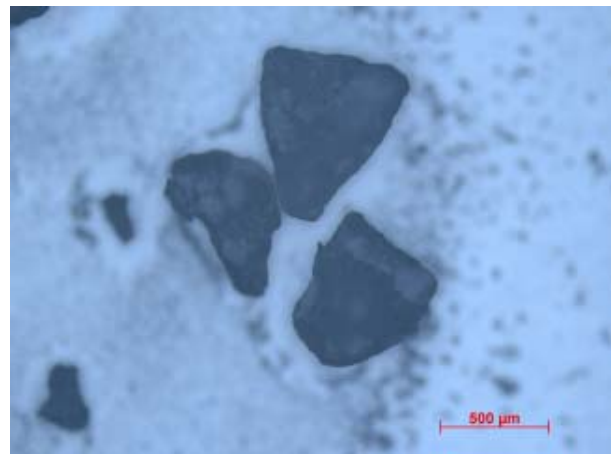
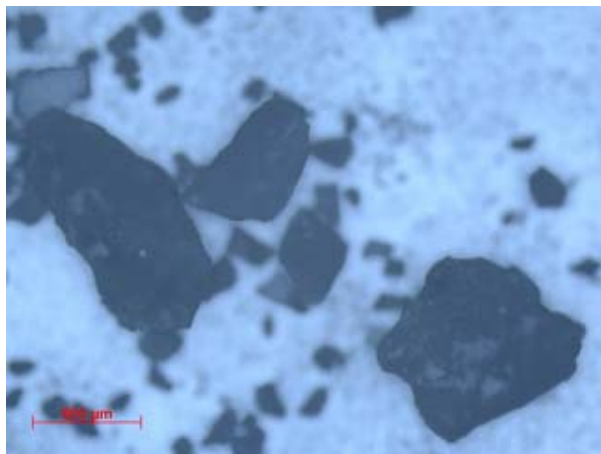
Ez a magyarázata a klinkerek esetében szintén nyomatékmérésen alapuló Zeisel-index származtatott fajlagos munkának jelentős eltérése a Bond-malommal meghatározott fajlagos munkától.



Klinker őrlemény



Kvarchomok őrlemény



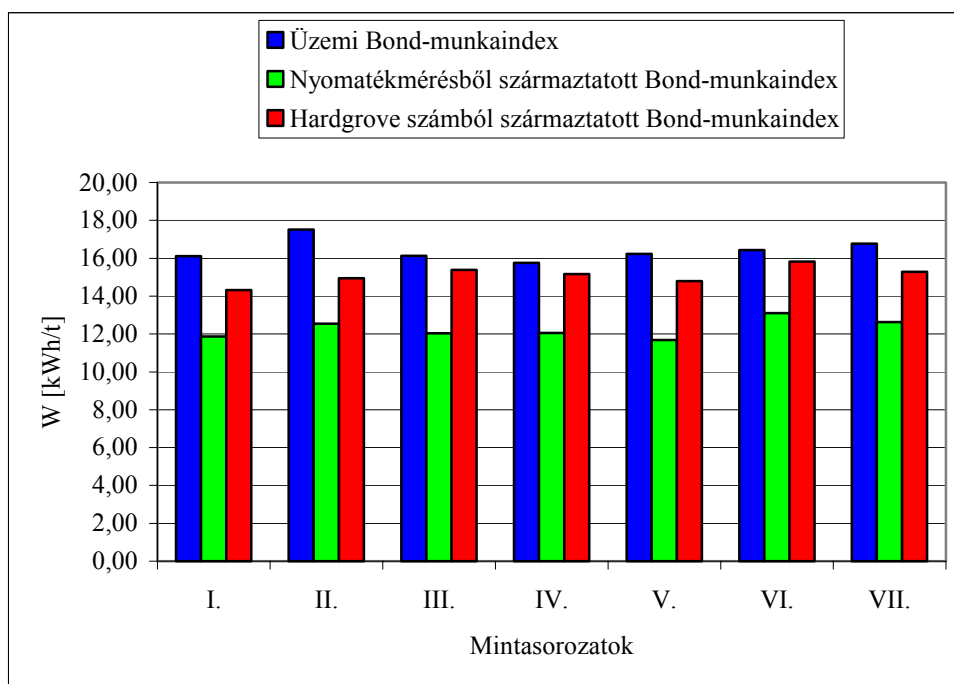
Mészke őrlemény

7.12.ábra: őrlemény szemcsealak vizsgálata optikai mikroszkóppal

A REA-gipsz esetében is elvégeztük az őrlhetőségi mérést, de ebben az esetben az eljárás menete és a kiértékelése a nyomatékmérés elvén történt, ugyanis a REA-gipsz szemcsemérete kisebb, mint a szabványban rögzített 590...1190 μm feladási szemcseméret.

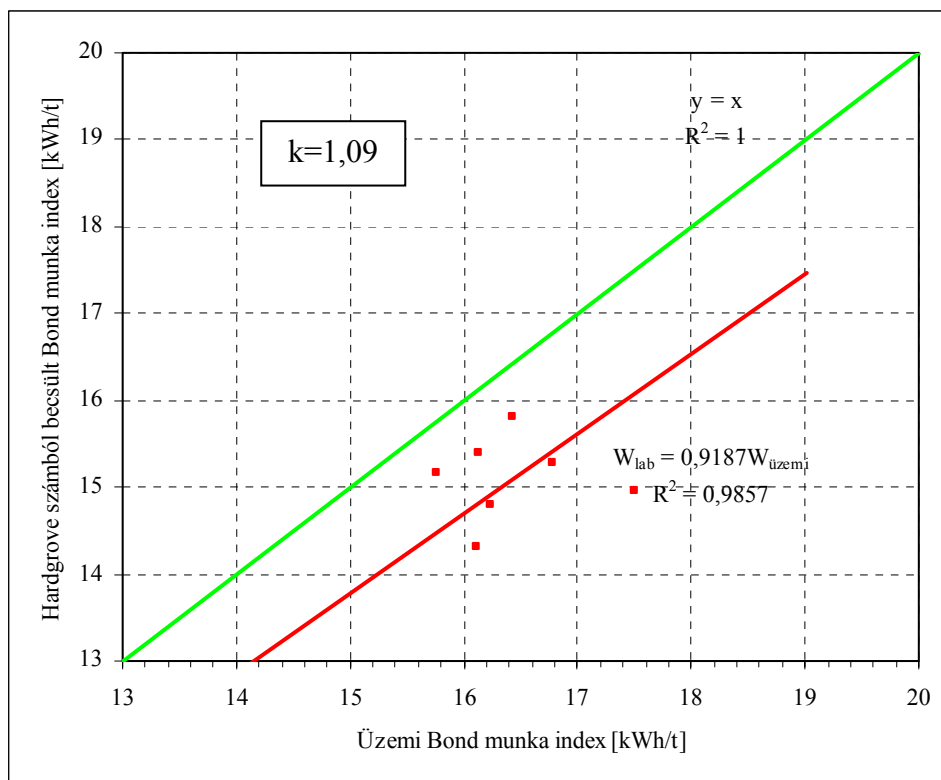
A REA-gipsz őrlhetősége $W_{i,B} = 11,42$ kWh/t Bond-munkaindex értékkel jellemezhető.

Az üzemi és laboratóriumban mért Bond-munkaindex értékeket a 7.13. ábra mutatja. Mivel az üzemi mérések a klinker, REA-gipsz és granulált kohászati salak keverékére vonatkoznak, ezért az egyes anyagok laboratóriumi Bond- munkaindexeit az anyagok keverékbeli tömeghányadai alapján súlyozottan vettük figyelembe.



7.13. ábra: Üzemi és laboratóriumi Bond- munkaindexek összehasonlítása

Az üzemi és laboratóriumi Bond-munkaindexek korrelációs diagramján (7.14. ábra) az ordinátán a Hardgrove-számból származó W_{IB} (2.41. képlet) és az abszcisszáján pedig az üzemi érték található.



7. 14. ábra: Üzemi és laboratóriumi Bond-munkaindexek közötti összefüggés

Az eredmények alapján következő megállapításokat teszem:

- A nyomatékmérésből származtatott Bond-munkaindex adja a nagyobb eltérést az üzemihez képest, ez átlagosan 34 % különbséget jelent. Vélhetően a legnagyobb arányban jelen levő klinker őrlhetőségének bizonytalan meghatározásának a következménye.
- A Hardgrove számból származtatott (Csőke-féle képlet) Bond-munkaindex és az üzemi érték közötti korreláció értéke $k=1,09$ -ra adódott.
- Az egyes anyagok Univerzális Hardgrove malommal nyert Bond-munkaindexéből a keverékre számított Bond- munkaindexével és az ipari mérések eredményei között jó egyezőséget tapasztaltunk.
- Az elvégzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy keverékanyagok alkotóinak laboratóriumban a Hardgrove-malommal nyert Bond-munkaindexeit csak megfelelő korrekciós tényező alkalmazásával használhatjuk fel az üzemi Bond- munkaindex meghatározására:

$$W_{i,B}^{üzemi} = 1,09W_{i,B}^H \quad (7.4.)$$

- Jelen munka egy megfelelő alapot teremtett a finom szemcseméretű többkomponensű heterogén összetételű anyagok (pl. kompozitcementek) őrlhetőségi vizsgálati módszerének kifejlesztéséhez a finomőrlési ($x < 50 \mu\text{m}$) tartományban.

8. Összefoglalás

A szakirodalmi összegzés alapján megállapítható, hogy a fellelhető írások nem foglalkoznak kellő mélységgel a különleges körülmények között - például a nagy hőmérsékletű lúgos közegben, ill. extra-finom feladású anyagokkal - végzett őrlhetőségi vizsgálatokkal, ami egyrészt azzal van összefüggésben, hogy hiányzik a szemcseméret - őrlési energia összefüggésének leírására vonatkozó, általános érvényű elmélet. Másrészt azzal, hogy a jelenleg használt vizsgálati berendezések és eljárások nem alkalmasak az őrlhetőség különböző körülmények között történő vizsgálatára.

Az általam végzett vizsgálatok, kutatások fő célkitűzése, olyan *őrlhetőség vizsgálati berendezések és eljárások kifejlesztése*, melyek egyaránt alkalmazhatók:

- az őrlhetőség meghatározására az érc- és ásványbányászatban, az ásványfeldolgozó-iparban, a cementiparban, a hulladék-feldolgozásban stb.;
- az őrlhetőség különleges őrlési körülmények között - nedves, lúgos vagy savas közegben, 20...200 °C hőmérsékleten - történő meghatározására;
- változó, ill. tetszőleges feladási szemcseméretű anyagok őrlhetőségének vizsgálatára;
- a fajlagos őrlési energia meghatározására, mely felhasználható az üzemi malmok méretezésénél, azok üzemeltetési paramétereinek (örlőtest-összetétel, töltési fok, az osztályozó berendezés működése) optimalizálásánál stb.

Az egyik fontos célkitűzés az, hogy a kifejlesztett őrlhetőség vizsgálati eljárások alkalmasak legyenek az őrlhetőség gyors meghatározására, és így alkalmazhatók az üzemekben az őrlési folyamat szabályozásánál.

Az eszközfejlesztő és a kísérleti munkát három szakaszban folytattam le:

- 1) Elsőként a nagyhőmérsékletű lúgos őrlés kísérleti feltételeit teremtettem meg mind két malom esetében a bauxitok őrlhetőségének vizsgálatára. Ebben a mérési sorozatban különböző szövetszerkezetű karszt- és laterit-bauxitokkal (2 görög bőhmites és diaszpóros, a magyar halimbai bőhmites, az ausztrál Weipa-i gibbsites és afrikai Boké bőhmites bauxit) őrlhetőségét vizsgáltam meg párhuzamosan a Bond és a Hardgrove malomban növekvő hőmérséklet mellett, megvizsgálva e körben előnyös őrlést segítő anyag alkalmazásának kérdését is.
- 2) A második munkaszakaszban a őrlési energia közvetlen módon történő méréséhez a Hardgrove malmot egy MOM Kaliber 8964 típusú erőmérő cellával, a Bond-malmot pedig egy Carlo Gavazzi WM1-DIN típusú villamos teljesítménymérővel láttuk el. Kialakítottam a mérési és kiértékelési eljárást, igazoltam alkalmazhatóságukat. A vizsgálatokat ebben az esetben mészkő, kvarchomok, bazalt, zeolit mintaanyagokkal mindkét malomban párhuzamosan folytattam le. E mérési sorozat igazolta, hogy a Bond és Hargrove őrlési indexek meghatározása visszavezethető az őrlési energia közvetlen mérésére.
- 3) A harmadik munkaszakaszban a kialakított eszközöket és mérési-kiértékelési eljárást „valós” ipari feladatok vizsgálatára alkalmaztam:
 - a) egyrészt finom timföldek és a pernyék őrlhetőségének jellemzésére;
 - b) másrészt a keverékek (kompozit-cement) őrlhetőségi vizsgálatának kérdésére (az őrlhetőségi vizsgálat együtt vagy külön-külön végzendő ?);
 - c) harmadrészt az eredményeket valós őrlési folyamat adataival vettem össze:
 - laboratóriumi-félüzemi méretű keverőmalomban végzett őrlés adataival;
 - valamint az üzemi őrlés paramétereivel, amikor az üzemi méréseket különböző feldolgozó képességű (4 t/h és 100 t/h) golyósmalmokkal folytattuk le a MAL Zrt. ajkai és a Holcim Zrt. miskolci gyárában.

Az általam kifejlesztett „univerzális” Hardgrove- és Bond-malom, ill. őrlhetőség vizsgálati eljárások – melyek lehetővé teszik a rideg anyagok őrlhetőségének különböző körülmények (vizes, lúgos, ill. savas közegben, nagyhőmérsékleten stb.) között történő meghatározását – a különböző iparágakban széles körben hasznosíthatók.

Így például az „univerzális” Hardgrove-malom az ipari őrlőüzemekben gyors, rendszeres őrlhetőségi vizsgálatokra alkalmazható és így felhasználható az őrlőberendezések

szabályozásánál. Ugyanis az őrlendő anyag őrlhetőségének változása befolyásolja az őrlőrendszerek működését és ezzel összefüggésben szabályozását is.

Az „univerzális” Hardgrove- és Bond-malomban meghatározott őrlhetőségi mérőszámok a malmok méretezésénél, az őrlőberendezések üzemeltetési paramétereinek (őrlőtest-összetétel, töltési fok, az osztályozó berendezés működése) stb. meghatározásánál egyaránt felhasználhatók.

Kutatómunkám szorosan kapcsolódik a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézete által, az elmúlt hat évben végzett projektekhez. A kifejlesztett őrlhetőség vizsgálati eljárásokat számos ipari kutatás során eredményesen alkalmaztuk a fajlagos őrlési energiaigény és a Bond-féle „munkaindex” meghatározására. Ezek közül kiemelendők két különböző, ipari méretű golyósmalommal és egy gyűrűsmalommal végzett kutatások, vizsgálatok eredményei.

Mivel az utóbbi időben vizsgálati és kutatási eredményeim iránt a cementipar is érdeklődést mutat, további kutatásaim során tervezem az általam kifejlesztett „univerzális” őrlhetőség vizsgálati módszereket továbbfejleszteni, ill. alkalmassá tenni a csökkentett klinkerhányadú – kompozit-portland- és kompozitcementek – őrlhetőségének vizsgálatára is. Ennek nemcsak műszaki szempontból van nagy jelentősége, hanem azért is, mert a nemzetközi, ill. hazai cementgyártásban egyre nagyobb részt képez a csökkentett klinkerhányadú, nagyobb mennyiségű cementkiegészítő anyago(ka)t tartalmazó kompozit-portland- és kompozitcementek gyártása, ami összefüggésben van napjaink egyik aktuális környezetvédelmi problémájával, mégpedig a klímaváltozással összefüggő *CO₂-emisszió csökkentéssel*.

A kutatásom során több tudományos felismerésre tettem szert. Ezeket a tézisfüzetben foglaltam össze.

9. Summary

Based on the survey of literature it was concluded that it does not deal adequately with experimental investigation of grindability conducted under special circumstances – e.g. high temperature, alkaline media, extra fine feed particle size. On the one hand it can be explained by the lack of a universal theory for particle size – grinding energy relationship, on the other hand the presently used apparatuses and methods are not suitable for investigation of grindability under different special conditions.

The main aim of my research was to develop such grindability testing apparatuses and methods which can be applied for:

- determination of grindability in the field of ore- and mineral mining, mineral processing, cement industry and in the waste treatment as well;
- grindability testing under special grinding circumstances, i.e. in aqueous, alkaline or acidic media, at temperature between 20...200 °C;
- fulfillment of grindability test of brittle materials with diverse and arbitrary feed particle size;
- determination of specific grinding energy, which can be successfully used in designing of new grinding facilities, and in optimization of the existing operations (grinding ball charge, filling ratio, operating of classifier,...), resulting in significant savings in both investment and operating costs

One of the important goals is that the developed grindability testing methods have to be suitable for fast determination of grindability, in this way methods can be used in the industrial practice for controlling grinding process.

The research and development work was conducted in three working sessions:

1. Firstly, the laboratory conditions of high temperature alkaline grinding were created for the investigation of bauxite's grindability at high temperature. In this measuring series the grindability of karst- and lateritic bauxite with different texture (boehmitic and diasporic Greek, boehmitic Hungarian from Halimba, gibbsitic Australian from Weipa, boehmitic African from Boké) was measured with modified Bond- and

Hardgrove-mill parallel at different temperature. Additionally, the question of grinding aid was examined.

2. In the second working period the Hardgrove-mill was equipped with a “MOM Kaliber 8964” type load cell, the Bond-mill was upgraded with a “Carlo Gavazzi WM1-DIN” type electric power measurer. Measuring and evaluation method was worked up and the applicability of them was proved. In this case limestone, pebble, basalt, zeolite samples were used for experiments in both mills parallel. This series proved that the determination of Bond- and Hardgrove-indices originate in the direct measuring of grinding work.
3. In the third period, the developed apparatuses, measuring- and evaluating methods were applied for the investigation of “real” industrial tasks:
 - a) for characterization of grindability of fine particulate materials, i.e. alumina and fly ash;
 - b) for the grindability measurement of mixtures (composite cements, separate- or intergrinding?);
 - c) the laboratory results were compared with data originated from industrial measurements:
 - with grinding experimental data of laboratory – pilot plant scale stirred ball mill;
 - with parameters of industrial measurement, which were carried out with different throughput ball mills (4 t/h and 100 t/h) in the plant of MAL Zrt. (Ajka) and Holcim Zrt. (Miskolc - Hejőcsaba).

The developed „universal” Hardgrove- and Bond-mills as well as grindability testing methods – which support to determine the grindability of brittle materials under different circumstances (aqueous, alkaline and acidic media and at high temperature) - can be utilized in several industrial field in a wide range.

For example the „universal” Hardgrove-mill can be applied for fast and regular grindability testing in industrial grinding plant and in this way it can be used for controlling of the mills. Namely the changing of grindability of material being ground affects the operation of mills and its controlling.

The grindability numbers determined using by „universal” Hardgrove- and Bond-mills can be applied in case of dimensioning of mill, determination of operational parameters (size distribution of grinding media, ball filling ratio, operation of classifier, etc...) as well.

My research work is close connected to the projects of the Institute of Raw Material Preparation and Environmental Processing in the last six years. The developed grindability testing methods were applied successfully in several industrial research tasks for determination of specific grinding energy and Bond-work index. The results of two of these tasks – industrial scale ball mill and ring mill - have to be emphasized.

Since recently the cement industry show an interest in my research results as well, during my further work it is scheduled to improve the developed „universal” grindability testing methods to be suitable for precise determination of grindability of reduced clinker factor – composite and composite Portland – cement. This is important from the technical point of view and because the quantity of so called reduced clinker factor cements – containing one or more cement complement material - has been increased all over the World and in Hungary as well. This is related to one of our actual environment protection problems in these days, the reduction of CO₂ emission connected the climate changing.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok Prof. Dr. Csőke Barnabás témavezetőmnek, hogy lehetőséget biztosított munkám sikeres elvégzéséhez és értekezésem megírásához. Köszönöm segítőkész támogatását és disszertációm alapos és kritikus átnézését.

Hálás vagyok Dr. Solymár Károlynak, aki nélkülözhetetlen szakmai tanácsaival alapvetően hozzájárult szakmai fejlődésemhez és sikeres munkámhoz.

Hálával tartozom továbbá Dr. Faitli Józsefnek, aki a mérés technika területén nyújtott sok segítséget.

Köszönetet mondok az intézetben dolgozó valamennyi munkatársnak a kísérleti munka során felvetődött gyakorlati problémák megoldásában nyújtott segítségükért és a sok nélkülözhetetlen kísérleti eszköz elkészítéséért. Külön köszönetet érdemel Dr. Bokányi Ljudmilla és Antal Gábor, akik értékes ötleteikkel segítették munkámat.

Köszönettel tartozom az Oktatási és Kulturális Minisztériumnak, az általa meghirdetett és 2008/09. tanévre elnyert Deák Ferenc Ösztöndíjért, valamint a MAL Zrt és a Holcim Zrt. vezetőségének, hogy engedélyezték az üzemi kísérletek lefolytatását és az adatok felhasználását.

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

Az értekezés témakörében készült publikációk jegyzéke

Nemzetközi folyóiratban megjelent cikkek:

1. Mucsi, G.: **Fast test method for the determination of the grindability of fine materials.** ELSEVIER, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 86/4 (2008) ISSN: 0263-8762 pp. 395-400.
2. Csőke, B., Mucsi, G., Opoczky, L., Gável, V.: **Modifying the hydraulic activity of power station fly ash by grinding (Beeinflussung der hydraulischen Aktivität von Kraftwerksflugasche durch Mahlung)** Cement International No. 6/2007. Vol. 5. ISSN 1610-6199 pp. 86-93.

Nemzetközi konferencia kiadványokban megjelent publikációk:

3. Csőke, B., Mucsi, G., Sík, Cs.: **Mechanical activation of fly ash and its utilization as individual binding material.** XXIV. International Mineral Processing Congress 2008, Beijing ISBN 978-7-03-022711-9 pp. 3262-3269.
4. Csőke, B., Mucsi, G., Sík, Cs.: **Mechanical activation of deposited fly ash by grinding.** TMS 2007 Annual Meeting & Exhibition, Recycling and waste processing, Orlando, Florida, USA, ISBN Number 978-0-87339-661-5, (CD-ROM). pp. 29-36.
5. Csőke, B., Mucsi, G., Opoczky, L., Gável, V.: **Modification of fly ash properties by grinding.** 11th Symposium on Comminution, 2006. Budapest, Hungary (CD-ROM) ISBN 963 9319 589
6. Mucsi, G.: **Laboratory determination of fine grained brittle materials grindability.** 11th Symposium on Comminution, 2006. Budapest, Hungary (CD-ROM) ISBN 963 9319 589
7. Csőke, B., Mucsi, G., Csende, L., Balogh, Z.: **Quality Control For the Production of Alumina Grinds Using Ball Mills.** XXIII. Mineral Processing Congress, 2006. Istanbul, Turkey (Proceedings), (Ed. Önal et al.) Promed.Ad.Ageincy, pp. 121-126. ISBN 975-7946-27
8. Csőke, B., Mucsi, G., Faitli, J., Solymár, K.: **Grindability tests in heated Bond mill.** XXIII. Mineral Processing Congress, 2006. Istanbul, Turkey (Proceedings) (Ed. Önal et al.)Promed.Ad.Ageincy, pp. 87-90. ISBN 975-7946-27
9. Csőke, B., Mucsi, G., Papanastassion, D., Solymár, K.: **Fast determination of grindability of bauxites in function of temperature.** Symposium of ICSOBA 2005. November, Nagpur, India pp.97-103.
10. Mucsi, G.: **Grindability of brittle materials.** MicroCAD 2005, International. Scientific Conference, Miskolc (2005. március) ISBN 963 661 647 7 pp.55-60.

11. Csőke, B., Mucsi, G., Solymár, K.: **Optimization of bauxite grinding by means of empirical model.** TMS Annual Meeting, Light Metals, Edited by Halvor Kvande, San Francisco, 2005. pp. 53-58. ISBN Number 0-87339-580-8, ISSN Number 109-9586
12. Csőke, B.-Hatvani, Z.- Mucsi, G.: **Investigation of the Grindability of Bauxites at high Temperature in Different Medias.** Annals of the University of Petrosani, Mechanical Engineering Vol. 7. XXXIV. Universitas Publishing House. 2005. (Petrosani, Romania), p.114-120. ISSN 1454 9166
13. Csőke, B., Fajtli, J., Mucsi, G.: **Grindability tests of diasporic and boehmitic bauxites with the universal mill at high temperature.** MicroCAD 2004, International. Scientific Conference, Miskolc (2004. március) ISBN 963 661 609 4 pp. 35-40.

Hazai folyóiratban megjelent cikkek:

14. Mucsi, G.: **Őrlhetőségi vizsgálat bauxitok nagyhőmérsékletű, lúgos őrlésére.** Bányászati és Kohászati Lapok – BÁNYÁSZAT, 140. évfolyam, 2007. 4. szám HU ISSN 0522-3512 pp. 36-41.
15. Mucsi G.: **Finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségi vizsgálata.** Építőanyag 59. 2007/2. ISSN 0013-970x pp. 41-45.

Irodalomjegyzék

- [1] H. BLUMENAUER, G. PUSCH: **Műszaki törésmechanika**. Műszaki Tankönyvkiadó, Budapest 1987 pp. 15-29, 50-60
- [2] Committee on Technologies for the Mining Industry, Committee on Earth Resources, National Research Council (USA): **Evolutionary and Revolutionary Technologies for Mining** (2002) p. 38
- [3] STAIRMAND, C. J.: **The Energy Efficiency of Milling Process. Zerkleinern**. Dechema-Monographien Nr. 79. (1976) pp. 1-17.
- [4] FEJES G., TARJÁN G.: **Vegyipari gépek és műveletek**. Budapest 1979. pp. 61-71.
- [5] CSŐKE B.: **Előkészítéstechnika: Aprítás és osztályozás**, Miskolci Egyetem, Eljárástechnikai Tanszék (2005) pp. 44-46, 101-105.
- [6] M. H. PAHL: **Zerkleinerungstechnik**, Verlag TÜV Rheinland 1991. pp. 6-43
- [7] R. T. HUKKI, I. G. REDDY: **The relationship between net energy input and fineness in comminution**. Zerkleinern Symposium in Amsterdam 1966. B5 pp. 313-339.
- [8] BEKE B.: **A finomőrlés területén végzett kutatások néhány eredménye**, Építőanyag, XXVI. évf. 4. szám 1974. pp. 121-133
- [9] REMÉNYI KÁROLY: **Őrlhetőségi Eljárások és a kétkomponensű keverékek aprítása**. Budapest Kézirat (1974) p. 28-47.
- [10] BEKE B.: **Aprításelmélet**. Akadémiai Kiadó, Budapest 1963. pp. 67-92
- [11] BEKE B.: **A finomőrlés folyamata**. Budapest, 1975 pp. 65-82.
- [12] J. SVENSSON, J. MURKES: **An empirical relationship between work input and particle size distribution before and after grinding**. International Mineral Dressing Congress, 1957.
- [13] TARJÁN GUSZTÁV: **Ásványelőkészítés II**. Tankönyvkiadó, Budapest, 1969. pp. 313-348.
- [14] CSŐKE BARNABÁS: **A karsztbauxitok szerkezeti tulajdonságai által meghatározott gazdaságos dúsítása**. Kandidátusi értekezés, Miskolc, 1985
- [15] JUHÁSZ, A. Z.-OPOCZKY, L.: **Szilikátok mechanikai aktiválása finomőrléssel**. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1982.
- [16] BEKE B.: **Anyagok őrlhetősége és az őrlhetőség mérőszáma**. Építőanyag, XXVI. évf. 1974. 12. szám p. 449-455
- [17] PETHŐ Sz.: **Aprítás és osztályozás**. Tankönyvkiadó, Budapest, 1988 p. 17-27

- [18] R. J. DEISTER: **How to determine the Bond work index using lab ball mill grindability tests.** E&MJ 1987. February pp. 42-45.
- [19] F. C. BOND: **Berechnungsmethode zur Feinzerkleinerung** (Evaluation of fine particle grinding) Aufbereitungs-technik Nr. 5. 1964. pp. 211-218.
- [20] PETHŐ SZ., CSÖKE B.: **Hazai kőzetek Bond-munkaindexének meghatározása.** Építőanyag 1983.11. szám p. 401-407
- [21] J. B. MOSHER, C. B. TAGUE: **Conduct and precision of Bond grindability testing.** Minerals Engineering, 14. 2001. pp. 1187-1197.
- [22] F. C. BOND: **Crushing and grinding calculations I-II.** British Chemical Engineering 1961. pp. 1-14.
- [23] R. F. YAP, J. L. SEPULVEDA, R. JAUREGUI: **Determination of the bond work index using an ordinary laboratory batch ball mill.** (Anaconda Minerals Company, Tucson , Arisona) (Chapter 12) pp. 176-201.
- [24] BERRY, T. F. AND BRUCE, R. W.: **A simple method of Determining the Grindability of Ores.** Canadian Mining Journal, Vol. 87, 1966. pp 63-65
- [25] SMITH R. W. AND LEE, K. H.: **A comparison of Data from Bond Type Simulated Closed-Circuit and Batch Type Grindability Tests.** Trans. SME-AIME, Vol. 241. 1968. pp. 99-101.
- [26] HORST W. E. AND BASSAREAR, J. H.: **Use of Simplified Ore Grindability Technique to Evaluate Plant Performance.** Trans. SME-AIME, Vol. 260. 1976. pp. 348-351.
- [27] KAPUR, P. C.: **Analysis of the Bond grindability test.** Trans. IMM, Vol. 79. 1970. pp. C-103-108.
- [28] V. K. KARRA: **Simulation of the Bond grindability test.** CÍM Bulletin, Vol . 74. No. 827. 1981. pp. 195-199.
- [29] YASHIMA S. ET AL.: **On the relation of Work Index and Mechanical Properties of Brittle Materials.** Kagaku Kogaku, Vol. No. 11. 1970. pp. 1199-1205.
- [30] Report: **The Hardgrove Grindability Index**
<http://www.acarp.com.au/Newsletters/hgi.html>
- [31] GÁVEL V., OPOCZKY L., SAS L.: **A technológiai paraméterek és a klinker szövetszerkezete, valamint őrlhetősége közötti összefüggések.** Építőanyag 52. évf. 2000. 2. szám pp. 34-38
- [32] MRÁKOVICSNÉ T. K.: **Őrlhetőségvizsgálati módszerek.** SZIKKTI Tudományos Közleménye, 1983 p. 76
- [33] MCINTYRE A, PLITT L, "The interrelation between Bond and Hardgrove Grindabilities" CIM Bulletin 1980 vol 73 no. 818 pp 149-154.

- [34] AGUS F, WATERS P: **Determination of the grindability of coal, shale and other minerals by a modified Hardgrove machine method.** Fuel 1971 vol 50 pp 405-431.
- [35] Patent Specification: Process of and Apparatus for Measuring Reduction in Size of Solids. No. 10,156/32.
- [36] Standard Test Method for Grindability of Coal by Hardgrove-Machine Method. 1931. ASTM D409-71
- [37] BOND, F. C.: **Crushing and grinding calculations.** CÍM Bulletin, Vol. 47. No. 507. 1954. pp. 466-472.
- [38] BEKE B.: **Növelhető-e az őrlési folyamat hatásossága?** Építőanyag, XXXII. évf. 1980. 6. szám p. 209-211.
- [39] B. CSÓKE, Z. HATVANI, K. SOLYMÁR, D. PAPANASTASSIOU: **Investigation of Grindability of Diasporic Bauxites in Dry, Aqueous and Alkaline Media as well as after High Pressure Crushing.** Preprints on CD-ROM, ISBN: 3-931384-40-3, 10th European Symposium on Comminution, 2nd-5th September 2002, Heidelberg (Germany), pp.
- [42] AUSTIN, L.G. - KLIMPEL, R.R. - LUCKIE, P.T.: **Process Engineering of Size Reduction. Ball Milling.** American Institute of Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York, 1984.
- [43] MULAR, A.L. - JERGENSEN, G.V.: **Design and Installation of Comminution Circuits.** Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York, 1982.
- [44] MÁTYÁS E.: **Geológia.** Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.
- [45] BÁRDOSSY GY.: **Karsztbauxitok.** Akadémiai Kiadó, Budapest, 1977
- [46] Light Metals: American Institute of Mining and Metallurgical Engineers (AIME) éves konferenciáin elhangzott előadások gyűjteménye, 1963-1989
- [47] V. A. MAZELJ: Timföldgyártás; Nehézipari Könyv- és Folyóiratkiadó Vállalat, 1953 pp. 83-92.
- [48] PÁSZTOR G. , SZEPESSY A. , SIKLÓSI P., OSVALD Z. : Könnyűfémek metallurgiája; Tankönyvkiadó, Budapest, 1991 pp. 14-78.
- [49] B. CSÓKE, G. MUCSI, CSENDE, Z. BALOGH: **Quality Control For the Production of Alumina Grinds Using Ball Mills.** 2006 XXIII. IMPC, Istanbul pp. 121-126.
- [50] T. NIITTI: **Rapid evaluation of grindability by a simple batch test.** IXth International Mineral Processing Congress, Czech Republic 1970. pp. 41-45.
- [51] H. SCHUBERT: **Zur Energieausnutzung bei Zerkleinerungsprozessen.** (On the Energy Utilization in Comminution) Aufbereitungs-technik 34 1993. Nr. 10 pp. 495-505.

- [52] U. HAESE, P. SCHEFFLER, H. FASBENDER: **Mahlbarkeitsprüfung und Rohrmühlenauslegung bei Zementrohstoffen** (Grindability testing and tube mill design for cement raw materials) Cement-Kalk-Gips Nr. 8 1975. pp. 316-324
- [53] M. A. TÜZÜN: **Technical note: Wet Bond mill test**. Minerals Engineering, Vol. 14. No3. 2001. pp. 369-373.
- [54] CHARLES, R. J.: **Energy-size reduction relationship in comminution**. Mining Eng. (Trans. A.I.M.E.) 208, 80 (1957)
- [55] JÜRGEN STEIN: **Ultrafine Dry Grinding with Media Mills**. 11th European Symposium on Symposium, 2006. Budapest CD-ROM
- [56] P. G. MCCORMICK, T. PICARO, P. A. I. SMITH: **Mechanochemical treatment of high silica bauxite with lime**. Minerals Engineering, 15. 2002. pp. 211-214.
- [57] STEPHEN MORRELL: **An alternative energy-size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits**. Int. J. Miner. Process. 74 (2004) pp. 133– 141
- [58] LEVIN, J.: **Observation on the Bond standard grindability test and a proposal for a standard grindability test for fine materials**. SAIMM 89 (1) (1989) pp. 13-21
- [59] G. D. GONZÁLEZ, C. PÉREZ, A. CASALI, G. VALLEBUONA, R. VARGAS: **Operational work index for grinding plants**. XXIth International Mineral Processing Congress, Roma. 2000. C4, pp. 1-7.
- [60] MERIC, J. P.: **Le broyage**. Rev. Mat. Constr. (C. B. P. C.) No. 6/78 715 (1978) pp. 329-333.
- [61] ROWLAND, C.: **Comparison of work indices calculated from operation data with those from laboratory test data**. Proc. X. IMPC, IMM, London (1973) pp. 47-61.
- [62] JUHÁSZ A. Z., OPOCZKY L.: **Mechanokémia és agglomeráció**, Építőanyag 55. Évf. 2003. 3. Szám pp. 86-90.
- [63] JUHÁSZ, L. OPOCZKY: **Mechanical activation of minerals by grinding: pulverizing and morphology of particles**, Akadémiai Kiadó, Budapest 1990.
- [64] OPOCZKY L., GÁVEL V.: **A szemcseméret-eloszlás jelentősége a pernyeadalékos cementek előállításánál**. Építőanyag 56. évf. 2004. 4. szám pp. 130-133
- [65] VON RITTINGER, P. R.: **Lehrbuch der Aufbereitungskunde**. Ernst und Korn, Berlin, Germany 1867.
- [66] KICK, F.: **Das Gesetz der proportionalen Widerstande und seine anwendung felix**. Verlag von Arthur Felix, Leipzig, Germany 1885.

- [67] GRIFFITH, A. A.: **The phenomena of rupture and flow in solids.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London (Series A: Mathematical and Physical), vol. A221. London, 1920. pp. 163-197.
- [68] ROWLAND JR., C.A., KJOS, D.M.: **Rod and ball mills.** In: **Mular, Bhappu, (Eds.), Mineral Processing Plant Design.** SME, New York, pp. 239– 278. (1978.) revised 1980, Chapter 12.
- [69] BOGDÁN KÁLMÁN: Külföldi Hírek, Bányászati és Kohászati Lapok – BÁNYÁSZAT 140. évfolyam, 2007. 2. szám
- [70] T. PARTYKA, D. YAN: **Fine grinding in a horizontal ball mill.** Minerals Engineering Volume 20, Issue 4, April 2007, pp. 320-326
- [71] F.C. BOND, W.L. MAXSON: **Standard grindability tests and calculations.** *Trans. Soc. Min. Eng. AIME* **153** (1943), pp. 362–372.
- [72] H. RUMPF: **Physical aspects of comminution and new formulation of a law of comminution.** *Powder Technology* **7** (1973), pp. 145–159.
- [73] GAO, M.W., WELLER, K.R.: **A comparison of tumbling mills and stirred ball mills for wet grinding.** In: Fifth Mill Operators Conference, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Australia, 1994. pp. 61–67.
- [74] ZHENG, J., HARRIS, C.C., SOMASUNDARAN, P.: **Power Consumption of Stirred Media Mills.** SME Annual Meeting, Albuquerque, New Mexico, Preprint No. 1994. pp. 94-118.
- [75] YAN, D.S., FREEMAN, M., DUNNE, R.: **The Efficiency of Ultra-fine Grinding in Stirrer Mills.** In: XIX Int. Min. Proc. Congress, San Francisco, October 1995.
- [76] PEASE, J.D., YOUNG, M.F., CURRY, D., JOHNSON, N.W.: **Improving Fines Recovery by Grinding Finer.** Metallurgical Plant Design and Operating Strategies Conference Proceedings, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Perth, 2004. pp. 65–78.
- [77] M. J. DANIEL: **Measurement of electrical energy consumption in a Bond ball mill.** XXIII. IMPC Turkey, Istanbul 2006.
- [78] N. MAGDALINOVIC: **Calculation of Energy Required for Grinding in a Ball Mill.** International Journal of Mineral Processing, 25 1989. pp. 41-46.
- [79] SZÁNTÓ FERENC: **Kolloidika.** Kézirat. Tankönyvkiadó, Budapest, 1992. pp.
- [80] LEVIN, J.: **A Proposed Test for the Determination of the Grindability of Fine Materials.** (1984) Mintek Report M177, Council for Mineral Technology, South Africa
- [81] SONGQING GU, LIJUAN QI: **Energy Consumption in Bayer Process.** TMS 2007 Annual Meeting & Exhibition, Alumina and Bauxite, Alumina Refinery Design and Development. Orlando, Florida, USA, ISBN Number 978-0-87339-661-5, (CD-ROM)

- [82] C. THORPE: **New super mills for bauxite grinding at the Gove Alumina Refinery.** TMS 2007 Annual Meeting & Exhibition, Alumina and Bauxite, Alumina Refinery Design and Development. Orlando, Florida, USA, ISBN Number 978-0-87339-661-5, (CD-ROM)
- [83] A. GUPTA, D. YAN: **Mineral Processing Design and Operations.** ELSEVIER, ISBN-13: 978-0-444-51636-7, 2006. pp. 68-96.
- [84] OPOCZKY LUDMILLA, GÁVEL VIKTÓRIA: **A különőrlés előnyei kompozitcementek előállításánál.** Építőanyag 55. évf. 2003. 1. szám
- [85] H. IPEK, Y. UCBAS, C. HOSTEN: **Technical note: The Bond work index of mixtures of ceramic raw materials.** Minerals Engineering 18 Elsevier (2005) pp. 981-983.
- [86] S. TSIVILIS, N. VOGLIS, J. PHOTOU: **Technical note: A study on the intergrinding of clinker and limestone.** Minerals Engineering, Vol. 12. No. 7. Elsevier (1999) pp. 837-840.
- [87] <http://www.engineering.nottingham.ac.uk/default.asp?id=111> Dr. Sam Kingman
- [88] TOMPOS E., SCHULTZ GY., CSÓKE B., BÖHM J.: **Ásványelőkészítési mérések és laboratóriumi gyakorlatok.** Tankönyvkiadó, Budapest (1984)
- [89] B. CSÓKE, L. BOKÁNYI, J. BÖHM, SZ. PETHŐ: **Selective grindability of lignites and their application for producing an advanced fuel.** Applied Energy 74 (2003) pp. 359-368.
- [90] V. GÁVEL, L. OPOCZKY, L. SAS: **Investigation of the correlation between the grindability texture and production parameters of cement clinker.** Cement International 5/2008. Vol. 6. pp. 38-42.
- [91] WALTER H. DUDA: **Cement data-book. International Process Engineering in the Cement Industry.** 2nd edition, Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin.
- [92] CSÓKE, B., MUCSI, G., PAPANASTASSION, D., SOLYMÁR, K.: **Fast determination of grindability of bauxites in function of temperature.** Symposium of ICSOBA 2005. November, Nagpur, India pp.97-103.
- [93] MUCSI, G.: **Fast test method for the determination of the grindability of fine materials.** ELSEVIER, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 86/4 (2008) ISSN: 0263-8762 pp. 395-400.
- [94] CSÓKE, B., MUCSI, G., FAITLI, J., SOLYMÁR, K.: **Grindability tests in heated Bond mill.** XXIII. Mineral Processing Congress, 2006. Istanbul, Turkey (Proceedings) (Ed. Önal et al.)Promed.Ad.Ageincy, pp. 87-90. ISBN 975-7946-27
- [95] **Recycling of EAF Dust by an Integrated Leach-Grinding Process: Determination of optimal alkaline leach-grinding process parameters** (Project number: COOP-CT-2004-508714-REDILP) Miskolci Egyetem, Eljárástechnikai Tanszék, Projekt jelentés - 2007.

[96] **Üzemi mérések a Holcim Hungária Zrt. hejőcsabai gyárában.** Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet. Projekt jelentés – 2008.

[97] OPOCZKY LUDMILLA: **Tudományos közlemények. A felületaktív anyagok őrléstechnológiai alkalmazásának lehetőségei.** SZIKKTI, Budapest, 1983. pp. 11-26.

[98] ZEISEL, H. G.: **Schriftenreihe der Zementindustrie.** Heft 14, Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf (1953), p. 51.

Melléklet

Fajlagos felület:

Gömbökből álló halmazok esetében fajlagos felület a következő módon határozható meg (lézeres elemzés):

$$S_{mg} = \frac{6}{\rho_S} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \frac{1}{x} f(x) dx$$

ahol x az egyenértékű gömb átmérője és $f(x)$ az eloszlást leíró függvény.

Ha hatványfüggvénnyel közelítjük a szemcseosztályonkénti fajlagos felület a következő képlettel megadható:

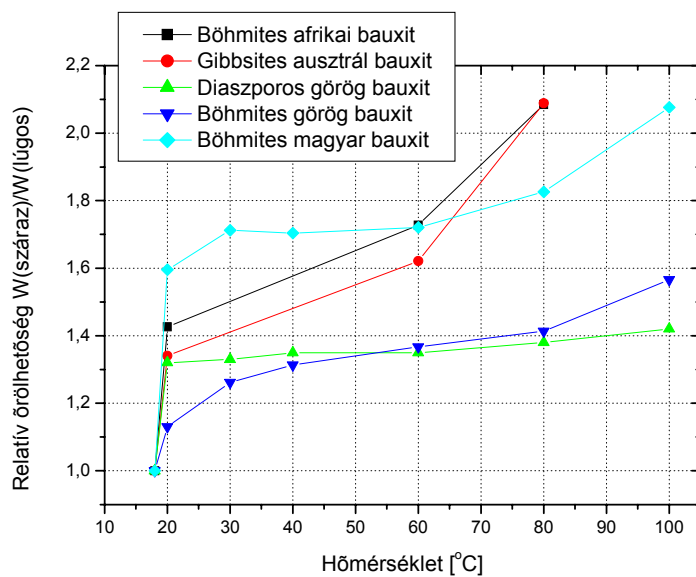
$$\Delta S_{mgi} = \frac{m_i}{m_i - 1} \left(\frac{F_i}{x_i} - \frac{F_{i-1}}{x_{i-1}} \right)$$

ahol m_i a hatványfüggvény kitevője az adott szemcseosztály esetében.

Tüzűn eredményei [53]:

A száraz és nedves őrlési vizsgálatból származó adatok összefüggésbe hozhatóak a Bond által tapasztalat útján meghatározott 1,3 szorzó tényező alkalmazásával. Ugyanis a nedves őrlés fajlagos energiaigénye általában kb. 1,3-szer kevesebb, mint a száraz őrlése.

Szita méret [μm]	Nedves őrlésből származó Bond munkaindex [kWh/t]		Száraz őrlésből származó Bond munkaindex [kWh/t]
	W_{iW}	1,3 W_{iW}	W_{id}
212	-	-	14,5
150	11,7	15,2	15,5
106	-	-	16,8
75	13,5	17,6	17,7
53	15,7	20,4	19,3



Relatív őrlhetőség hőmérséklet függése (lateritesek mész nélkül, karsztosak mésszel)

A **Hardgrove-féle vizsgálat**hoz a minta előkészítése a következő lépésekből áll, amely célja 590-1190 μm -es szemcseméret frakció előállítás:

1. Rendelkezésre álló minta kisebbitése mérések számától függően a kívánt mértékben Jones-féle mintakisebbitővel történik.
2. Fokozatosan törjük le a mintát kímélő töréssel - pofás-, majd hengeres törő segítségével - 3 mm alá, majd 24 órán keresztül szárítjuk szabad levegőn.
3. Ezek után ismét fokozatos törés következik hengeres törővel a kívánt szemcseméret tartomány eléréséig úgy, hogy az $x < 590 \mu\text{m}$ -es részt állandóan kiszitáljuk az $x > 1190 \mu\text{m}$ -es részt pedig újra feladjuk.
4. Keverjük össze az így keletkezett mintát, majd újra portalanítsuk az 590 μm -es szita segítségével.
5. Az 590-1190 μm -es mintából 50-50 g-ot mérjünk ki az őrlési vizsgálatokhoz. Ez az elemzési minta.

Kísérlethez szükséges berendezések és eszközök:

- Hardgrove-malom:
 - őrlőtestek 8 db acélgolyó (átmérő: $D=25,4 \text{ mm}$),
 - függőleges irányú nyomóerő $F=290 \text{ N}$,
 - 4db egyenként 500 W teljesítményű fűtőszál,
 - 4db hőmérést szolgáló PT 100 platina hőellenállás,
 - Fordulatszám: $n=20 \text{ 1/min}$,
 - névleges motor teljesítmény: $P_{\text{motor}}=0,37 \text{ kW}$,
- Őrlemény malomból való ürítésére szolgáló eszközök:
 - vákuumszivattyú,
 - min. 500 cm^3 térfogatú hengeres (lúgálló) műanyag edény,
 - lúg- és hőmérsékletálló gumicső,
- Hőmérséklet szabályozását szolgáló számítógép és az ehhez kapcsolódó LabWindows program,
- Fűtőszálakat vezérlő áramkörök.

A Bond féle korrekciós tényezők a következők [83]:

- k_1 — száraz őrlés faktora; $k_1 = 1,3$;
- k_2 — nyitott körfolyam faktora; értéke az őrlési finomságtól függ;
- k_3 — átmérő faktor; ha $D \neq 2,44$ m, akkor

$$k_3 = \left(\frac{2,44}{D} \right)^{0,2} \quad (2.46)$$

- k_4 — durva feladás faktora; ha

$$X_{80} > X_{opt} = 4000 \sqrt{\frac{13}{W_{i(mert)}}}$$

akkor k_4

$$k_4 = \frac{r + (W_i - 7) \left(\frac{X_{80}}{X_{opt}} - 1 \right)}{r} \quad (2.47)$$

ahol X_{opt} optimális feladás 80 %-os szemnagysága, $r = X_{80}/x_{80}$ aprítási fok.

- k_5 — finom őrlési faktor; ha az őrlemény 80 %-os szemnagysága $x_{80} < 75 \mu\text{m}$, akkor

$$k_5 = \frac{x_{80} + 10,3}{1,145 x_{80}} \quad (2.48)$$

- k_6 — kis aprítási fok faktora; ha $r < 6$, akkor

$$k_6 = 1 + \frac{0,13}{X_{80}/x_{80} - 1,35} \quad (2.49)$$