



SZÁRÍTÓ-GYŰRŰSMALOM-SZÉLOSZTÁLYZÓ ŐRLŐRENDSZER ÜZEM-OPTIMÁLÁSI MÓDSZERÉNEK KIDOLGOZÁSA

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Nagy Lajos okl. bányamérnök

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

MISKOLC, 2009

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevez	etés	4
2.	Szakir	odalmi áttekintés: a tudomány és technika mai állása	9
	2.1. Az	őrlés jellemzése	9
	2.2. A	mechanikai aktiválás, energiaviszonyok	10
	2.3. Fiz	zikai töréselmélet	14
	2.4. Ap	rítási munkatörvények	17
	2.4.1.	Rittinger-féle "felületi" elmélet	19
	2.4.2.	Kick – Kirpicsev "térfogati elmélet"	20
	2.4.3.	A Bond – féle "harmadik" elmélet	21
	2.5. Az	aprítási hatásfok értelmezése	23
	2.6. Őr	ölhetőségi vizsgálati eljárások	25
	2.6.1.	Az őrölhetőség fogalma és vizsgálata	
	2.6.2.	A Hardgrove-eliárás	27
	2.6.3.	Zeisel – módszer	
	2.6.4.	A Bond-féle vizsgálat	
	2.7. Gy	rűrűsmalom (görgősmalom)	
	2.7.1.	A gyűrűsmalmok formái és igénybevételei	
	2.7.2.	A malom átbocsáitási- és teljesítményigénye	
	2.7.3.	A szakirodalom és a tudományos előzmények összefoglalása	
3	A kuta	tómunka célia, vizsgálati és értékelési módszerek	36
4	Az őrl	ési munka üzemi körülmények közötti meghatározása	
	4.1. Az	jizem	
	4.2. Üz	emiellemzők	42
	4.2.1.	Görgős malmok méret- és üzemiellemzői	
	4.3. Üz	em – paraméterek, megfontolások az üzemi mérésekhez.	
	4.4. A	mérés	
	4.4.1.	Üzem: mérés, őrlés és szárítás energia felvételének megállapítása	
	4.4.2.	Szárítás és a gázüzem kapcsolata	
	4.4.3.	Kilépő levegő hőmérséklet és a késztermék nedvességtartalmának	
		kapcsolata	
	4.4.4.	Kilépő levegő hőmérséklete és a porszűrés kapcsolata	
	4.4.5.	A küszöbhőmérséklet meghatározása	
	4.5. Er	edmények az új üzemállapothan	56
	4.5.1.	Failagos gáz felhasználás alakulása 2005 – 2008	
	4.5.2	Gázfelhasználás 2005 - 2008	57
	46 Ka	nacitás kihasználás és a failagos energia felhasználás	
5	Labora	atóriumi mérések kísérletek	
υ.	51 Ur	iverzális Hardgrove-malom	64
	5.2 A	mérési eredmények kiértékelése	66
	521	Mintaanvagok	
	522	Szemcseméret elemzés	
	523	Nedvességtartalom	
	5.2.4	Sűrűség elemzés	68
	53 Ha	rdorove vizsoálat	
	5.3.1	A mészkő minták vizsgálata légszáraz állanothan a hőmérséklet	
	0.0.1.	függvénvében	70

	5.3.2.	Különböző felületi nedvességtartalommal rendelkező mészkő	
		őrölhetőségi vizsgálata	73
	5.3.3.	A laboratóriumi és üzemi mérési eredmények összehasonlítása	75
	5.3.4.	Meddővel kevert mészkő vizsgálata	76
5.	4. Bo	nd munkaindex meghatározás	78
	5.4.1.	Az üzemi mérések alapján számított Bond – munkaindex	79
5.	5. Me	egállapítások, következtetés levonása a laboratóriumi mérések	
	ere	dményeiből	81
6.	Üzemi	kísérletek az energiamodell meghatározására	82
6.	1. Üz	emi kísérletek	82
6.	2. Ro	bbantás hatása az őrölhetőségre	84
6.	3. Az	őrlési energia mérleg modell kialakítása	85
	6.3.1.	A malom szerkezeti kialakításából adódó tényezők	86
	6.3.2.	A malomra feladott anyag őrlést befolyásoló jellemzői	86
	6.3.3.	Az őrlés-osztályzás áthúzó légárama	
	6.3.4.	Az őrlőtányér egyenletes forgómozgását biztosító üresjárati energia	
		igény meghatározása	
6.	4. Az	energia mérleg, mérlegmodell	89
	6.4.1.	A malom hajtómű vesztesége	90
	6.4.2.	A hajtómű palást hőátadási vesztesége a környezet felé	91
	6.4.3.	A feladott anyag hőmérséklete és nedvességtartalma	91
	6.4.4.	Az áthúzó légáram hőmérlege	92
	6.4.5.	A malom palást hőleadása	92
6.	5. Az	üzemi mérések végrehajtása	92
6.	6. Aı	mérési eredmények kiértékelése	93
	6.6.1.	Hajtómű veszteség	93
	6.6.2.	A malom szilárdanyag áramának hőtartalom változása	96
	6.6.3.	A feladással a rendszerbe kerülő víz	97
	6.6.4.	Az áthúzó levegő hőmérséklet és páratartalom változása, energia igénye	98
	6.6.5.	A malompalást hő vesztesége	100
	6.6.6.	Az őrlőtányér mozgási energiája	103
	6.6.7.	Az őrlési folyamat energia eloszlása	104
	6.6.8.	Územi Bond-index meghatározás	107
	6.6.9.	Az őrlés energiamérlege	109
	6.6.10.	A modul eredménye alapján meghatározható energiatakarékos termék	
		minőség szabályozás	110
7.	Osszef	foglalás	114
8.	Summ	ary	118
9.	Köszö	netnyilvánítás	122
10.	Publik	ációk	123
11.	Szakir	odalom	124
12.	Mellék	cletek	129

1. Bevezetés

A fejlett társadalomnak egyre több, számára fontos, vagy nélkülözhetetlen ásványi nyersanyagot kell kitermelni a földkéregből. A kitermelés, mely bányászati módszerekkel, bányászati technológiával történik, csak az első lépés abban a folyamatban, amely során a nyersanyagból a társadalom és az egész számára, a létfenntartáshoz, a minél magasabb színvonalú életminőség eléréséhez szükséges eszközök, tárgyak keletkeznek.

A bányászat során az ember a természettel találja magát szembe, beavatkozik a természet egységébe, károsítja azt. Mindannyiunk közös felelőssége, hogy lehetőségeinkhez mérten a beavatkozás következményeit alaposan felmérve, csökkentsük annak természetromboló hatását.

A természetbe való beavatkozás nem reverzibilis folyamat. Szinte kivétel nélkül maradandó változásokat eredményez. Ezen változások, jövőnkre kiható eredményeinek meghatározása sokszor vitatott, de a bolygónk állapotában negatív változásokat vetít előre.

Nehéz és nem könnyen meghatározható az a határ, amely a jóléti társadalom igényeinek kielégítése és a természeti egyensúly fenntarthatósága között húzódik. Ennek a határvonalnak a bizonytalansága, törékeny volta kötelez bennünket arra, hogy a jóléti társadalom kellő önmérséklete mellett, keressük az általunk használt technológiák azon lehetőségeit is, amellyel a természet egyensúlyi állapota megőrizhető, az egyes, bányászati technológiával kitermelt anyagok kellő megfontoltságú hasznosításával a földünk természeti kincseinek igénybevétele csökkenthető.

Nem lehet cél a bányászat és a hozzátartozó feldolgozó ipar elsorvasztása, de mindenképpen cél kell, hogy legyen, ezen ágazatok, környezetünkért felelős gondolkodású irányítása.

Napjainkban, ahogy az emberiség története alatt mindig, a nyersanyag kitermelés, feldolgozás nélkülözhetetlen; az emberiség nem tud meglenni sem az energiaellátás zömét biztosító nyersanyagok, sem a mindennapi életben használatos bányászati termékek, nyersanyagok nélkül.

Állításom bizonyítására mutatom be az 1. táblázatban a magyarországi nyersanyagtermelés alakulását rendelkezésemre álló 2003-2007 közötti időszakra vonatkozóan [1].

Ásványi nyersanyag		Mérték-		Т	'ermelés	*	
megnevezése		egység	2003	2004	2005	2006	2007
1.	Kőolaj	Mt	1,1	1,1	0,9	0,9	0,84
2.	Földgáz**	Mt	3,1	3,2	3,2	3,2	2,65
1.0		Mt	4,2	4,3	4,1	4,1	3,49
1-2.	Szennidrogenek összesen	%	100	102	98	98	83
3.	Feketekőszén	Mt	0,7	0,3	-	_	_
4.	Barnakőszén	Mt	4,1	2,5	1,4	1,4	1,45
5.	Lignit	Mt	8,6	8,5	8,2	8,5	8,35
35	Szán összasan	Mt	13,4	11,2	9,6	9,9	9,8
5-5.	Szen összesen	%	100	84	72	74	73
6.	Uránérc	Mt	—	-	—	_	—
1-6	Energiahordozók összesen	Mt	17,6	15,6	13,7	14,0	13,3
1-0.		%	100	89	78	80	76
7.	Szén-dioxid (CO ₂) gáz**	Mt	0,2	0,1	0,1	0,1	0,11
8.	Vasérc	Mt	-	_	—	_	-
9.	Mangánérc	Mt	0,0	0,05	0,05	0,05	0,05
10.	Bauxit	Mt	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5
11.	Ólom-cinkérc	Mt	—	_	—	—	—
12.	Rézérc	Mt	_	_	-	_	_
8-12	Ércek összesen	Mt	0,7	0,7	0,6	0,6	0,55
0-12.		%	100	100	86	86	79
13	Á sványbányászati nyersanyagok	Mt	2,9	2,9	3,5	3,6	3,0
15.	Asvanybanyaszati nyersanyagok	%	100	100	121	124	103
14.	Cement- és mészipari nyersanyagok	Mt	5,8	5,4	5,0	5,7	5,5
15.	Építő- és díszítőkő ipari nyersanyagok	Mt	10,1	13,0	15,1	17,9	13,0
16.	Homok- és kavicsipari nyersanyagok	Mt	42,0	46,4	69,0	46,5	34,8
17.	Finom- és durvakerámia- ipari nyersa.	Mt	6,3	5,9	9,3	5,2	4,9
14-17	Énítőinari ásványi nyersanyagok	Mt	64,3	70,7	98,4	75,3	58,2
14-17.	Epitoipan asvanyi nyersanyagok	%	100	110	150	117	91
18	Tázan lánföld lánimás-	Mt	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
10.	Tozeg-taptolu-taptiliesz	%	100	100	100	100	100
13 18	Namfámas ásványi nyarsanyagak	Mt	67,3	73,7	102,0	78,9	61,3
15-10.		%	100	110	152	117	91
1-19	Mindösszasan	Mt	85,7	90,0	116,4	93,7	75,3
1-10.	14111111055265611	%	100	105	136	109	88

* Országos mérlegben elszámolt nyers bányatermék

** 1000 $m^3 = 1$ tonna

1. táblázat: Ásványi nyersanyagtermelés az utóbbi 5 évben Magyarországon [1]

A táblázatot megfigyelve láthatjuk, hogy az ország gazdasági helyzetével összefüggésben – pl. a nagyarányú gyorsforgalmi úthálózat építés 2006-ban – az éves termelése a bányászatnak hullámzó, de összességében ~ 90 Mt/év körül ingadozik a bemutatott időszakban.

A táblázatban feltüntettem az energiahordozó nyersanyagok kitermelési volumenét is, hiszen a föld energiaigényének kielégítése, a fosszilis energiahordozókból előállított villamos energiatermelés légköri következményei szintén fontos szerepet játszanak földünk környezeti egyensúlyának megtartásában.

Az ásványi nyersanyag termelés statisztikai adatai mellett fontos áttekinteni Magyarország reménybeli nyersanyag vagyonának összefoglaló adatait is [2](2. táblázat).

Nyersanyagfőcsoport		Reménybeli földtani vagyon	Reménybeli kitermelhető vagyon	
		Mt	Mt	
1.	Kőolaj	33 - 195	10 - 58	
2.	Konvencionális földgáz*	41 - 132	29 - 93	
3.	Szénhez kötött metángáz*	143	29 - 50	
4.	Szénhidrogén összesen (1+2+3)	217 - 470	68 - 201	
5.	Szén-dioxid gáz*	_	_	
6.	Feketekőszén	298	336	
7.	Barnakőszén	1289	975	
8.	Lignit (külfejtéses)	1341	1236	
9.	Szén összesen (6+7+8)	2928	2547	
10.	Uránérc	62	7	
11.	Bauxit	208	151	
12.	Ólom-cinkérc	190	192	
13.	Rézérc	268	276	
14.	Mangánérc	11	9	
15.	Vasérc	37	37	
16.	Nemesfémércek	21	21	
17.	Ércek (fémhordozók) összesen (10+11+12+13+14+15+16)	797	693	
18.	Ásványbányászati nyersanyagok	28 196	16 004	
19.	Cementipari nyersanyagok	22 401	17 307	
20.	Építő- és díszítőkő	122 354	99 549	
21.	Homok és kavics	265 553	203 648	

22.	Kerámiaipari nyersanyagok	201 667	141 131
23.	Építőipari ásványi nyersanyagok összesen (19+20+21+22)	611 975	461 635
24.	Tőzeg-lápföld-lápimész	_	_
25.	Nemfémes összesen (18+23+24)	640 171	477 639
26.	MAGYARORSZÁG ÖSSZESEN (4+9+17+25)	644 120- 644 373	481 040- 481 152

* $1000 \text{ m}^3 \text{ gáz} = 1 \text{ tonna}$

2. táblázat: Magyarország reménybeli nyersanyagvagyonának összefoglaló adatai

(2008. I. 1.) [2]

Láthatjuk, országunk nyersanyag vagyona gazdag, és még hosszú évtizedekre, esetenként évszázadokra megteremti a lehetőséget a kitermelésre és az ásványi nyersanyagok hatékony felhasználásához az előkészítésre.

Ha megvizsgáljuk, hogy a kitermelt ásványi nyersanyagok össz volumenén belül milyen részarányt képviselnek azok a nyersanyagok, amelyet a kitermelés után egy vagy több lépcsőben aprítási, őrlési folyamatnak vetünk alá, igen nagy értéket kapunk.

			,	Termelés		
	Mértékegység	2003	2004	2005	2006	2007
Ásványi nyersanyag	Mt	85,7	90,0	116,4	93,7	75,3
Aprítást, őrlést igénylő nyersanyag mennyiség	Mt	81,4	85,6	112,2	89,5	71,71
	%	95	95	96,4	95,5	95,2

3. táblázat: Ásványi nyersanyagtermelés [2]

A feltűnően magas, aprítási és őrlési előkészítést igénylő nyersanyagok feldolgozása során komoly mennyiségű energiára van szükségünk. A különböző ásványi nyersanyagok aprítási, őrlési fajlagos energia igénye különböző, de átlagosan az éves felhasznált összenergia mennyiségnek 3-5 %-át fordítjuk ilyen célra. Ha megnézzük Magyarország ugyanezen időszakra jutó energia felhasználását, megállapíthatjuk, hogy még a mi esetünkben is igen jelentős az az energia mennyiség, amit az ásvány-előkészítés ezen műveleteire használunk fel.

Év	Termelés [GWh]	Felhasználás [GWh]
2003	34.145	41.084
2004	33.708	41.180
2005	35.755	41.982
2006	35.859	43.066
2007	39.959	43.945

4. táblázat: Hazai villamosenergia-termelés és felhasználás alakulása [3]

Megállapíthatjuk továbbá, hogy az aprítási energiafelhasználás csökkentéséhez igen jelentős nemzetgazdasági érdek fűződik.

Mindemellett az őrlés, aprítás műveletek energia igényének, ill. az erre a célra felhasznált energia mennyiségének csökkentése, a csökkentés lehetőségeinek vizsgálata nem csak gazdaságossági kérdés, hanem nagyon komoly szerepe van, és lehet a természeti környezetünk állapotának megtartásában, a környezet romboló folyamtok önhordóvá válásának megakadályozásában.

Szakirodalmi áttekintés: a tudomány és technika mai állása

Az ásványelőkésztés területén a technológiák működési költségének legnagyobb eleme az energia felhasználás, amelynek ~ 2/3 részét az aprítási folyamatok emésztik fel [4]. A következőkben az aprítás elméleti alapokat kívánom ismertetni, ugymint a mechanikai aktiválás általános jellemzőit, aprítási munkatörvényeket, őrölhetőségi vizsgálatokat, továbbá a görgős malmok működését, gyakorlati jelentőségét.

2.1. Az őrlés jellemzése

A diszperz rendszerek előállításának legelterjedtebb módja a mechanikai energiával való diszpergálás, az őrlés. A modern ásványelőkészítésben és a szilikátipar különböző technológiai folyamataiban a finomőrlésnek nagy jelentősége van, hiszen tapasztalat szerint a finomőrleményeknek – beleértve a szilikátásványokat is – igen nagy a felhasználási területe.

Az őrlés közvetlenül érzékelhető eredménye a szilárd anyagok szemcseméretének csökkenése, ezért az un. "aprítási törvények" [5, 12, 85] az őrléskor befektetett mechanikai energia és szemcseméret között keresnek, és írnak le összefüggéseket. Már 1966-ban Austin és Klempel [6] 1600-nál többre becsülte az e témakörrel foglalkozó szakirodalmi közlemények számát, s ez a szám azóta tetemesen tovább növekedett. A vizsgálatokat újabban kiterjesztették az őrlés során végbemenő folyamatoknak, az őrlemények kristályszerkezetének és egyéb fizikai és kémiai tulajdonságainak részletes tanulmányozására, ami ahhoz a felismeréshez vezetett, hogy az őrlés, illetve. a mechanikai diszpergálás eredménye nem kizárólag a szemcseméret csökkenése, hanem hatásaira az anyag szerkezete is megváltozhat [7, 12].

A szilárd anyagokban őrlés közben végbemenő anyagszerkezeti változások, meglehetősen bonyolult átalakulások között érdemes különbséget tennünk,

- elsődleges (primer) mechanokémiai és a

- másodlagos (szekunder) mechanokémiai folyamatok között [16].

Az elsődleges folyamatok a rendszer szabad energiájának a növekedését hozzák létre, és az őrlemény reakcióképességét, aktivitását megnövelik.

Elsődleges folyamatnak tekinthetjük a diszperz rendszer részecskéinek a mechanikai igénybevétel okozta deformációját és eltörését, valamint a töréskor megjelenő lökésszerű belső felmelegedésüket. Az elsődleges folyamatok közé sorolhatjuk azokat az átalakulásokat is, melyek közvetlenül a deformáció és a hőlökés következtében mennek végbe a test belsejében, mint rácshibák keletkezése és elmozdulása.

Másodlagos folyamatnak tekinthetjük azokat a mechanikai energiával aktivált szilárd anyagokban spontán végbemenő átalakulásokat, melyek a rendszer szabad energiájának a csökkenését idézik elő. (szabad felületi energia csökkenés, rekrisztalizáció, agglomerizáció)

A másodlagos mechanokémiai folyamatok részint már az őrlés alatt végbemehetnek az őrleményben (a deformáció periódusában vagy a mechanikai erőhatások pillanatnyi szünetébenben) részint pedig az őrlés után, ha a rendszer az ilyen átalakításokra nézve kedvező körülmények közé kerül.

2.2. A mechanikai aktiválás, energiaviszonyok

Általános megfogalmazásban az őrlést a kristályos szilárd testek kötési energiájával szemben végzett munkának foglalhatjuk fel; kötési energián azt az energiát értjük, melyet elméletileg akkor végzünk, amikor a diszperz rendszer atomjait (ionjait) környezetükből kiemelve, egymástól elvileg végtelen távolságra viszünk.

Figyelembe véve, hogy a diszperz rendszerben a szemcséken belüli és a szemcsefelületi atomoknak egymástól eltérő kötőerőssége van, az egységnyi tömegű diszperz rendszer kötési energiája

$$E = n_b e_b + n_f e_f = (n - n_f) e_b + n_f e_f = n e_b - n_f (e_b - e_f) \qquad (1) \qquad [16]$$

ahol n_ne_b a belső, n_fe_f a felületi kötési energia megoszlása.

Az egyenletben $ne_b = E_r$ a nem diszperz rendszer kötési energiája, a tökéletes kristály esetén a rácsenergia.

 $n_f (e_b - e_f) = E_{\gamma} = e_{\gamma}S - a$ szomszédos atomokból le nem kötött felületi erők által képviselt energia, a felületi szabadenergia (E_{γ}), mely a fajlagos felületi szabad energia e_{γ} , és a fajlagos felület (S) szorzataként fogható fel. $n=n_b+n_{\rm f}\,$ - a rendszer atomjainak a száma

n_b – belső atomok száma

 $n_{\rm f}-f$ elületi atomok száma

A helyettesítések után

$$\mathbf{E}_{\mathbf{k}} = \mathbf{E}_{\mathbf{r}} - \mathbf{e}_{\gamma} \mathbf{S} \tag{2}$$

A kötési energia változása pedig az őrlés után

$$\Delta E_{k} = \Delta E_{r} - \Delta(e_{\gamma}S) = \eta_{z} W_{z}$$
(3)

ahol W_z – az őrléskor végzett munka

 η_z - az őrlés hatásfoka, ami alatt itt a kötési energia változásának és a befektetett őrlési munkának a hányadosát értjük.

Ha az őrlést, mint a mechanikai energiával való aktiválást, a kötési energia változásával, tehát a (3) egyenlet szerint jellemezzük, akkor formailag mindegy, hogy a mechanikai energia elnyelésekor melyik állapotjelző megváltozása idézte azt elő.

A kötési energia változása szempontjából az őrlési idő függvényében a következő részfolyamatokat állapítottuk meg:

- Ha az őrléskor csak a fajlagos felület változik, akkor:

$$\eta_z W_z = \Delta E_k = -e_r \Delta a_s \tag{2}$$

abban az esetben, ha η_z állandó, akkor az egyenlet a Rittinger-egyenlettel összhangban van.

- Ha a fajlagos felület mellett a felületi szabadenergia is megváltozik, akkor a következő őrlési munka egyenletet kapjuk:

$$\eta_z W_z = \Delta E_k = -\Delta(e_r a_s) \tag{3}$$

 Végül, ha a fajlagos felület és a fajlagos felületi szabadenergia növekedése mellett csökken a kristály rácsenergiája is (kristályrácstorzulás következik be, vagy az anyag amorffá válik), akkor az általános egyenlethez jutunk:

$$\Delta E_k = \Delta E_r - \Delta (e_r a_s) = \eta_z W_z \tag{4}$$

A szélső esetek alapján az első esetben *mechanikai diszpergálást*, a másodikban felületi aktiválást, a harmadikban pedig *mechanokémiai aktiválást* különböztetünk meg.

A szilárd anyagokban őrlés közben végbemenő, meglehetősen bonyolult átalakulások között különbséget tettünk *elsődleges és másodlagos* mechanokémiai folyamtok között.

Az *elsődleges* mechanokémiai folyamtok a rendszer szabadenergiájának növekedését hozzák létre, és az őrlemény reakcióképességét, aktivitását növelik.

A *másodlagos* mechanokémiai folyamtok a rendszer szabadenergiájának csökkenését, ill. a kötési energia növekedését, azaz az aktivitás csökkenését idézik elő. Egy tipikus *másodlagos* folyamat az őrlemény *részecskéinek kölcsönhatása*, az *agglomeráció*, mely nemcsak az őrlemény durvulásához, hanem aktivitásának, reakcióképességének csökkenéséhez is vezet. Az Őrlési gyakorlat azt mutatja, hogy bizonyos diszperzitásfok elérése után az anyag további finomodása lelassul, sőt a részecskeméret növekedése, azaz az őrlemény durvulása következik be.

A diszperzitásfok őrlési idővel történő változását az 1.a. ábra szemlélteti.



1.a. ábra A diszperzitásfok változása az őrlési idővel [87]

Az őrlés megindulásakor az anyag aránylag gyorsan finomodik, az őrléshez szükséges munka (adott esetben őrlési idő) megközelítőleg arányos a létrejött új felülettel, azaz a képződő őrlemény diszperzitásfokával. Ezen a szakaszon – melyet *Rittinger*-szakasznak neveztünk – a részecske-kölcsönhatás elhanyagolhatóan kicsi (*1. ábra, a szakasz*).

Az őrlés előrehaladásával, az őrlemény diszperzitásfokának növekedésével csökken az anyag hibahely sűrűsége és nő a törési szilárdság. Ezzel párhuzamosan megkezdődik a részecskéknek az őrlőtestekre és a malom falára, valamint egymáshoz való tapadása. A diszperzitásfok görbéjének laposodása arra mutat, hogy az őrléshez szükséges munka és a létrejött új felület közötti arányosság megszűnt, de a diszperzitásfok növekedése – ennek ellenére – még mindig jelentős (*1. ábra, b szakasz*).

Hosszabb ideig tartó őrlés után a finomság növekedése minimumra csökken, majd teljesen megszűnik, sőt a diszperzitásfok csökkenése, azaz az őrlemény durvulása következik be (*1. ábra, c szakasz*). Ezen a szakaszon a rideg anyagok általában kristályszerkezeti, illetve mechanokémiai változásokat is szenvednek.

A *b* szakaszt az *aggregáció*, a *c* szakaszt az *agglomeráció* szakaszának neveztük, mivel vizsgálataink szerint a megjelölt szakaszokon a részecske-kölcsönhatás folyamatai nemcsak mennyiségileg, hanem minőségileg is különböznek egymástól.

A részecske-kölcsönhatás kinetikája és mechanizmusa igen bonyolult. A részecskék összetapadása a szitamaradék növekedését okozhatja. Az őrlés folytatását az összetapadt részecskék újbóli aprózódása vagy éppen további részecskeméret-növekedés is kísérheti. A finomőrléskor az őrleményben végbemenő anyagszerkezeti és mechanokémiai átalakulások a részecske-kölcsönhatási jelenségeket is nagymértékben befolyásolják (1.b. ábra).



1.b. ábra [87]

2.3. Fizikai töréselmélet

Törésen a szilárdtest makroszkópos értelemben végbemenő szétválását értjük, ami teherbíró képességének megszűnésére vezet. A törés fizikai oka az, hogy az atomos, ill. a molekuláris kötések külső terhelés és /vagy belső mechanikai feszültségek következtében, továbbá az őket körülvevő közeg hatására felbomlanak, és ezáltal szabad felület keletkezik.

Minden anyaghoz, a kötési erőktől függően, tartozik egy olyan σ_{th} *elméleti törési feszültség*, amely – ha a kristályrácsban egyöntetű húzó-igénybevételt tételezünk fel – a következők szerint becsülhető (2. ábra).



2. ábra Atomos feszültség – elmozdulás diagram [88]

Ahhoz, hogy a rács valamely atomsíkja egyensúlyi helyzetéből x távolsággal elmozduljon,

$$\sigma = \sigma_{\max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \approx \sigma_{\max} \frac{2\pi x}{\lambda}$$
(1.1)

feszültség kell, azaz a feszültség elmozdulás összefüggése atomos méretekben λ hullámhosszúságú sinusfüggvénnyel írható le. A *Hooke-törvény* szerint

$$\sigma = \mathbf{E} \; \frac{x}{d},\tag{1.2}$$

ahol d a rácsállandó;

E a rugalmassági modulus.

Az (1.1) és (1.2) alapján

$$\Sigma_{\max} = \frac{E\lambda}{2\pi d} \tag{1.3}$$

Az atomok között levő kötések megbontásához szükséges munka (a vonalkázott terület az 1.1. ábrán)

$$\int_{x=0}^{\lambda/2} \sigma_{\max} \sin \frac{2\pi x}{\lambda} \, dx = \frac{\sigma_{\max} \lambda}{\pi} = 2 \gamma_o \tag{1.4}$$

Az egyenletben γ_o a fajlagos vagy valódi felületi energiát jelenti.

$$\sigma_{th} = \sigma_{\max} = \left(\frac{E\gamma_o}{d}\right)^{1/2}$$
(1.5)

Az elméleti törési feszültséget (törési szilárdságot) az (1.5(-tel pontosan számítani nehéz, mivel a fajlagos felületi energia meghatározása nem egyszerű. Az elméleti törési feszültség határait az atomos kötési erők alapján a következő módon lehet becsülni:

$$\frac{E}{5} > \sigma_{th} > \frac{E}{15} \tag{1.6}$$

Ez a durva közelítés elvileg minden szilárdtestre érvényes.



3. ábra. A repedés csúcsában néhány atom között levő kötésre koncentrálódó terhelés. [88]

A valódi törési feszültség ezzel szemben több nagyságrenddel kisebb, mint ezek az elméleti értékek. Ennek az az oka, hogy a terhelés a repedések vagy az anyag repedésszerű inhomogenitásainak csúcsában mindössze néhány atomos kötésre koncentrálódik. Így pl. az

(1.5) szerint egy 3µm-es (kb. $10^4 d$) mikrorepedés esetében a σ_{th} (repedéssel) $\approx 10^{-2} \sigma_{th}$ (repedés nélkül) [88].

Továbbá Žurkov [1.2] kinetikai töréselmélete szerint az atomos, ill. molekuláris kötések megbontását különböző fizikai folyamatok statisztikus eredményének kell tekinteni, amelyekben a mechanikai terhelésen kívül az atomok termikus mozgása (fluktuációja) is közrejátszik. Utóbbinak elsősorban a polimereknél van jelentősége.

Az eddigi vizsgálódások a repedések keletkezését egyszerűsítik; nem veszik tekintetbe ugyanis azt, hogy – ha az elcsúszásra elengedő mód nyílik – a diszlokációk keletkezése és mozgása, vagyis egy *képlékeny tartomány* kialakulása folytán (1. a 3.1.4. pontot) a repedéseknél keletkező feszültségcsúcsok ismét leépülhetnek.

Orowan elsőként rámutatott, a γ_o fajlagos felületi energiát egy lényegesen nagyobb, γ_{eff} *tényleges felületi energiával* kell helyettesíteni; az anyagok alakíthatóságától függően írható:

$$\gamma_{eff} \approx (10...10^3) \gamma_o$$

Amorf vagy részben kristályos polimerekben a repedés keletkezését folyási sávok (*crazes*) megjelezése előzi meg. A sávok nagyon megnyúlt, a terhelés irányával párhuzamos orientációjú molekulaláncokból állnak; szélességük néhány mikrométerig, hosszúságuk legfeljebb néhány milliméterig terjedhet. Akkor keletkeznek, ha nagy feszültségkoncentrációk következtében (molekuláris szerkezet hibái, idegen részecskék, nyírási kötegek) a feszültség a folyáshatárt meghaladja. Ennek során a különösen erősen terhelt makromolekulák széthasadhatnak és mikro üregek keletkezhetnek. A sávok további növekedése a pórusok között levő rostok (*fibrillák*) szakadását okozza, és a repedés kezd a folyási sávok mentén terjedni.

Az amorf polimerekhez hasonlóan üvegekben is megfigyelték a SiO₂ molekulák "craze"-szerű megnyúlását, amelyet a hálós szerkezet széthasadása követett.

A továbbiakban a mikro repedés és a szövetszerkezeti paraméterek közötti kölcsönhatások irányítják a repedés terjedését a repedéscsúcs mellett közvetlenül elhelyezkedő ún. *törési tartományban*. A repedés terjedésére ebben a tartományban a legtöbb esetben az jellemző, hogy a fő repedés előtt mikro repedések, ill. üregek keletkeznek, amelyek ezután vele egyesülnek.

A repedés terjedése során – a törési tartomány jelentős képlékeny alakváltozásán és a mikro repedések képződésén kívül – más energiaátalakulási (energiadisszipációs) folyamatok hatása közé tartozik a hőtermelés, a hang emissziók, a feszültség okozta fázisátalakulások, valamint a belső feszültségi állapot megváltozása. Mindez az ún. disszipációs tartományban megy végbe, amelynek a terheléstől függő kiterjedése a képlékeny tartományéhoz (4. ábra) hasonlóan számítható. Olyan anyagszerkezet céltudatos előállításának a lehetőségét, ahol a megnövelt energiadisszipáció következtében nő az ellenállás a repedésterjedéssel szemben, műszakilag már kiaknázták a növelt szívósságú kerámiák gyártásában.





Összefoglalva megállapítható, hogy a fizikai törés a repedéskeletkezés és -terjedés többszakaszos folyamatának tekintendő. A folyamatot meghatározó tartományok az 4. ábrán láthatók. Ebben a képlékeny, ill. az energiadisszipációs tartománynak az a szerepe, hogy a feszültségi és alakváltozási mezők átrendeződéseivel megteremtsék a kompatibilitást a törési tartomány irreverzibilis alakváltozásai és a rugalmasan alakváltozott anyagrészek között.

2.4. Aprítási munkatörvények

Az aprítási munkatörvények, az aprítás elmélet egyik fontos feladta az őrlendő anyag diszperzitásfoka és az őrlőberendezés által őrlésre fordított energia közötti összefüggések megállapítása. Az őrlési folyamat igen bonyolult volta miatt a probléma még a mai napig sem

tekinthető megoldottnak, annak ellenére, hogy a kérdéskörre vonatkozó irodalom igen kiterjedt.

A fizikai aprítási munka több részből tevődik össze [16]

- Rugalmas alakváltozás munkája, melynek nagy része kinetikus energiává majd hővé alakul.
- Felületi energia növelésére fordított munka.
- Friss törési felület struktúra változása.
- Szívós anyagok makro plasztikus deformációja, 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, görgők, szemcsék és fal egymás között) és külső súrlódása (csapágy, hajtómű és fogaskerék súrlódási vesztesége). [16]

Beke az "őrlési hatásosság" növelésének mechanikai lehetőségét elemzi [17].

Először tisztázza az aprítás hatásfoka körüli kérdéseket, amit inkább hatásosságnak említ, mivel előbbi definíciót inkább erőgépekre alkalmazhatjuk.

Az aprítógépre jellemző hatásfoknak Stairmand 1977-ben az egyedi aprítás és a gépi tömeges aprítás energia hányadosát adja meg. Számításai alapján különböző aprítógép fajtákra az 5. táblázatban feltüntetett hatásfok értékek adódtak [18].

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

^{5.} táblázat [18]

Meric 1978-ban adott áttekintő képet az egyes módszerek energetikai összehasonlításáról [19]. 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 apró szemcsék aggregációját vagy agglomerációját okozza.

Hukki és Reddy szerint [20] a legkézenfekvőbb őrlési energia –szemcseméret kapcsolatot befolyásoló tényezők a következők lehetnek:

- az anyag homogenitása vagy heterogenitása
- az anyag szerkezetében rejlő vagy létrehozott hibák
- az anyagszerkezeti tulajdonságok
- az anyag sűrűsége
- az őrlőberendezés tulajdonságai
- a fajlagos felület növekedése, meghatározásának problémája
- nyitott vagy zárt (kör)folyamatról van-e szó?
- Száraz vagy nedves őrlést végzünk-e?
- A finom rész flokkulációja vagy diszpergálódása a használt közegben.

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

2.4.1. Rittinger-féle "felületi" elmélet

Az elmélet [21] szerint, az aprításra felhasznált energia arányos az aprítás következtében keletkezett felülettöbblettel. Ennek lényege, hogy az aprításhoz szükséges W_R munka a keletkező A törési felülettel arányos, $W_R = c_R A = c_R x^2$.

A Rittinger-törvény közhasználati alakja, amelyből a fajlagos munka:

$$W_{R} = c_{R} \left(\frac{1}{x_{2}} - \frac{1}{x_{1}} \right) = c_{R} \left(\frac{\nu - 1}{x_{1}} \right)$$
 (17)

A képletben c_R a Rittinger féle állandó, ami a fajlagos felületi energiával arányos

 $\frac{1}{x_2}$ és $\frac{1}{x_1}$ értékek az azonos méretűnek feltételezett szemcsékből álló halmaz

térfogat egységre vonatkozó fajlagos felületét jellemzik. x1 a kiinduló, x2 a végső szemcseméret

$$\frac{x_1}{x_2} = \mathbf{V} - \operatorname{aprítási} \operatorname{fok}$$

A Rittinger törvény a kohézió legyőzéséhez szükséges hasznos munkát veszi alapul, de figyelmen kívül hagyja az ezt többszörösen meghaladó, rugalmas deformációs munkát. Ugyanakkor helyesen tükrözi az energiaigénynek az aprózódás előrehaladásával való növekedését.

A fent említett összefüggések főként a finomőrlés tartományban (x<50µm) alkalmazhatók eredményesen, ahol a nagy aprítási fok miatt a friss törési felület is nagy. A hibahelyek csökkenésével azonban a fajlagos felületi energia a durvább fokozathoz képest nagyobb. Ez az elmélet a rugalmas deformációs munkát nem veszi figyelembe [12], pedig a valóságos anyagok aprítása jelentős deformációs munkát is igényel.

2.4.2. Kick – Kirpicsev "térfogati elmélet"

A Kirpicsev [22] és Kick [23] által felállított, térfogati elmélet a rugalmas feszítési munkáját a törési munkával egyenlőnek tételezte fel. A térfogati elmélet szerint 1cm élhosszúságú kockára az aprítás energia igénye.

$$W_k = \int_{o}^{\lambda} \sigma d\lambda$$
 és mivel $\lambda = \frac{\sigma}{E}$ (18)

$$W_{k} = \frac{1}{E} \int_{0}^{\sigma} \sigma d\sigma = \frac{\sigma^{2}}{2E}$$
(19)

lineáris rugalmas alakváltozásra érvényes

ahol E – a rugalmassági modulus,

- σ a törőfeszültség
- λ a fajlagos nyúlás

x cm élhosszúságú kocka esetén a törőerő P = σ x², a teljes nyúlás $\ell = \lambda x$ azaz

$$W_k = x^3 \frac{\sigma^2}{2E} = V - \frac{\sigma^2}{2E} = c_k V$$
(20)

ahol a V az aprítandó test térfogata, és amiből a fajlagos munka

$$W_{k=}c_{k}\left(\lg\frac{1}{x}-\lg\frac{1}{x}\right)$$
(21)

ahol $c_k - a$ Kirpicsev – Kick állandó

 $x_1 \, X - a$ térfogati átlagszemcsenagyság

A "térfogati" elmélet a törést kiváltó munkát helyesen veszi számításba, de ugyanakkor az energia szükségletet az elért szemcsenagyságtól függetlennek tekinti, ami nem fogadható el, különösen a finomőrlés tartományban, ezért a térfogat-elmélet a durva aprítás (x>50 mm) energia szükségletének a meghatározásakor alkalmazható megbízhatóan [24].

2.4.3. A Bond – féle "harmadik" elmélet

A Rittinger és Kirpicsev-Kick elméleteknél bemutatott W_R és W_t mértani közepével számolva a Bond képlethez (1952) jutunk.

$$W_{\rm B} = 2\sqrt{W_{\rm R}W_{\rm k}} = 2\sqrt{c_{\rm r}}x^2c_{\rm k}x^3 = c_{\rm B}x^{2.5}$$
(22)

amelyből a fajlagos törési munka:

$$W_{\rm B} = c_{\rm B} \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right) [\rm kWht^{-1}]$$
(23)

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 [11].

A Bond-index megmutatja, hogy egységnyi tömegű (térfogatú) ∞ szemcseméretű anyag $x_{80} = 1 \ \mu$ m-ra történő őrléséhez mennyi energiára van szükség. Ennek meghatározása a termék finom szemcsemérete miatt nehézségekbe ütközik, ezért a mutatót a gyakorlatban használt 10 μ m-ra való őrlésre határozzák meg, amit Bond - munkaindexnek neveztek el [26].

$$W_{iB} = \frac{c_B}{\sqrt{100}}$$
 (24)
 $C_B = 10 W_{iB}$ (25)

$$W_{\rm B} = W_{\rm iB} \left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right)$$
(26)

E három aprítási munkatörvény c_R , c_k és c_B állandója Beke szerint (1975) a következő módon számítható át [26]

$$c_{\rm R} = 0.5 c_{\rm B} x_{B,a}^{0.5} \qquad ha < 50 \,\mu{\rm m}$$
(27)
$$c_{\rm k} = 1.15 c_{\rm b} x_{B,f}^{-0.5} \qquad ha > 50 \,\,{\rm mm}$$
(28)

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

A fajlagos aprítási munka leggyakrabban használatos mértékegységei a következők:

$$Jkg^{-1} = m^2 s^{-2} = 1/3600 \text{ kWht}^{-1}$$
(29)

A Kick-, Bond- és Rittinger-féle elméletek helytálló közelítést jelentenek egy relatíve szűk szemcseméret tartományra. A Bond-féle összefüggés az 50 μ m 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.

Hukki és Reddy [20] 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 értékekben a különböző szemcsenagyságok mellett érdemleges eltérés mutatkozhat annak jeléül, hogy az anyag aprítási ellenállása a különböző szemnagyságoknál eltérő [25] az aprítógép hajtásának P_m [kW] teljesítmény szükséglete a fentiek [Kick, Bond vagy Rittinger] szerint meghatározott W_f [kWh/t] fajlagos munka ismeretében és Q[t/h]aprítógép kapacitás esetén $P_m = QW_f$.

Tarján G. [11] hangsúlyozza, hogy e "munkatörvények" csak bizonyos szemcsehatárokon belül, közelítőleg érvényesek. Nem lehet a törés komplikált fizikai jelenségeit egyszerű képletekkel tág szemcsenagyság határokra is érvényesen kifejezni.

2.5. Az aprítási hatásfok értelmezése

SMEKAL [36] az aprítás eredményének a felületi energiát tekintette, és ezzel levezette az aprítás hatásfokának a fogalmát. Ezen állítás bírálatával BEKE [37] foglalkozott. Beke szerint valamilyen energia átalakítógép hatásfokát egy tört adja meg, melynek számlálója a hasznosított (w), nevezője az összes bevezetett (W) energia $\eta = w/W$. A nem hasznosított energia hővé alakul át (Q) és így a hatásfok

$$\eta = \frac{w - Q}{W} \tag{34}$$

Ha tehát az aprítás hatásfoka valóban tizedszázalék értékű, a mérési hibahatáron belül, a bevezetett energiát teljes egészében hő alakjában kell megtalálnunk. A nagyüzemi

malmokban végzett vizsgálatok "energiamérlegében" azonban mintegy 10 – 20 % hiány mutatkozott [37].

	Max energia veszteség	
	Jg ⁻¹	%
Részecske –részecske súrlódása	27,00	58,08
Részecske – gép súrlódása	2,16	4,64
Gép részeinek plasztikus deformációja	6,41	13,78
Részecskék plasztikus deformációja	7,41	15,93
Felületképzési energia	3,52	7,57
	46,50	100,00

BOWN [38] egy lassú őrlési folyamatra a következő "energia mérleget" közli:

Ezen adatok szerint az energiának jelentős része hő alakjában szabaddá válik.

Ugyanakkor számos kutató által végzett kalorimetrikus mérések azt mutatták, hogy az energia érdemleges része a szilárd testben, illetve az őrlési termékben akkumulálódik. SCHELLINGER [39] laboratóriumi golyósmalmot kaloriméterbe helyezve, és a malmot csupán őrlőtestekkel töltve megkapta a 100 %-os hőenergiát, de ha anyagot is őrölt benne, akkor 10 – 20 %-os hiány mutatkozott.

A szakirodalom tanulmányozása során nem derült ki, hogy a "fázisátalakulás", illetve "egyéb folyamatok" mennyiben mérhetők hő formájában.

SEKULA [40-42] és munkatársai módszert dolgoztak ki a diszperz rendszer valamint az őrlési folyamat energia eloszlásának kvantitatív meghatározására.

Az általuk kifejlesztett berendezéssel mérték a rendszerbe bevezetett (W_z) és az őrlés során felszabadult (Q) energiát. A mérési eredményekből a megmunkáló eszköz (W_i) és az aprított anyag (W_m) belső energiájának növekedése meghatározható.

$$\Delta W_{i} + \Delta W_{m} = W_{z} - Q \qquad (35)$$

Összehasonlítás végett, az alábbiakban a különböző módszerekkel meghatározott, a szilárd testben, illetve diszperz rendszerben "akkumulálódott energia értékek" adatai látható.

Folyamat jellege	Szerző	Energiaértékek (J/g)
Egyedi részecske törése	RUMPF, SCHŐNERT, STEIER [34,35,44]	8 - 83
Lassú őrlés malomban	B OWN [39]	12 - 16
Őrlés golyósmalomban	SCHELLINGER [40,45]	25 - 175
Csiszolás	BESSONOV [45]	8 - 12
Fúrás	SEKULA – TKACOVA [41-43]	250 - 335
Őrlés dezintegrátorban és rezgőmalomban	HEEGN, BERNHARDT és munkatársai [46-49]	21 - 335

6. táblázat [84]

Bár az eredmények viszonylag jó egyezést mutatnak, mégis a probléma terén még sok nyitott kérdés maradt. A mechanokémiai folyamat energia eloszlásának kvantitatív meghatározása metodikailag még nincs véglegesen megoldva.

2.6. Őrölhetőségi vizsgálati eljárások

2.6.1. Az őrölhetőség fogalma és vizsgálata

A mechanikai diszpergálásra, illetve aktiválásra kerülő anyagok jellemzése szempontjából igen fontos azok mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállása, illetve őrölhetősége.

Az őrölhetőség, mint anyagjellemzőnek a meghatározása azonban nem egyszerű feladat. Az őrölhetőségi mérőszámmal tulajdonképpen azt kell megmutatni, hogy egységnyi energia ráfordítással milyen aprítási eredmény érhető el. Az őrölhetőség fogalmának tisztázásához mindenekelőtt meg kell vizsgálnunk, hogy mit értünk a mechanikai diszpergálás eredménye alatt.

A kérdést egyszerűsítve, a mechanikai diszpergálás eredményét a Rittinger-elv, vagyis az energiaráfordítás – felület növekedés arányosságának elfogadása mellett, a fajlagos felület, illetve a diszperzitásfok növekedésével jellemzik.

Ha
$$\Delta S = KW_z$$
 (36)

ahol $\Delta S - a képződő új felület$

W_z – a mechanikai diszpergáláshoz használt energia

K – arányossági tényező,

akkor az őrölhetőség; K = $\frac{\Delta S}{W_z}$ megadja az egységnyi munkaráfordítás által képzett felületet.

A mechanikai diszpergálás, illetve aktiválás eredménye nem csupán a felület növekedése, hanem a felület minőségének a változása is, másrészt a felületnövekedés és az energia ráfordítás arányossága nem fogadható el a mechanikai diszpergálási folyamat egészére, mivel a részecskék felületi kölcsönhatása következtében az új felület képzésére jutó fajlagos energia ráfordítás egyre növekszik, sőt bizonyos határon túl már felület csökkenéssel jár.

A mechanikai diszpergálás eredménye fogalmát tehát csak a mechanokémia szempontjából tudjuk egyértelműen definiálni, mert csak így dönthetjük el, hogy egyrészt meddig fogadható el az aprítás eredményének csupán a fajlagos felület, illetve a diszperzitás fok növekedése, másrészt, hogy milyen változásokon (felületi aktiválás, kristályszerkezeti változások, illetve mechanokémiai reakciók) megy át az anyag a mechanikai diszpergálás során. A szemcsék kölcsönhatása jellegének és mértékének ismeretében meghatározhatók a Rittinger-törvény érvényességének a határai is.

Ha tovább vizsgáljuk az őrölhetőségnek, mint anyag jellemzőnek az értelmezését, akkor olyan megállapításra jutunk, hogy egy rideg anyag őrölhetősége egyetlen mérőszámmal nem is jellemezhető, miután az a diszperzitásfokkal is változik, és egyrészt a törendő anyagrészecskék egyedi tulajdonságaitól (keménység, porozitás .. stb.) másrészt azok un. kollektív tulajdonságaitól, azaz a részecskék kölcsönhatásra való hajlamától egyidejűleg függ. Az őrölhetőségi jelzőszám csak akkor fogadható el anyag jellemzőként, ha az anyag mindezen tulajdonsággal – nevezzük őket őrölhetőségi tulajdonságoknak – magába foglalja.

A gyakorlatban elterjedt őrölhetőség vizsgálati módszerekkel – abból kiindulva, hogy az anyag őrölhetősége és a mechanikai diszpergálási eljárás együttesen határozza meg az ipari méretű aprítóberendezések energiafogyasztását – bizonyos jelzőszámokat (általában Jg⁻¹-ben kifejezve) állapítanak meg, valamely szitamaradékra vagy fajlagos felületre vonatkozóan, amelyekből a meglévő és kidolgozandó aprítóberendezések hatékonysága kiseb-nagyobb pontossággal becsülhető. Ezek alapján olyan laboratóriumi-vizsgálati módszer tekinthető a legtökéletesebbnek, amely a vizsgálati körülményeket és a kapott értékeket tekintve, legjobban megközelíti a gyakorlatot.

Az őrölhetőség meghatározására vonatkozó fontosabb eljárásokat REMENYI [49] foglalta össze. A következőkben néhány őrölhetőség vizsgálati módszert mutatok be.

2.6.2. A Hardgrove-eljárás

A Hardgrove-eljárást [50] az Egyesült Államokban szenek relatív őrölhetőségi tényezőjének meghatározására szabványos módszerként vezették be 1937-ben.

A módszer a Rittinger-féle törvényen alapszik, azaz a Hardgrove mutató a

$$H = \frac{\Delta F}{F_o} \ 100 \tag{37}$$

képlettel meghatározható, ahol ΔF a fajlagos felületnövekedés a feladott anyagnak, míg F_0 az etalonanyag őrlésekor nyert fajlagos felületnövekedés [cm²/g].

Az etalon anyag egy USA beli, a St. Jerome bányából származó szénminta, amelynek fajlagos felület növekedése 565 cm²/g. Az őrlőtérben 8 db. Ø 1" (25,4 mm) golyó 290 N terhelés mellett 60 fordulaton keresztül végzi az őrlést 20 $\frac{1}{perc}$ fordulatszám mellett.

A Hardgrove-módszer gyakorlati alkalmazásánál a mintával meghatározott mennyiségű őrlési energiát közlünk a fentiek szerint, majd az őrlési eredmények, azaz a finomodás mértékét szitálással állapítjuk meg. Az őrölhetőségi jelzőszámot az empirikus

$$H = 13 + 6,93 D_{74}$$
(38)

képlettel számoljuk, ahol a D_{74} az 50 g feladott mintából a 74 µm-es szitán áthullott mennyiség.

A Hardgrove módszer hátránya, hogy jellemzően az őrlés durva fokozatára jellemző.

A (38) képlet segítségével egy dimenzió nélküli mérőszámhoz jutunk, amely a szakirodalom alapján a legtöbb esetben átszámítható a Bond - munkaindexre.

2.6.3. Zeisel – módszer

A Zeisel – módszernél [51,52] a mechanikai diszpergálás időtartamának a növelésével az anyagot a kívánt finomságra őrlik és az energiafogyasztást nyomaték mérés alapján

mérik. A mért munkaráfordításból a fajlagos őrölhetőség (W_t) a következő képlettel számítható

$$W_t = \frac{0.275W_z}{g}$$
(39)

ahol W_Z – az őrlési munka

g - a bemért anyagmennyiség

A Zeisel vizsgálat szerint – ahol az őrlőtányért egy csapágyazott tengelyre helyezték, úgy azt az őrlési ellenállás elfordíthatja – egy körfolyamatos, több lépcsős őrlést kell végezni 25g 0,75 - 1 mm szemcseméretű mintán. Az elfordulást dinamométer akadályozza meg. Nagyobb őrlési ellenállás nagyobb rúgónyúlással jár. A rúgónyúlást elektromosan mérik. Az őrlés 30 sec-ig tart, ami után az őrleményt egy 0,125 mm-es szitán osztályozzák. A durva részt friss feladással 25 g-ra kiegészítik és újra hasonlóan őrlik. Ezt addig folytatják, amíg a kiszitált finom késztermék mennyisége megközelíti a 25 g-ot.

Zeisel szerint az üzemi őrlés fajlagos energiaigénye a laboratóriumi mért fajlagos őrlési munka háromszorosa [25,53].

2.6.4. A Bond-féle vizsgálat

A Bond-féle eljárás [54] körfolyamatos őrlést valósít meg.

A Bond-féle módszer szerint az aprítás teljes hasznos munkája fordítottam arányos a termékszemcsék átmérőjének négyzetgyökével [55-57].

Az üzemi viszonyokat legjobban megközelítő követelmények az álabbiak.

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

Bond a száraz golyósmalom – minősítő vizsgálatokat a nedves őrlésre vonatkozó adatokkal hozta összefüggésbe. A száraz őrlésre vonatkozó adatok a nedves őrlés adataiból 4/3 –dal való szorzással kaphatók [57].

A Bond-féle un. "harmadik aprítás elmélet" szerint az üzemi fajlagos őrlési munka a 2.4.3 fejezetben ismertetett (23) és (24) képletekkel határozható meg.

Bond az őrölhetőségi mutató kidolgozásához több száz üzemi mérést végzett el.

A laboratóriumi körülmények között egy Ø 305x305 mm-es dobmalomban egy Ø 2,44 x 2,44 m-es ipari malomban elvégzett nedves őrlést modellez. A késztermék aránya a visszajáró durva anyag mennyiségéhez 1/2,5 (5. ábra) [52].



5. ábra [52]

A laboratóriumban elvégzett kőrfolyamatos őrlési kísérletből W_{iB} munkaindex a következő empirikus képlet segítségével határozható meg [52].

$$W_{iB} = \frac{4.9}{x_{max}^{0.23} G^{0.82} \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}^{1}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}^{1}}} \right)}$$
(40)

ahol x_{max} – a kész finom termék maximális szemcsemérete [µm]

általában $x_{max} = 100 \ \mu m$

 X'_{80} és $x'_{80}\,$ - a feladás és az őrlemény 80%-os szemcsemérete $[\mu m]$

 G – az őrölhetőségi tényező [g/fordulat], a laboratóriumban egy fordulat alatt képződő friss x_{max} alatti anyag mennyisége az egyensúlyi állapotban [60,26,61,54]

A malomba 0,7 dm³ laza térfogatú 3,36 (3,15) mm alá tört anyagot adunk fel. Ezt első lépcsőben 100-150 malomfordulatig őröljük, majd a 100 µm-tól finomabb részt kiszitáljuk, és e tömeget megmérjük. A durva részt friss feladással kiegészítjük az eredeti mennyigére és újabb őrlésre a malomba helyezzük. Az őrlést az egyensúly beálltáig folytatjuk, azaz G értékének az utolsó 3 lépcsőben konstansnak kell lenni. Az első lépcső után szükséges malomfordulatot a következő képlet segítségével kapjuk [52,53,55,56,61]

$$N_{i+1} = \frac{0,286m_i - m_{Mi}\Delta m(x < 100\,\mu m)}{G_i}$$
(41)

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

Az ipari gyakorlatban a W- munka (P teljesítmény és Q feldolgozó képesség hányadosa), x_{80} - a termék szemcsemérete és X_{80} – a feladási szemcsemérete mérésével a W_{iBind} üzemi Bondmunkaindex meghatározható a következő összefüggéssel [62,63]

$$W_{iB} = \frac{W}{10\left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}}\right)}$$
(42)

2.7. Gyűrűsmalom (görgősmalom)

2.7.1. A gyűrűsmalmok formái és igénybevételei



6. ábra [78]

A gyűrűsmalmoknál egy kőrgyűrű formájú őrlőpályán 1-6 beépített őrlőhengerrel történik az őrlés. A gyűrűs malmok sematikus vázlatát és a legfontosabb elrendezéseket a 6. ábra mutatja. Az elrendezési vázlatokon látható hat malomtípus. A fellépő erőhatások figyelemébe vételével három csoportra osztottuk.

1. külső erőhatás (rugó vagy hidraulika)

- a) Golyós gyűrűsmalom
- b) Hengermalom
- c) Gyűrűs hengermalom

2. centrifugális malmok

- d) Centrifugális golyósmalom
- e) Ingás görgős malom

3. nehézségi erő malom

f) Görgős járat

Az őrlőtestek hengeres vagy görgősek, egyenes vagy gömbölyű őrlőfelülettel, de található csonka kúp vagy golyó őrlőtest is. Az őrlőtestekhez illesztve az őrlőpálya munkafelületének kiképzése egyenes vagy homorú (tálformájú). Az őrlőhengereknél, amelyek térben rögzítettek, de van mozgási lehetőségük, az őrlőpálya van meghajtva (6. ábra a,b,c), a centrifugális malmoknál az őrlőtestek forognak (6. ábra b, e) és a görgős járatnál (6. ábra f) mint két mozgási lehetőség megvalósul. A nyomóerőket vagy hidraulika, ill. rugó biztosítja vagy a forgó őrlő test súlyából eredő centrifugális erő biztosítja. Az őrlőtestek az őrlőpályához viszonyítva minden esetben függőleges síkból tudnak kitérni, elmozdulni. Igénybevételkor tehát ez egy erő átadás és nem nyírás.

Ezen kívül ezzel elérünk egy túlterhelési védelmet a nem őrölhető anyaggal szemben. Az őrlemény általában az őrlőágyban kerül erőhatás igénybevétele alá (7. ábra), aminél a legtöbbször az őrlőpálya és az őrlőtest kerületi sebesség különbségéből adódó súrlódás lép fel. A feladási anyag mennyiséggel és egy gyakran meglévő torlasztó gyűrűvel tudjuk az anyagágy magasságát h_1 az őrlőpálya külső peremén szabályozni. Az igénybevett ágy magassága h_2 a termék őrölhetősége, összenyomhatóságát és nyomerő alapján szabályozza önmagát.



Az egyes nagy szemcsék behúzási feltételei a 4.1. fejezetben kerül bemutatásra, a legnagyobb szemcse átmerőjéhez viszonyítva az őrlőhenger átmerőjének legalább 11-szeresnek, a valóságban legalább 40-szeresnek kell lennie.

2.7.2. A malom átbocsájtási- és teljesítményigénye

A gyűrűsmalmoknál különbséget kell tenni a belső körfolyam, amely a friss feladásból és az osztályozóról az őrlőzónába visszahulló anyagmennyiség összegéből áll és a malmon együttesen áthaladó anyagmennyisége között. A malmon átfolyó teljes anyag mennyiségét tapasztalati értékekből összefüggésben egy közepes őrlőpálya átmerő D_m megkapjuk:

$$m \sim D_m^{2,4...2,7}$$
 [78]

Ez az arányszám függ a malom típustól és a termék tulajdonságaitól (őrölhetőség, nedvesség) valamint az őrlési finomságtól. Közép kemény nyers cement lisztnél (mészkő) az átfolyás nagysága függ a szitamaradéktól a 90µm-os szitánál (8. ábra), amelyen négy különböző nagyságú malom adatai szerepelnek (az adatok a Fa. Gebr. Pfeiffer AG, Kaiserslautern –tol származnak).



8. ábra [78, 85]

A fajlagos munkaigény ilyen malmoknál – szintén függ az anyag őrölhetőségétől és a termék finomsági követelményétől – kb. 3 kWh/t könnyen őrölhető, lazább anyagoknál, és kb. 15 kWh/t egy nehezen őrölhető anyagnak a nagyon finomra őrlésénél. A 8. ábra mutatja a nyers

cement lisztértékeit. Itt a különbség csak az aprításra fordított és a berendezés (malomosztályozó) ezzel szükséges fajlagos munka között.

2.7.3. A szakirodalom és a tudományos előzmények összefoglalása

A szakirodalom, ill. a tudományos előzmények alapján megállapítható

 Olyan őrlőberendezések használata esetén, ahol az őrlés – osztályzás – szárítás egy berendezésen belül kerül megoldásra, a komplex folyamat energiaigényének meghatározásával, az energia igény optimalizálásával az általam áttekintett szakirodalom nem foglalkozik.

Nagyon sok publikációban, szakkönyvben találtam az őrlés energiaigényének belső eloszlására vonatkozó becsült adatokat, de komplex vizsgálatokat és ezek eredményeit nem sikerült feltárnom.

 Az őrlési – energia – szemcseméret kapcsolatára nincs olyan elméleti megoldás, amely valamennyi körülményre alkalmas lenne.

Az ásványelőkésztésben használatos azonos típusú berendezéseknél is a feladott anyag – még azonos típusú anyagnál – folyamatos minőségi változása miatt a fajlagos energiaigény változik. Napjainkig a tudomány világában olyan elméletek kidolgozását eredményezte, melyekkel egy-egy anyagfajtára, laboratóriumi körülmények között, jól használható eredményeket kapunk.

Tekintettel arra, hogy az őrölhetőség az anyagtól és a berendezéstől függ, ezért az energiamérleg számításokat is célszerű egy adott üzem energia – optimalizációjához az adott anyagra és gépre elvégezni.

 Az egyes, működő technológiákra alkalmazható mérési eljárások más metodikát igényelnek, mint a laboratóriumi mérések módszertanra.
 A technológia folyamatra a mérési modellt, a méréshez szükséges eszközöket

egyedileg kell megtervezni, kiválasztani, hogy a kitűzött cél elérése minél biztosabb legyen.

Az általam végzett vizsgálatok, kutatások közvetlen fő célkitűzése az volt, hogy a gyárba beépített technológiai folyamat őrlés – osztályozás – szárítás egységére meghatározzam az

optimális energia felhasználást, ugyanakkor az eredmények számos vonatkozásban általánosíthatók:

- az ipari körülmények közötti Bond-index meghatározás alkalmazható minden olyan ásvány-előkészítési területen, ahol az őrlés a gyűrűsmalmok különböző típusaival történik;
- az energia modell és ezen keresztül az őrlés osztályozás szárítás technológiai egység fajlagos energia felhasználásának optimalizálását megalapozó módszer;
- az energia modell és a mérési eredmények alapján kialakított automatikus előre csatolásos folyamatvezérlés, amelyen keresztül elérhető energiatakarékos termék minőségszabályzás.

3. A kutatómunka célja, vizsgálati és értékelési módszerek

Az általam elvégzett kutató munka egyrészt a hazai – és a nemzetközi szakirodalom tanulmányozását, az értekezésben szereplő kísérletek elvégzéséhez szükséges mérési módszerek kiválasztását és kialakítását laboratóriumi mérések elvégzését, kiértékelését, másrészt a laboratóriumi mérésekkel párhuzamosan, üzemi körülmények közötti, az őrölhetőségre, a fajlagos energiára ill. energiamérlegre vonatkozó mérések végrehajtását jelentette.

Különösen fontos része volt a kísérleteknek az üzemi körülmények között végzett mérések, amelyek a laboratóriumi mérésekkel ellentétben soha nem tiszta alapanyaggal végzett őrlést jelentettek.

Ekkor a feladási anyag meddőtartalmának, nedvességtartalmának az őrlésre kifejtett hatása, a külső, időjárási körülmények őrlési - szárítási energiát befolyásoló hatása (hőmérséklet, csapadék) igen jelentős.

Ezért a munkában fontos szerepe volt a laboratóriumi és üzemi mérések kiértékelésének, és a mérési eredmények összehasonlításának, összefüggések keresésének.

Láttuk a szakirodalmi összefoglalóban, hogy az őrléshez bevezetett munka nagyobbik része hővé alakul. Ezért kiemelt célja volt a kutatómunkámnak, hogy a felszabaduló hő lehető legnagyobb hányadát hasznos szárítási energiaként hasznosítsam.

Ennek érdekében az őrlés fajlagos energiájának laboratóriumi és üzemi meghatározásán túl fontos része a kutatásoknak, hogy üzemi körülmények között, amikor a késztermék szárítása külső energia forrással – esetünkben az áthúzó légáram hevítésekor használt földgázzal – történik, megfelelő mérési modellt ill. mérőrendszer dolgozzak ki, amelyek eredményei helyesen mutatják a valós energia átalakulási folyamatokat. A mérési eredmények lehetővé tegyék olyan folyamat vezérlési rendszer kidolgozását, amely alapján a szárításhoz szükséges energia optimalizálható, amellyel elkerülhető, hogy a folyamat ismerete nélkül lényegesen több "külső" energiát használjunk fel a szárításhoz, mint azt a feladott anyag és a környezet paraméterei szükségessé teszi.

A fentiekben leírt kutatási témára vonatkozóan szakirodalmi támogatást az energia-, és szabályozási modell kialakítására alig találtam. Ezt a területet érintő publikációk szinte kizárólag a bevitt villamos energia eloszlását a malmom belül, az őrölhetőségi vizsgálatoknál
vizsgálták, és nem foglalkozik az irodalom a bevitt energia, látszatra veszteségként jelentkező részének a szári tásban hasznosításával, és mérések eredményein keresztül a "külső" szárítási energia nagyságának egy matematikai modellen keresztül történő meghatározásával, irányításával.

Az üzemi kísérletek során négy kísérleti ciklusban, különböző feladási paraméterek között, több mint tízezer. mérési eredmény alapján határoztam meg a folyamat szabályozás alap elemeit.

A méréseket üzemi körülmények között a technológiába beépített mérőberendezések felhasználásával, ill. új mérőhelyek és új műszerek felhasználásával végeztem.

- Nedvességtartalom meghatározás szárítókemencével a helyszínen.
- Légáramba beépített Comet típusú páratartalom- és hőmérsékletmérő.
- Hitelesített hőmérők.

A mérési eredmények feldolgozása:

- Matematikai statisztikai módszerek.
- Korrelációs módszerek.
- Mérőszámok, mutatók képzése.

4. Az őrlési munka üzemi körülmények közötti meghatározása

4.1. Az üzem

A Mátrai Erőmű füstgáz kéntelenítő berendezésének működtetéséhez egy magas $CaCO_3 - 95-$ 97 % között – tartalmú és nagy finomságú – 90 µm alatt 92 % - mészkőőrlemény előállítása, vált szükségessé. A Kft. 1998 – 2000 között a gyártáshoz szükséges technológiát megépítette, és folyamatosan üzemelteti.

A technológia három nagy egységre osztható:

- 1. A jövesztett mészkő előkészítése:
 - Meddő leválasztás
 - Előtörés, 250 mm alá
 - Után törés 0 60 mm
 - A szükséges szállító és portalanító berendezések
- 2. Az őrlés osztályzás
 - Görgős malom egybeépítve a légosztályzóval
 - Porszűrő a hozzátartozó szállítócsigákkal
 - A légellátást biztosító ventilátor
- 3. Késztermék kezelés
 - Késztermék szállító elevátorok, silótöltő csigák
 - Vasúti és közúti töltés, árukiadás ömlesztve
 - Zsákolás, árukiadás

Tudom, hogy ez a megbontás önkényes, de ha megvizsgáljuk az egyes, általában behatárolt technológiai egységek villamos energia igényét, egyértelműen jelentkezik az őrlés-osztályzás terület, mint a legnagyobb energiaigényű technológiai egység.

A beépített villamos teljesítmények eloszlása:

1.	előkészítés	672,7 kWh	14,00 %
2.	őrlés, osztályzás	3.660,97 kWh	76,6 %
3.	késztermék kezelés	448,8 kWh	9,4 %
		4.782,47 kWh	100,00 %

A gyár 2000-ben történt üzembe helyezése óta zavartalanul működik, eredményessége folyamatosan javult, de az utóbbi években bekövetkezett drasztikus energiaár növekedés, ráirányította a figyelmet az egyik legnagyobb költségtétel csökkentés lehetőségeinek a vizsgálatára, az eredmények gyakorlati bevezetésére.

Ezek után talán érthető, hogy a technológia leg energiaigényesebb részével az őrléssel kezdtem foglalkozni, és elsősorban az üzemben végzett kísérletek révén .(a 9. ábra piros szaggatott vonallal határolt részében)



9. ábra Technológiai folyamatábra

Külön vizsgálat tárgyát kell, hogy képezze az őrlés-osztályzási rendszerbe beépített ventilátor működésének optimalizálása a szállított légmennyiség – végtermék szemszerkezet – energia fogyasztás függvényében, állandó értéken tartott malom feladás mellett, ezért jelen munkában e kérdéskörrel nem foglalkoztam.

A technológia alap berendezése a Pfeiffer AG által gyártott 2 db WSM 2800 típusú görgős malom, amelynek axonometrikus rajzát a 10. ábra mutatja.



10. ábra Pfeiffer görgős malom

A malom egy több egységből álló, áthúzó légáramú, függőleges elrendezésű őrlőberendezés. A lényeges elemei – az őrlő és osztályozó – egy kompakt egységet képeznek, egymással fixen össze vannak építve.

Lényeges jellemzője a malomnak a három, egymáshoz képest 120°-os szögben álló, fixen helyhez kötött görgő. Amelyek egy lassan – 28 – 32 fordulat/perc – forgó őrlőtányéron gördülnek. A görgők egy közös nyomókerettel, és három hidraulikus hengerrel, egy statikusan meghatározott rendszert képeznek, amely az őrlőágyra és ezen keresztül a hajtóműben lévő szegmens nyomcsapágyra is, egy egyenletes teherelosztással hatnak. Minden őrlőhenger vagy

görgő mozgathatóan össze van kötve a nyomókerettel és oldalirányban ingamozgást tud végezni. Ezeknek az ingamozgásoknak és a feszítő rendszer pneumatikus rugózásának köszönhetően, az őrlőhengerek optimálisan illeszkednek az őrlőágyhoz. A megőrlendő anyagot a görgők és az őrlőtányér behúzza, és apró darabokra töri.

A feladott anyag őrléséhez szükséges erőt az őrlőhengerek és az őrlőtányér megfelelő összenyomása hozza létre, amit egy hidropneumatikus feszítő rendszerrel érünk el, és ezt az erőt szükség esetén az őrlés közben is lehet változtatni. A fellépő nyomó- és nyíróerők következtében a malomra feladott anyag megőrlődik és a centrifugális erő hatására kifelé, a fúvókagyűrűhöz kerül. Az alulról, a fúvókagyűrűn keresztül jövő gáz – esetünkben levegő – átáramlik az őrleményen úgy, hogy az a fúvóka gyűrű feletti anyag tartományában "folyó ágyat" képez. Eközben a durvább szemek visszaesnek az őrlőtányérra és tovább őrlődnek.

A finomra őrölt szemcséket a gázáram magával ragadja és az osztályozóhoz viszi. Az osztályozó rotorja az ide került anyagot finomőrleményre és durva őrleményre osztályozza. A finomőrlemény kívánt szemszerkezetének a beállításához a rotor szabályozható fordulatszámú hajtással rendelkezik. Az osztályozott, megfelelő szemszerkezetű anyagot a gázáram magával viszi, és a malom utáni porszűrőben történik a levegő és por elegyének a szétválasztása.

A durva őrlemény visszaesik az őrlőtányérra, és ismét bekerül az őrlési folyamatba. Igény esetén a durva őrlemény egy szállítócsiga segítségével részben vagy teljesen kivehető az őrlési körfolyamatból más célú felhasználásra.

Az őrlő berendezés rendelkezik egy un. külső anyag körforgással is. Nagyobb terhelés esetén a fúvókagyűrűn keresztül kieső anyagok őrlőberendezés talapzatában lévő csőcsonkon keresztül kiürítésre kerülnek és egy szállítószalagon, elevátoron keresztül visszajuttathatók az őrlési folyamatba.

Korábban már említettem, az egész őrlés-osztályzás folyamat légáramban történik, és a légellátó rendszerbe egy földgáz üzemű léghevítő-gázégő került beépítésre, melynek feladata az őrléstérbe kerülő levegő megfelelő hőmérsékleten tartása.

Leegyszerűsítve az energia kérdést a második technológiai egységre, megállapítható, hogy a feltűnően magas villamos energia igény - ~3661 kWh – mellett ezen a területen még jelentős földgáz felhasználási igény is jelentkezik, jelentkezhet.

Tekintsük át a görgős malom működésének elméleti kérdéseit.

41

4.2. Üzemjellemzők

4.2.1. Görgős malmok méret- és üzemjellemzői

A görgős malmokkal felszerelt ipari őrlőberendezések méretezésének alapját az őrlendő anyag/őrlemény vizsgálata során megállapított anyagjellemzők képezik. Ezek első sorban az őrlési finomságra vonatkozó olyan értékek, mint a fajlagos elektromos energiafogyasztás, az áteresztési tényező, és a fajlagos koptatási tényező. A nagyszámú – különböző méretű – üzemi őrlőberendezéssel szerzett tapasztalatok fentieken kívül arra is rámutatnak, hogy a görgős malmok fő hajtóművének fajlagos munkaigénye csak az őrlendő anyagtól függ, a gép nagyságától nem. Ez a tény azt feltételezi, hogy egy tervezett üzemi őrlőberendezés hajtási teljesítménye a következők szerint határozható meg [85]:

$$\mathbf{P}_{\mathrm{B}} = \mathbf{W}_{\mathrm{mMT}} \cdot \boldsymbol{m}_{\mathrm{FB}} \tag{1}$$

A hajtási teljesítmény másrészt egy – az őrlendő anyagtól és az őrlés finomságától függő – súrlódási tényezőből (f_{MT}), valamint az őrlőerőből (F_{WB}), az őrlőgörgők számából (Z_B)és az őrlési sebességből (v_{SB})számítható:

$$P_{B} = f_{MT} \cdot F_{WB} \cdot Z_{B} \times v_{SB}$$
⁽²⁾

A (2) egyenlet a kinetika (forgás) általánosan ismert törvényszerűségéből vezethető le.

$$\mathbf{P} = \mathbf{M}_{d} \cdot \boldsymbol{\omega} = \mathbf{F} \cdot (\mathbf{D}/2) \cdot (2\pi \cdot \mathbf{n}/30) = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}$$
(2a)

$$F = f_{MT} \cdot F_{WB} \cdot Z_B \tag{2b}$$

Ha egyenlővé tesszük az (1) és a (2) egyenletet:

$$W_{mMT} \cdot m_{FB} = f_{MT} \cdot F_{WB} \cdot Z_B \cdot v_{SB}$$
(3)

akkor az adódik, hogy az őrlésteszt során két – az őrlendő anyagtól függő – jellemzőt (W_{mMT} , f_{MT}) mértünk. Görgős malmokra vonatkozóan ez a két jellemző írja le az őrlendő anyag őrölhetőséggel kifejezhető tulajdonságait. A görgőerő, az őrlőgörgők száma, és az őrlési sebesség őrlésteszt nélkül is kielégítő pontossággal megállapíthatók a nagyszámú tapasztalati érték alapján. A W_{mMT} fajlagos munkaigényt és az őrlendő anyagtól függő f_{MT} tényezőt azonban

 – csakúgy, mint eddig – a viszonylag nagy ráfordítást igénylő tesztekkel lehet minden egyes őrlendő anyagra vonatkozóan megállapítani.

A (3) egyenlet azt is mutatja, hogy a fajlagos munkaigény nem elegendő a görgős malmok pontos méretezéséhez, mivel az őrlendő anyag és az őrlési finomságtól függő f_M súrlódási tényező széles határok között változik. A (3) egyenlet bal oldalán a hajtási teljesítmény, a jobb oldalán pedig a malom geometriai méretei állnak.

Egy üzemi őrlőberendezés finomőrlemény-tömegárama a (4) egyenlet szerint határozható meg, a geometriai méretek és a vizsgálati áteresztési tényező figyelembe vételével:

$$m_{\rm FB} = \left(d_{\rm SB} / d_{\rm ST}\right)^{2,5} \cdot m_{\rm MT} \tag{4}$$

ahol d_{SB} és a d_{ST} a tesztmalom átmérője és m_{FT} a finomőrlemény tömegárama a tesztmalomnál. Ezt az egyenlőséget 1973-ban első alkalommal hozta nyilvánosságra a Gebr. Pfeiffer AG cég, és csak szigorú geometriai és eljárástechnikai hasonlóság esetén érvényes [5]. A következőkben a hasonlósági feltételeket, e törvényszerűség alapjait vezetjük le.

Az őrlendő anyag egy őrlőgörgő által időegységenként átgördített mennyisége az alábbiakból adódik:

$$m = \zeta \cdot \mathbf{s} \cdot \mathbf{b}_{\mathbf{W}} \cdot \mathbf{v} \tag{5}$$

Ahol ζ - az ömlesztett anyag fajsúja, s – őrleményágy vastagsága, b_w – görgő szélessége és v – az üzemi malom őrlőpálya sebessége (általában).

Az ennek során előállított finomőrlemény-arány:

$$\stackrel{\bullet}{m}_{\rm F} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{m} \tag{6}$$

Az őrlendő anyagra hat a az centrifugális gyorsulás:

$$a_z = (\omega^2 \cdot D) / 2 = (2 \cdot V^2) / D$$
 (7)

$$\lambda_{s} = s/d_{W};$$
 $\lambda_{b} = b_{W}/D;$ $\lambda_{D} = d_{W}/D$

hosszarányokkal az (5-7) egyenletekből kapjuk az őrlőgörgők z_B számára:

$$\stackrel{\bullet}{m}_{\rm F} = \mathbf{z}_{\rm B} \cdot \mathbf{f} \cdot \boldsymbol{\zeta} \cdot \boldsymbol{\lambda}_{s} \cdot \boldsymbol{\lambda}_{b} \cdot \boldsymbol{\lambda}_{D} \cdot \left(\mathbf{a}_{\rm Z}/2\right)^{0.5} \cdot \mathbf{D}^{2.5}$$
(8)

Ezzel egy adott malomkonstrukcióra és adott üzemi paraméterekre:

$$m_{\rm F} \sim D^{2.5} \tag{9}$$

Az a törvényszerűség, miszerint a finomőrlemény átáramló tömege a geometriai gépnagyítási tényező 2,5-ik hatványával növekszik, csak szigorú geometriai hasonlóság esetén érvényes, mint ahogyan azt korábban már említettük [85].

Az aprítási folyamat során előállított finom őrlemény kihozatala érdekében fenn kell tartani a malmon belüli őrlemény-körfolyamatot, és az anyag szárításához forró gázt kell átáramoltatni a rendszeren. A gáz aprítás technikai okokból szükséges átáramló mennyiségét a teszt során, a szárítástechnikai okokból szükséges átáramló gázmennyiséget pedig számítási eljárással határozzák meg. A két eljárásból adódó értékek közül a nagyobbikat viszik át az üzemi őrlőberendezésre.

Az üzemi őrlőberendezés kopóalkatrészeinek élettartamát az őrlési teszt során mért koptatási tényező alapján, az alábbiak szerint számítjuk ki:

$$\mathbf{L}_{\mathrm{h}} = (\mathbf{T}_{\mathrm{B}} \cdot \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{B}} \cdot \boldsymbol{\gamma}_{\mathrm{B}}) / (\boldsymbol{m}_{\mathrm{FB}} \cdot \mathbf{t}_{\mathrm{T}})$$
(9)

A (9) egyenlet mutatja, hogy a görgős malmok kopóalkatrészeinek élettartamát a rendelkezésre álló T_B kopóalkatrész-tömeg, a η_B kopóalkatrész-kihasználási tényező, és a kopóalkatrész szerkezeti anyaga befolyásolhatja. A kopóalkatrész-kihasználási tényezőt a kopóalkatrészek szimmetrikus kialakításával optimalizálhatják, ugyanakkor a kopóalkatrészek tömegét a fajlagos őrlőerő és az őrlőpálya-sebesség variálásával széles határok között igazíthatják a mindenkori követelményekhez. Az alacsony fajlagos őrlőerő és

az alacsony őrlőpálya-sebesség nagyobb geometriai méretekhez, és ezzel – kényszerű módon – nagyobb kopási mértékekhez vezet. Az őrlőerő és a malommechanika nem befolyásolható az ilyen intézkedésekkel, mint ahogyan ezt a (3) egyenlet is mutatja.

az	centrifugális gyorsulás
b _W	görgő szélessége
d _W	görgő átmérője
$D; D_{SB}; D_{ST}$	őrlőpálya közepes átmérője; üzemi malom; tesztmalom
f	relatív készőrlemény-hányad
f _{MT}	őrleménytől- és őrleményfinomságtól függő tényező
F _{WB} ; F	üzemi malom őrlőerő őrlőgörgőnként; általában
L _h	élettartam
m	időegységenként átgörgetett őrleménytömeg
$m_{\rm F}; m_{\rm FB}; m_{\rm FT}$	finomőrlemény-tömegáram; üzemi malom; tesztmalom
m _{MT}	tömegáram tesztmalom
M _d	forgatónyomaték
n	őrlőtálca fordulatszáma
P _B	üzemi malom hajtóteljesítménye
S	őrleményágy vastagsága
T _B	kopóalkatrész tömege
t _T	fajlagos koptatási tényező
v _{SB} ; v	üzemi malom őrlőpálya-sebessége; általában
W _{mMT}	tesztmalom fajlagos munkaigénye
$\gamma_{\rm B}$	szerkezeti anyag tényezője
ZB	őrlőgörgők száma
λ	hosszarány
٤	ömlesztett anyag fajsúlya
ω	szögsebesség

Az egyenletekben alkalmazott jelölések:

4.3. Üzem – paraméterek, megfontolások az üzemi mérésekhez

A gyárban beépített őrlés-osztályzás technológiai egység energia felhasználási területének vizsgálata, üzemi kísérletek eredményei.

A gyárban üzembe helyezett technológia felügyeleti rendszere számítógép alapú. A technológia minden egységeinek, a jellemző, a gyártást meghatározó paraméterek szélső értékei a számítógépes programban meghatározottak, a technológia működése az alsó és felső paraméter érték közötti sávban üzemel. Ha a paraméterek valamelyikénél ez az érték a tényleges üzemeltetés közben eléri ezt a programban rögzített határértéket, a számítógép leállítja a teljes gyártósort.

Az őrlés-osztályzás technológiaegység legfontosabb paramétereit az 1. melléklet – Adatszolgáltatás új üzem – tartalmazza.

Ezen táblázatból a következő paraméterek, amelyek határértéke a vezérlési programban is szerepelhet.

malomfeladás t/h

Információs adat a malomra feladott anyag mennyiségéről, a technológiára csak közvetett hatása van.

A feladott anyag minőségére, nedvességtartalmára, ... további adatot a rendszer nem szolgáltat.

Malom motor adatai

Terhelés%TeljesítményP [kWh]Fordulatszámn [min⁻¹]

- A malom és osztályzó téren áthúzott légáram adatai

Levegő mennyiség $V_1 [m^3/h]$ Belépő levegő hőmérséklet $T_{be} [^{o}C]$ Kilépő levegő hőmérséklet $T_{ki} [^{o}C]$ Friss levegő szelep állása[%]

Ennél a paraméter együttesnél néhány megjegyzést érdemes tenni.

Az áthúzó légáram mennyiségének ill. ezzel összefüggésben a sebességének az őrlésre és osztályzásra, a szemszerkezetre, azaz a végtermék finomságára meghatározó szerepe van.

A friss levegő mennyiségének a szabályozása nem őrléstechnikai oldalról fontos, hanem gazdaságossági kérdés. A késztermék nedvességtartalmának határérték alatti biztosítása érdekében szükség szerint a malomba forró levegő kerül, ezért nem lényegtelen, hogy a "zárt" légáramkörbe mennyi friss levegő kerül, mert a normál hőmérsékletről fel kell fűteni a már üzemi hőmérsékletű légáramhoz a friss levegőt, ami többlet energiát igényel.

- A malom nyomás viszonyára utaló adatok

Nyomás különbség a malomban.

Nagyon fontos paraméter, közvetett módon a malom üzemstabilitására utal. A normál nyomás különbségtől felfelé eltérő érték a feladási anyagban felszaporodott finom részre utal. A légáram ezt a finom részt – 0-4 mm – még mielőtt az őrlőtányért elérné, magával ragadja és az osztályzó és őrlőtányér közötti térben keringeti, miáltal a malomban a nyomáskülönbség megnő. Következményként kevesebb anyag kerül az őrlőtányérra, csökken az őrlési ágy vastagsága, növekszik a görgő és tányér közelségéből a vibrációs sebesség és folyamat leáll.

Hidraulika nyomás

Az őrlőhenger és őrlőtányér közötti összenyomó erők, annak nagyságát jelzi. Ez az erő az őrlést segítő erők fontos eleme.

– Őrlőágy vastagság (mm)

A feladási anyag mennyiség és minőség függvényében változik az őrlőágy vastagság.

Malom rezgés (mm/sec)

A malom méreteiből, működéséből adódó rezgési sebesség. Maximalizálása a berendezéseket és így a biztos üzemeltetést védi.

A technológia üzembe helyezésekor a malomtérbe be- és kilépő levegő hőmérséklete szabályozásra került. A kilépő levegő hőmérséklete előírás szerint 80 – 150 °C között van, ami nagyon magas hőmérsékleti tartomány, és ezért irányította a figyelmem az őrlés-osztályzás energia viszonyainak a vizsgálatára. A kérdéskor először kifejezetten gazdaságossági, eredményt javító lehetőségként fogalmazódott meg bennem, és az üzemben végzett első kísérletek is a költségek csökkentésére irányultak.

A villamosenergia-gázfogyasztás alakulása a kilépő levegő hőmérsékletével összefüggésben, fenntartható őrlés-osztályzás mellett.

A malomtérbe belépő levegő hőmérsékletét a késztermék kívánt nedvesség tartalmának a biztosítása miatt kell felhevíteni. Korábbi tapasztalataim, tanulmányaim alapján egyértelművé vált, hogy az őrlés során keletkező alakváltozási-, surlódási hő normál esetben a késztermék nedvességtartalmának a jelentős csökkenését idézheti elő, és sokszor elégséges lehet a nedvességtartalom határértéken belül tartásához.

Korábban láttuk, hogy az őrlés energia mérlegét több kutató vizsgálta, és adott, az elvégzett kísérletek alapján általa helyesnek vélt adatokat. Önkényesen, de a technológiánkhoz leginkább hasonlítható energiamérleget BOWN [38] írja le egy lassú őrlési folyamatra.

Ha a szakirodalomban elérhető energiamérlegeket összevetjük, megállapítható, hogy fővonalaiban a

Felületképzésre	5 - 10 %
Súrlódásra	40 - 60 %

közötti energia fordítódik, az össz őrlési energiából, azaz a rendszerbe bevezetett összes energia mennyiségből jelentős hőenergia képződik.

Sekula és munkatársai [40] módszert dolgoztak ki a diszperz rendszer és az őrlési folyamat energia eloszlásának kvantitatív meghatározására.

Az általuk kifejlesztett berendezéssel mérték a rendszerbe bevezetett W_z és az őrlés során felszabadult Q energiát. A mérési eredményekből az eszköz W_i és az aprított anyag W_m belső energiájának a növekedése meghatározható.

$$\Delta W_i + \Delta W_m = W_2 - Q$$

A gyakorlati tapasztalat és az elmélet egymást alátámasztva kényszerítették ki, hogy a technológia alapbeállításától eltérve, keressük meg azt a hőmérsékleti küszöbértéket, ahol a rendszer megbízhatóan üzemel és a végtermék minősége, nedvességtartalma maradéktalanul megfelel az elvárásoknak.

4.4. A mérés

4.4.1. Üzem: mérés, őrlés és szárítás energia felvételének megállapítása

A vezérlő program 80 °C -os kilépő levegő hőmérséklet minimum korlátját feloldva kezdtünk kísérletet folytatni.

A kísérlet során a következő paraméterekkel dolgoztunk:

- A malom feladást fixen tartottuk
- A kilépő hőmérséklet normál üzem módban, léghevítés nélkül indult, majd 10 ⁰C-onként emeltük a kilépő levegő hőmérsékletét
- Egy-egy módosítás után két órás, egyenletes üzemmódot hagytunk, hogy a rendszer teljes mértékben igazodjon a megváltozott körülményekhez.
- A kísérlet során a feladott anyag összetétele, hőmérséklete, nedvesség tartalma közel állandó volt.

 m^3

Mért paraméterei az őrlési folyamatnak:

- Malom villamos energia fogyasztása kWh
- Léghevítő gázfogyasztása

A mérés eredményeit az 7. táblázat tartalmazza:

∆t Időszak h	Q Malom termelés t/h	Kilépő hőmérséklet C [°]	Malom vill.fogy. kWh	W f Fajlagos vill.fogy. kWh/t	V g Gázfogy. m³/h	Fajlagos gázfogy. m³/t	Gáz- vill.energ. egyenérték kWh 1m ³ =9,3 kWh	Összes energia vill. + gáz kWh	Fajlagos Összes energia vill. + gáz kWh/t
2	50	37,8	687	13,74	0	0,00	0,00	687,00	13,74
2	50	50,0	644	12,88	56	1,12	520,80	1 164,80	23,30
2	50	60,0	642	12,83	84	1,68	781,20	1 422,70	28,45
2	50	70,0	630	12,60	112	2,23	1 036,95	1 666,95	33,34
2	50	80,0	614	12,27	139	2,78	1 292,70	1 906,20	38,12
2	50	90,0	528	10,56	153	3,05	1 418,25	1 946,25	38,92

7. táblázat A kísérlet eredményei

A táblázat adatai alapján készült az 1-3. diagram, amely a kilépő hőmérséklet – fajlagos villamos energia; a kilépő hőmérséklet – fajlagos gázból számított energia; valamint a kilépő hőmérséklet és az össz energia villamos egyenértékre számított függvény kapcsolatokat.



1. diagram Fajlagos villamosenergia fogyasztás

Y = -0.04966220204 * X + 15.68983366

Relatív szórás: 7,75 %



2. diagram Fajlagos gázfogyasztás



1. Megfigyelhető, hogy a tetemes (növekvő) gázfelhasználás nem járt együtt fajlagos őrlési (villamos energia) érdemi csökkenésével (1. diagram). Az 50-80 °C-os kilépő levegő hőmérséklet tartományban W_f fajlaos energia alig változik (alig csökken), ami nem fedezi a gázfelhasználásból származó energiafelhasználás tetemes növekedését.

2. A 3. diagramból szembetűnően látszik, hogy a fajlagos őrlési (villamos energia) stagnálása, ill. csökkenése ellenére az össz. fajlagos őrlési energia a gázfelhasználás miatt drasztikusan növekszik. A gázenergia használata őrlés szempontjából felesleges, indokolatlan.

4.4.2. Szárítás és a gázüzem kapcsolata

1. A kilépő gázhőmérséklet növekedésével csökken az őrlés fajlagos villamos energia igénye.

Igen érdekes kérdéskörhöz értünk. A későbbiekben, a felnémeti mészkő őrölhetőségének, ill. őrlési energiaigényének laboratóriumi mérése során az üzemi kísérletekkel ellentétes eredmények születtek. Azaz laboratóriumi körülmények között az őrlési tér hőmérsékletének emelésével a fajlagos őrlési munka hiba határon belül állandó maradt.

Milyen tényezők csökkenthetik az őrlési energiát esetünkben?

- meddő tartalom
- nedvesség tartalom

A laboratóriumi mérés során teljesen tiszta, darabos mészkő lett előkészítve az őrlési energia meghatározását célzó kísérletekhez. Ebben az esetben tehát sem meddő, sem a feladott anyag nedvesség tartalmáról nem beszélhetünk.

Üzemi körülmények esetében a feladott anyag nedvesség tartalma 0,5 – 1,5 % között mozog, de a hőmérséklet emelkedésével folyamatosan csökken, a legalacsonyabb fajlagos energia igénynél gyakorlatilag a nedvességtartalom megszűnik, a meddő tartalom pedig folyamatosan 1 % alatt marad, tehát az sem lehet oka a magasabb hőmérsékleten való fajlagos energia csökkenésnek.

 A kilépő hőmérséklet és a fajlagos gáz ill. energiaigény görbéi (1-3. diagram) egyértelművé teszik, hogy a technológiai rendszerünk energia felhasználása túlzó, pazarló és indokolatlan.

Az őrlés-osztályzás technológiai egységének az energia felhasználását optimalizálni kell.

3. A kísérletek bebizonyították, hogy a villamos energia bevitel mellett az őrlési folyamat elősegítéséhez földgáz energia ill. az ebből előállított hőenergia bevitele nem minden esetben szükséges.

Ahhoz azonban, hogy a rendszer zavartalanul működjön meg kellett határozni, hogy a kilépő levegő hőmérsékletének mennyi az alsó határértéke, amivel még a folyamat hibátlanul működik. / a zavartalan működéshez szükséges őrlőtéri hőmérséklet alsó korlátja/

4.4.3. Kilépő levegő hőmérséklet és a késztermék nedvességtartalmának kapcsolata

Az előzőekben elvégzett mérések alapján megállapítottam, hogy az őrlési energia nagyságát az őrlési tér hőmérséklete nem befolyásolja vagy nem csökkenti. Az őrlési tér ill. a kilépő levegő hőmérséklete és a késztermék nedvességtartalma között összefüggés van. Mérésekkel kerestem a két érték közötti összefüggést, amely diagram formájában alkalmas arra, hogy megadott késztermék nedvességtartalomhoz hozzárendeljük a kilépő levegő hőmérséklet minimumát.



4. diagram A feladás és a késztermék nedvességtartalma
 Késztermék: Y = -0.03218527316 * X + 1.507529691
 Feladás: Y = -0.1812351544 * X + 8.786864608

4.4.4. Kilépő levegő hőmérséklete és a porszűrés kapcsolata

A korábbiakból kitűnik, hogy hőenergiára a késztermék nedvesség tartalmának határérték alatt tartására van szükség, ill. az osztályozóból távozó por – levegő elegyének a hatékony szétválasztásához. A szétválasztást tömlős, vagy zsákos porszűrőben végezzük, amiben a zsák anyaga poliészter tűfilc, és a szűrőzsák "falára", a tűfilc köré tapad fel a leválasztandó poranyag.

A zsákok takarítását, ami 4-8 sec-os ciklusidővel, levegővel történik, a poranyag nedvesség tartalma befolyásolja.

A zsákok eltömődöttségét ill. a porszűrő működőképességét a porszűrőben uralkodó nyomáskülönbség jól jellemzi. Legtöbb esetben a gyártó megadja a nyomáskülönbség adott berendezésre vonatkozó maximális értékét, ami esetünkben 20 mbar.

Ezért tartottam szükségesnek újabb üzemi kísérleteket végezni.

A kísérlet célja az volt, hogy a kilépő levegő hőmérséklete és a porszűrő nyomáskülönbsége függvényt felvegyük.

Ennek szükségességét az támasztotta alá, hogy így meghatározhatónak tűnik az a hőmérsékleti küszöbérték, amelynél a porszűrő nyomáskülönbsége és így működése kielégítő, és miután az őrlés gyakorlatilag független a hőmérséklettől, ez a küszöbérték meghatározás a teljes rendszer zavartalan működését teszi lehetővé.

Dátum / idő	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Feladás t/h	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
Porszűrő nyomás 1													
mbar	8,8	11,9	11,1	11,3	11,5	11,1	11,2	10,7	10,5	9,7	9,5	8,8	8,1
Közbenső nyomás													
mbar	36,9	39,2	38,8	40,2	40,0	41,4	40,7	34,1	36,2	37,4	36,7	39,1	37,0
Hőmérséklet °C	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90

Dátum / idő	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Feladás t/h	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62
Porszűrő nyomás 2										
mbar	11,1	11,0	11,2	11,2	11,4	10,5	8,2	10,2	10,5	10,7
Közbenső nyomás										
mbar	40,5	39,6	38,5	37,8	35,1	41,7	49	35	41,1	47
Hőmérséklet °C	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80

8. táblázat Üzemi kísérlet eredményei



4. diagram Porszűrő nyomás

Porszűrő nyomás 1:Y = -5.26048951 + 0.814536297 * X - 0.01226373626 *
pow(X,2) + 5.431235431E-005 * pow(X,3)
Relatív szórás: 11, 28 %Porszűrő nyomás 2:Y = -18.65547786 + 1.773286713 * X - 0.03358041958
* pow(X,2) + 0.0002004662005 * pow(X,3)
Relatív szórás: 8, 29 %

Az 5. diagramból megállapítható, hogy a kísérleti mérésekkel vizsgált porszűrő esetében a porszűrő nyomáskülönbségének 35 °C-on van a maximum pontja. Amikor az őrlési térből kilépő levegő hőmérséklete eléri, vagy meghaladja a maximum pontot, a porszűrő üzembiztos működése garantált.

Felvetődik, hogy a kilépő hőmérséklet mitől függ?

Elsősorban a malomra feladott anyag tömegétől, hőmérsékletétől, nedvességtartalmától. A kérdés az, hogy azt a kilépő hőmérsékletet, ami a rendszer, a porszűrő zavartalan működéséhez szükséges, el tudom-e érni a bevitt villamos energia súrlódási hőjével, vagy külső, esetünkben földgáz energia is szükséges hozzá, és ha igen milyen mennyiségű.

Az üzemi kísérletnek pontosan ezért volt ebben a fázisban az a célja, hogy a működőképességhez szükséges, minimális kilépő hőmérsékletet határozunk meg, és a gázégő szabályozást, ehhez a hőfokhoz tudjuk igazítani, így elkerülhető a feladási anyag nedvesség tartalmának, és hőmérsékletének az ismerete, esetleges folyamatos mérése.

Az 5. diagramból megállapítható, hogy a porszűrő nyomáskülönbségének a hőmérséklet változással összefüggésben fellépő trendje jól kivehető. A gyakorlatban arra a következtetésre jutottunk, hogy 35 – 40 fok közötti kilépő levegő hőmérsékletnél a technológia folyamatos, és időben is üzembiztos működtetése fenntartható.

4.4.5. A küszöbhőmérséklet meghatározása

Az előző két pontban mérésekkel meghatároztam az adott késztermék nedvességtartalomhoz tartozó kilépő levegő hőmérséklet minimumot és a porszűrő zavartalan működéséhez szükséges kilépő levegő hőmérséklet minimumot. A technológia üzemeltetése során a kilépő levegő hőmérsékletét mindig a magasabb hőmérsékleti minimumra kell szabályozni.

4.5. Eredmények az új üzemállapotban

E néhány kísérlet után elért eredményeinket az alábbi diagramok szemléltetik:

Ezen két kísérlet sorozat elvégzése után, ami bebizonyította, hogy a rendszert ha a kilépő levegő hőmérsékletére szabályozzuk, az eredendően beállított energia paraméterek, elsősorban a földgáz felhasználás jelentősen csökkenthető.

4.5.1. Fajlagos gáz felhasználás alakulása 2005 – 2008

Hónan		Gázfelhas	ználás m³/t	
ΠΟΠαρ	2005	2006	2007	2008
Január	3,66	2,76	0,05	0,71
Február	3,81	2,31	0,14	0,39
Március	3,48	1,40	0,04	0,10
Április	2,63	0,53	0,01	0,03
Május	2,78	0,37	0,00	0,00
Június	2,41	0,17	0,00	0,00
Július	2,32	0,00	0,00	0,00
Augusztus	3,08	0,10	0,00	0,00
Szeptember	2,47	0,02	0,00	0,00
Október	2,36	0,11	0,01	0,00
November	2,58	0,14	0,10	0,17
December	2,58	0,01	0,45	0,24
Átlag	2,80	0,56	0,07	0,12

9. táblázat Fajlagos gázfelhasználás

A 9. táblázat és az 6. diagramban látható, hogy 2006 márciusáig a kilépő levegő hőmérséklete a 80-120 °C-os tartományra volt szabályozva. 2006 márciusától csökkentettük a kilépő levegő hőmérsékletét (2006 március, április: 60 °C, május: 50 °C, júniustól napjainkig: 40 °C).



6. diagram Fajlagos gázfelhasználás

4.5.2. Gázfelhasználás 2005 - 2008

Hónan	(Gázfelhaszná	lás m³		
попар	2005	2006	2007	2008	
Január	125 182	84 824	1 897	27 872	
Február	120 332	72 246	4 664	15 036	
Március	111 384	53 031	1 174	3 481	
Április	80 478	23 639	231	1 332	
Május	89 361	18 179	0	0	
Június	92 383	8 263	0	0	
Július	91 169	0	0	0	
Augusztus	114 268	3 941	0	0	
Szeptember	106 624	965	0	0	
Október	117 915	5 066	533	0	
November	114 326	6 648	4 662	8 469	
December	87 057	383	15 703	9 648	
Összes	1 250 479	277 185	28 864	65 838	

^{10.} táblázat Gázfelhasználás



7. diagram Gázfelhasználás

Év	Gáz fogyasztás m ³	Fajlagos gáz fogyasztás m ³ /t
2001	797 609	2,36
2002	1 092 443	2,81
2003	1 236 272	2,89
2004	1 284 134	3,00
2005	1 250 479	2,80
2006	277 185	0,56
2007	28 864	0,07
2008	65 838	0,12

11. táblázat Gázfogyasztás



8. diagram Gázfogyasztás

Az elért eredmények egyértelműen igazolják, hogy minden őrlési-osztályzási rendszert, az üzembe helyezés után optimalizálni kell. Nem elégséges a hasonló technológiák beállításánál szerzett tapasztalat, nem elégséges a szakirodalomban található, a folyamat leírását elvégző kutatások eredményeként meghatározott függvény kapcsolatok alkalmazása, ezek ismerete, és az így meghatározott paraméterek.

Az üzembe helyezésnél komoly segítséget jelentenek, és ezen adatokon elindulva tudjuk az adott berendezés, adott viszonyok közötti optimalizálását elvégezni. A technológiai folyamatok optimalizálása egyben költségoptimalizálást is jelent, amely összességében az olcsóbb termék előállítást, a magasabb profit elérését teszi lehetővé.

A fent említett kísérletek a külső körülmények kedvező alakulása esetén lehetővé teszik a teljes földgáz nélküli üzemmódot is.

Megállapítható, hogy a mérések egyértelműen igazolják a 4.4.3, 4.4.4 fejezetben tett megállapításokat, hogy az üzemi kilépő levegő hőmérsékletének csökkentésével – a kívánt nedvességtartalom eléréséhez szükséges kilépő levegő hőmérséklete és a porszűrő zavartalan működéséhez szükséges kilépő levegő hőmérséklete feltételek teljesülése esetén – a gázfogyasztás csökkenthető.

4.6. Kapacitás kihasználás és a fajlagos energia felhasználás

Ez az üzemmód adott arra lehetőséget, hogy újabb kísérletekkel, a mészkő őrlés fajlagos energia igényét meghatározzuk.

A kísérlet lefolytatásánál a bányából beérkező, előtört és meddőleválasztáson átmenő mészkövet használtunk, úgy hogy a kísérlet során a malomra feladott anyag minősége közel azonos volt. Ennek biztosítását elősegítettük azzal is, hogy az utántörés előtt a 0-55 mm közötti anyaghalmazt kirostáltuk, ezzel a meddőt a szennyező anyagokat eltávolítottuk a feladási anyagból, mert azok az alsó frakcióba kerülnek. A szitálás után az után törőre már az 55-250 mm közötti szemszerkezetű mészkő került feladásra és így tudtuk elérni a feladás közel azonos minőségét.

A földgáz felhasználás után kezdtük el vizsgálatainkat a villamos energia fogyasztás optimalizálása területén.

Első kísérletként meghatároz gáznélküli üzemmód esetén a szokásos malomfeladás fixen tartása mellett az őrlés fajlagos villamos energia igényét (12. táblázat, 9. diagram) 12 órás időintervallumban vizsgáltuk.

t/h	kW/t	kW
58	12,02	697
58	10,33	599
58	12,16	705
58	11,62	674
58	12,55	728
58	12,26	711
58	12,47	723
58	12,50	725
58	10,12	587
58	11,12	645
58	12,33	715

12. táblázat Fajlagos villamos energia



9. diagram Fajlagos villamos energia(kísérlet során meddőmentes anyag)

A görbe lefutását figyelve, mutatkozik egy viszonylag egyenletes szakasz, ahol a 11,62 - 12,50 kWh/t szélsőértékek között, viszonylag szűk sávban szórnak az eredmények. A lehetőségeink körültekintő kihasználásával végzett kísérlet alapján megállapítható, hogy a felnémeti mészkő esetében, üzemi körülmények között a fajlagos őrlési energia 12,3KWh/t. A következő kísérleteknél tovább lépve, vizsgáltam a malomteljesítmény, és az ehhez tartozó fajlagos energia igényt.

A kísérletnél kettős célt akartunk elérni. Egyrészt, hogy a szokásos 50-55 t/h malom teljesítménynél milyen a fajlagos őrlési villamos energia igény, másrészt meg akartuk tudni, hogy a malom teljesítmény növelésével hogyan változik a fajlagos villamos energia igény, ill. kíváncsiak voltunk arra, hogy meghatározható-e a malom teljesítmény és a fajlagos őrlési villamos energia függvény kapcsolat optimuma.

Feladás	[t/ó]	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
Fajlagos vill. en. felh.	[kW/t]	13,1	13,0	12,4	12,8	12,5	12,3	12,2	12,2	13,0	11,7	11,7

Feladás	[t/ó]	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Fajlagos vill. en. felh.	[kW/t]	11,7	11,4	12,1	11,5	11,1	10,4	10,5	10,6	10,2	9,7

13. táblázat Fajlagos villamos energia



10. diagram Fajlagos villamos energia



Relatív szórás: 8, 28 %

Év	A technológia összes villamos energia fogyasztása kWh	A technológia fajlagos villamos energia fogyasztása kWh/t
2001	9 916 060	29,32
2002	11 481 331	29,51
2003	12 158 324	29,41
2004	12 442 203	29,02
2005	12 849 952	28,80
2006	14 003 346	28,11
2007	13 353 159	26,00
2008	13 725 914	25,73

14. táblázat Fajlagos villamos energia



12. diagram Fajlagos villamos energia

A 13 sz. táblázat és a 10. diagram együttes értékelése jól mutatja, hogy az őrlés-osztályzás során a malomterhelés növekedésével az energia szükséglet ellentétesen viselkedik, és esetünkben a fajlagos villamos energia 65 t/h malom feladásnál érte el a minimumot és onnan gyakorlatilag változatlan maradt a malom terhelhetőség határáig.

Nem tekinthető normális üzemmódnak, ha egy berendezés a teljesítőképessége határának közelébe üzemel, de a görbe a biztonságos üzemvitel szakaszát jól kijelöli 56 – 62 t/h feladás közé, amikor még a fajlagos villamos energia nagysága is megfelelő ill. jelentősen ~ 15 %-al csökkent a kezdési állapothoz viszonyítva.

5. Laboratóriumi mérések, kísérletek

A felnémeti mészkő őrölhetési vizsgálatait Árvai Gábor szigorló előkészítés-technikai mérnökhallgató és Mucsi Gábor tanszéki mérnök hathatós segítségével és közreműködésével a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében végeztük el. A mérések programját közösen alakítottuk ki a mérést Árvai Gábor folytatta le.

Az őrölhetőségi mérőszámok érvényességi köre igen korlátozott, csak arra a közegre és arra a malomtípusra érvényes, melyben meghatározták, ezért az őrölhetőségi vizsgálatokat feltétlenül ugyanabban a közegben kell elvégezni, melyben az üzemi őrlés folyik. Az igénybevétel módját és sebességét az alkalmazott őrlő közegen kívül a használt malomtípusok is befolyásolják, Ezek a megfontolások vezettek a hagyományos Hardgrove- és Bond malmokkal elvégzett mérési eljárások kialakítására.

5.1. Univerzális Hardgrove-malom

A Miskolci Egyetem fenti Intézetében a rendelkezésre álló Hardgrove-malom univerzális malomra történő átalakítással alkalmassá vált száraz és nedves közegben, magasabb hőmérsékleten végzett őrölhetőségi vizsgálatok megbízható elvégzésére. Ugyanakkor megfelelő számítási módszer és hitelesítés alapján a Hardgrove-eljárás alkalmazhatósága kiterjed a finomőrlés tartományára is, továbbá közvetlen nyomatékméréssel az energia felhasználás mérése is biztosítva van.

Az Univerzális Hardgrove malom esetében az őrlés során kifejtett M nyomaték folyamatosan történő mérésének köszönhetően állandó n = 20 min⁻¹ fordulatszám mellett a nyomaték τ őrlési időre vonatkozó integrálásával és a képződött termék *m* tömegével való elosztásával meghatározható a fajlagos őrlési munka értéke. A kísérlet során megmérjük az üres és az anyaggal töltött őrlőtérre ható nyomatékot és ezek különbsége határozza meg a vizsgált mintaanyag őrlésre fordított nyomatékát [89].

A fajlagos őrlési munka integrál alakban τ őrlési időre vonatkozóan:

$$W_{\rm B} = \frac{\int_{0}^{\tau} 2\pi n [M(t) - M_0] dt}{m}$$

ahol

M (t) – a nyomaték; M₀ – az üresjárási nyomaték; n – a fordulatszám; m – az anyagtömeg.

Az így kapott W_B fajlagos őrlési munkát összefüggésbe behelyettesítve kapjuk meg a $W_{iB,\hat{u}}$ üzemi Bond-munkaindexet.

A Bond malommal végzett őrlési kísérleteknél, pedig az elektromos teljesítményt ill. munkát meghatározva, a termék tömegének és a 80 %-os szemcseméretek mérése után kapott értékeket felhasználva jutunk az üzemi Bond-munkaindexhez [89].



11. ábra: Nyomatékmérő rendszer [89]

5.2. A mérési eredmények kiértékelése.

5.2.1. Mintaanyagok

Az Omya Hungária Kft. felnémeti bányájában a korábbi ismeretek és vizsgálatok alapján három típusú mészkövet különböztetünk meg:

- Kovás mészkő
- Fehér mikrokristályos mészkő
- Sötétszürke mikrokristályos mészkő

Az őrölhetőségi vizsgálatok elvégzése során, fontosnak tartottam, hogy mind három típusú mészkővel végezzünk méréseket mindaddig, míg a három típus mérési eredményei markánsan eltérnek egymástól.

5.2.2. Szemcseméret elemzés

A minták szemcseméret eloszlásai során szitaelemzéssel határoztuk meg, aminek eredménye a következő:



13. diagram: Előtört, robbantott mészkőminták eloszlás-függvényei [80]

A 13. diagramon jól látható, hogy az egyes minták eloszlásfüggvényei jól követik egymást. A szemcsék mérettartománya 0 – 120 mm között van.

A nevezetes szemcseméretek:

- kovás mészkőnél $X_{50k} = 75 \text{ mm } X_{80k} = 96 \text{ mm}$
- sötétszürke $X_{50n} = 84 \text{ mm } X_{80n} = 94 \text{ mm}$
- fehér mikrokristályos $X_{50f} = 90 \text{ mm } X_{80f} = 105 \text{ mm}$

5.2.3. Nedvességtartalom

A nedvességtartalmat párhuzamosan mindhárom mészkőtípusra külön-külön határoztuk meg. Az elemzési mintákból, melynek maximális szemcsemérete 0,2 mm 1 g-ot az előzetesen kiszárított, exszikátorban tartott és 0,0002 pontossággal fedővel együtt lemért üveg mérőedényekbe egyenletesen eloszlattam, majd lemértem az össztömegét. A mintákat az előzetesen felfűtött szárítószekrénybe helyeztem, a szárítási hőmérséklet $105 - 110 \text{ C}^{\circ}$.

A szárítás során az edények mellé helyezett fedők a szárítás időtartamának letelte után visszakerültek az üvegedényekre és exszikátorban hűltek 20 percet.

A teljes lehűlés után mért m₂ szárítási tömeg és m bemért minta tömege különbsége adja az m₁ szárítás utáni veszteség tömegértékét.

A fenti, mért adatokból a nedvességtartalmat a következő képlettel határozzuk meg:

$$n_c = (m_1/m) \cdot 100 [\%]$$

Mintánként a párhuzamos mérések eredményét átlagolva az egyes mintákra az alábbi eredmények születtek:

n %	n %	n %
Kovás	fehér mikro	sötét szürke

A mérés eredményeiből látszik, hogy a mészkőminták nedvességtartalma közel azonos és elenyésző, és megfelelnek az üzemben mért adatoknak.

5.2.4. Sűrűség elemzés

A sűrűség (valódi, abszolút) az egységnyi térfogatú, kéregmentes, a teret egyenletesen kitöltő anyag tömege.

Laboratóriumban a szilárd anyagok sűrűsége a legegyszerűbben a piknométeres sűrűségméréssel állapítható meg.

Piknométeres sűrűségmérés esetén az anyag térfogatát is tömegméréssel állapítjuk meg, ezért ez a legpontosabb sűrűségmérési módszer. A mérés során a következő tömegméréseket kell adott hőmérsékleten elvégezni:

 m_1 – az üres piknométer tömege az összes tartozékával m_2 – a piknométer + a szilárd anyag tömege m_3 – a piknométer + anyag + a folyadék közeg tömege m_4 – a folyadék közeggel töltött piknométer tömege

A méréseket üveg piknométerrel végeztük és a sűrűség a következő képlet alapján számítható

$$\mathbf{p}_{\rm s} = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_3 + m_2 - m_1} \ \mathbf{p}_{\rm k}$$

A mérést mintánként kétszer hajtottuk végre és a kapott sűrűségének a számtani középértékét vettük. Ha két érték között nagy az eltérés a mérést meg kell ismételni.

Az eredmények

ρ kg/dm ³	ρ kg/dm ³	ρ kg/dm ³
kovás	fehér mikro	sötétszürke
2,691	2,712	2,710

A táblázat alapján megállapítható, hogy az egyes minták sűrűsége közel azonos és jól megközelítik a szakirodalomban szereplő 2,7 kg/dm³-t.

5.3. Hardgrove vizsgálat

A malom feladás szemcseméret eloszlását a 14. diagram mutatja, és ezek után a 0,59<X<1,19 mm-es mintából mértük ki a vizsgálathoz szükséges 50 g anyag.



14. diagram: Hardgrove-malom feladás eloszlásfüggvénye [80]

A diagramról leolvasható a feladás 80 %-os szemcsemérete, ami 995 µm-re adódik. Az őrlés befejezését követően a 74 µm alatti frakciót kiszitáltuk és megmértük a tömeget, ami a számítások elvégzéséhez szükséges, és a veszteség ellenőrzése végett a felsőtermék tömegét is visszamértük. A veszteség, előírás szerint, nem haladhatja meg a 0,75 g-ot, ellenkező esetben a mérést újra el kell végezni. Nedves őrlés esetében a szuszpenziót nedves szitálás követte majd az alsó és felső terméket infralámpa segítségével kiszárítottuk és elvégeztük a tömegméréseket.

Az őrlés befejeztével rögzítettük a számítógépes propgram által számított, nyomaték méréseken alapuló értéket (Ws)-ban. Ennek az értéknek a segítségével számítható az őrlés munkaigénye.

$$W_B = \frac{W_{m\acute{e}rt}}{3,6m_{74}}$$

ahol:

W_{mért} - a szoftver által számított, nyomatékmérésen alapuló munka [W_s]
M74 - az őrlemény 74 mikron alatti részének a tömege [g]

Az így kapott W_B őrlési energia igényből már számítható a Bond munkaindex.

$$W_{iB} = W_B \left[\frac{10}{\sqrt{x^{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X^{80}}} \right]$$

képletből.

A Hardgrove számot az alábbi képlettel határozhatjuk meg:

$$O_{\rm H} = 13 + 6,93 \cdot m_{74}$$

ahol m74 az X<74 µm-es anyag tömege [g].

A Hardgrove-számból számított Bond-munkaindex a következő képen számítható

$$W_{iB}^{H} = \frac{468}{O_{H}^{0,82}}$$

5.3.1. A mészkő minták vizsgálata légszáraz állapotban a hőmérséklet függvényében

A méréseket légszáraz állapotú mészkővel 20, 40, 60, 80 és 100 °C-on végeztük el úgy, hogy minden mérési hőmérsékleten két mérést végeztünk, ahol az eltérés nem haladhatta meg a 3 %-ot (a tömegmérés pontossága 0,01 g) és ezek számtani átlagát vettük.

A következő táblázatban a nyomaték mérésből számított Bond munkaindexek (15. táblázat) és a Hardgrove-számból számított Bond munka indexel (16. táblázat) láthatók.

	Nyomatékmérésből számított Bond-munkaindex				
	[kWh/t]				
	20 °C-on	40 °C-on	60 °C-on	80 °C-on	100 °C-on
Szürke mészkő	12,85	13,09	13,19	13,13	12,42
Fehér mészkő	11,91	13,15	12,93	12,67	12,47
Kovás mészkő	10,71	11,84	12,71	11,72	11,31

15. táblázat: Nyomatékmérésből számított Bond-munkaindexek [80]



15. diagram: Nyomatékmérésből számított Bond-munkaindexek [80]

	Hardgrove-számból számított Bond-munkaindex				
	[kWh/t]				
	20 °C-on	40 °C-on	60 °C-on	80 °C-on	100 °C-on
Szürke mészkő	14,10	13,97	13,66	13,75	13,85
Fehér mészkő	13,92	13,98	14,00	13,85	13,89
Kovás mészkő	13,32	13,02	13,64	13,22	12,76

16. táblázat: Hardgrove-számból számított Bond-munkaindexek [80]



16. diagram: Hardgrove-számból számított Bond-munkaindex értékek alakulása [80]

Megállapítható:

1. Az első (légszáraz mintaanyaggal végzett Hardgrove – vizsgált eredményei alapján készült a 15. diagramon a nyomatékmérésből, a 16. diagram a Hardgrove számból számított Bond-munkaindexből számított energia igény értékei olvashatók le a különböző mérési hőmérsékleteknél, azaz 20, 40, 60, 80 és 100 °C-on. A számszerű adatok azt jelzik, hogy az azonos hőmérsékleti adatoknál összehasonlított őrléshez szükséges energia igény értékek a szürke és fehér mikrokristályos mészkő esetében minden hőmérsékleti pontban nagyon jól megközelítik egymást. A kovás mészkő esetében láthatók eltérések a fent említett két mészkő típushoz képest. Az eltérések legmarkánsabban 20 °C-nál jelentkeznek, ahol 17 %-ot tesz ki, valamint 80 °C-nál haladja meg a 10 %-ot.

2. A kovás és fehér mészkő, valamint a szürke mészkő is 60 °C-nál a nyomatékmérésből számított Bond – munkaindex esetében maximum ponttal rendelkeznek, míg a Hardgrove – számból számított Bond – munkaindex esetében (16. táblázat és 16. diagram) a kovás és fehér mészkőnek van maximum pontja. A sötétszürke és fehér mikrokristályos mészkő, hasonlóan a nyomatékmérés alapján számított értékekhez, itt is szinte minden mérési pontban megegyeznek, minimális az eltérés. A kovás mészkő őrlésének energiaigénye ebben az esetben kevesebb, mint a sötétszürke és fehér mikrokristályos mészkőé, de itt az eltérés nagysága már sehol sem haladja meg a 10 %-ot.
3. Az is megállapítható, hogy a nyomatékmérés finomabban érzékelteti az őrölhetőség változását, mint a Hardgrove index vagy a belőle számított Bond-munkaindex.

A 15 – 16. diagramokon látható, hogy a megállapított munkaszükséglet értékeket a hőmérséklet kis mértékben befolyásolja a vizsgált nedvességtartalom mellett. A maximális értékek 67 %-ban 60 °C-nál jelentkeznek, ezért a gyakorlatban végzett őrlési tevékenységnél hőenergia bevitel csak a késztermék nedvesség tartalmának a megfelelő értéken való tartásához szükséges.

A két diagramból szemléletesen látható, hogy a három, különböző típusú mészkő őrölhetőség szempontjából közel megegyezik. A célszerűség érdekében a három különböző típusú mészkő mintából képeztünk egy átlagmintát, és a további vizsgálatokat már ezzel az összesített mintával végeztük el.

5.3.2. Különböző felületi nedvességtartalommal rendelkező mészkő őrölhetőségi vizsgálata

A gyárban alkalmazott feladásra ill. a feladott anyagra jellemző, hogy csak külső nedvességtartalommal rendelkezik, ami felületi nedvességet jelent.

A következő kísérlet sorozat alkalmával a feladásra kerülő minta esetében csak felületi nedvesítést alkalmaztunk, ami 10 % - os nedvességtartalmat jelent.

Üzemi körülmények között a feladott anyag nedvességtartalma az időjárástól (mennyire csapadékos) és a mészkő között található un. meddő anyag mennyiségétől függ, mert ez utóbbi anyag, talaj, agyag, palás anyag, amelyek a nedvesség fő hordozói. A nedvességtartalom általában 1 - 2%-os, de extrém körülmények között jelentősen magasabb is lehet. Főleg a téli csapadékos időben nagyobb mértékű, ami jelentősen befolyásolhatja az őrlés energia igényét.

	20 °C-on	40 °C-on	60 °C-on	80 °C-on	100 °C-on
Nyomaték mérésből számított					
Bond-munkaindex [kWh/t]	7,72	7,97	8,32	8,07	8,23
Hardgrove-számból számított					
Bond-munkaindex [kWh/t]	11,65	11,2	10,4	10,24	10,8

A mérés eredményeit a 17. táblázat tartalmazza:

17. táblázat:Bond -munkaindexek a hőmérséklet függvényében 10%-os nedvességtartalom mellett

Az elvégzett őrölhetőségi vizsgálatok mellett 20 oC-on a mérés hibahatárának megállapítására 10 mérésből álló sorozatot végeztünk. A mérések eredményeinek relatív szórása a következők szerint alakulnak: - Hardgrove: 3,45 %

ılakulnak:	- Hardgrove:	3,45 %
	- Számított Bond:	2,85 %
	- Nyomatékmérésből Bond:	2,77 %

Megállapítottam, hogy a különböző hőmérsékleten végzett Bond-munkaindex meghatározás eredményei a mérési hibahatáron belül vannak.



17. diagram: Bond-munkaindexek a hőmérséklet függvényében 10%-os nedvességtartalom mellett [80]

A diagramból jól látható, hogy az őrlés során a nyomaték méréséből számított Bond munkaindexek 8 kWh/t körül alakulnak, a legnagyobb eltérés ettől az értéktől 4%, tehát a mérés eredménye állandónak tekinthető. A nyomaték a surlódási őrlési munkát méri, a finom mészkő a vízzel együtt akár kenőanyag is lehet, mely a nyomatékmérésből számított Bond-munkaindex értékekre hatással lehet.

A Hardgrove - számból számított Bond – munkaindex alkalmazása eltérő tendenciát mutat. A hőmérséklet növekedésével 60 °C -ig csökken, 60 °C fölött állandónak tekinthető, majd ismét emelkedik 100 °C – nál, amikor a mészkő felületéről a nedvesség elpárolog és nem érezteti hatását az őrlési energia szükségletre.

A növekedés oka a nedves őrlés kedvező hatásában keresendő. Az előző kísérletek bizonyították, hogy csökken a fajlagos energia szükséglet a nedves közegben végzett őrlésnél.

Esetünkben ez azt jelenti, hogy 100 °C – on a mészkő felületéről a nedvesség gyorsan elpárolog, és nem érezteti a kedvező hatását a fajlagos energia nagyságára.

Ugyancsak észrevehető problémaként jelentkezett, hogy őrlés közben a nedvesített anyag a Hardgrove – malom falára tapadt, így az őrlőgolyók csak az alsó részeken tudják hatásukat kifejteni, ellentétben a házas őrlésnél a szemcsék visszahullanak a golyók alá.

5.3.3. A laboratóriumi és üzemi mérési eredmények összehasonlítása

A szárazon és felületi nedvesítéssel végzet Hardgrove – vizsgálat eredményei a következőképpen alakultak:



18. diagram: Nyomatékmérésből számolt Bond-munkaindexek száraz ill. felületi nedvesített mészkő esetében [80]



19. diagram: Hardgrove-számból számított Bond-munkaindexek száraz és felületi nedvesített mészkő esetében

Nedves: $Y = -0.7528280393 * \ln(X) + 13.83410286$
Relatív szórás: 4, 77 %Száraz:Y = -0.00095 * X + 13.983
Relatív szórás: 0, 4 %

A két diagramból megállapítható, hogy mind a nyomatékmérésből és mind a Hardgrove számból számított Bond – munkaindexek a légszáraz állapotban feladott mészkő esetében a hőmérséklet emelkedés ellenére konstans értéket adnak. Ez alapján levonható az a következtetés, miszerint a száraz állapotban őrölt mészkő őrölhetőségére laboratóriumi körülmények között a hőmérséklet nincs hatással.

Felületi nedvesség tartalommal bíró mészkő vizsgálata során a két módon számolt (nyomaték mérésből, Hardgrove számból) Bond munkaindex alakulása eltérő tendenciát mutat. A nyomaték mérésből számolt eredmények a hőmérséklet emelkedésével nem változnak, a Hardgrove-számból számolt Bond-munkaindexel viszont a hőmérséklet emelkedése hatására csökkennek, egészen 80 °C-ig, ahol elérik a minimum pontot és ettől a ponttól emelkedni kezdenek.

A két módon meghatározott értékek eltérő tendenciája azzal magyarázható, hogy a nyomatékméréses módszernél a képződött termék mennyiségén kívül, a W_s -ben mért energiaigényt is figyelembe vesszük, ellentétben a második esettel, (Hardgrove-számból számolt érték), ahol csak az aprózódott finomtermék mennyisége a meghatározó.

A mérés során megfigyelhető volt, hogy valójában növekszik a finomtermékek mennyisége a hőmérséklet emelkedésének hatására 80 $^{\circ}$ C-ig, de ezzel egyetemben nő a W_s-ben leolvasott munkaszükségletek értéke is.

5.3.4. Meddővel kevert mészkő vizsgálata

Územi körülmények között a malomra feladott anyag néhány százaléknyi meddőt tartalmaz, ezért szükséges laboratóriumi körülmények között a meddő és a meddő – mészkő keverék őrölhetőségének a vizsgálata is. Természetesen a kísérletekhez szükséges anyagot a felnémeti bányából mintáztuk.

A meddő anyag mérés alapján $g_m = 2,45 \text{ kg/dm}^3$, nedvességtartalma pedig $u_m=4,42 \text{ \% volt}$.

Az első mérési sorozatban a "tiszta meddő lett a Hardgrove – vizsgálatnak alávetve, majd 5 %-os és 10 %-os meddőtartalmú mészkővel végeztük el a kísérletet.

Természetesen a kísérlet során elemzésre került a feladás és a termék szemcseösszetétele. Az őrölhetőségi vizsgálat eredményei a következők:

	Nedvességtartalom [%]	Nyomatékmérésből számított Bond- munkaindex [kWh/t]	Hardgrove-számból számított Bond- munkaindex [kWh/t]
100 % mészkő	0	9,83	13,39
5 % meddőtart.	0,22	8,31	13,16
10 % meddőtart.	0,44	7,89	12,92
100 % meddő	4,44	3,92	8,71

18. táblázat: Őrlési munkaszükséglet változó meddőtartalmak mellett [80]

A táblázatból megállapítható, hogy a meddő tartalom növekedésével az anyag őrlésének munkaigénye csökken. A vizsgált mintákban a nedvességtartalom nem változik, így a Bond-index a meddőtartalom növekedésével változik.

A nyomatékmérésből számított Bond munkaindexek esetében a mészkőben már 5 %-os meddőtartalom 15 %-os csökkenést eredményezett, ez 10 %-os meddőtartalom mellett a tiszta mészkő Bond - munkaindexhez képest 20 % a csökkenés mértéke.

Ugyanakkor a Hardgrove – számból számított Bond – munkaindexek esetén 5 % és 10 % meddőtartalomnál a csökkenés mértéke 2 % és 4 %.



20. diagram: Bond-munkaindexek változása a meddőtartalom függvényében

Hardgrove számból számított: Nyomatékmérésből számított:
$$\begin{split} Y &= -0.0468086301 * X + 13.39075982 \\ Y &= -0.05112566045 * X + 8.957375519 \end{split}$$

Megállapítások:

- Az elvégzett mérések bizonyították, hogy az őrölhetőség, a nedvességtartalom, a szárítási hőmérséklet és a meddőtartalom kapcsolatában a meddőtartalom a meghatározható.
- 2. A tiszta mészkő őrölhetőségére az üzemi nedvességtartalom kis hatással van és a bányanedves anyag őrölhetősége a hőmérséklettől gyakorlatilag független.
- 3. A nedvesség hordozó közege a meddő.
- 4. A meddőtartalom döntő hatással van az őrölhetőségre (lásd.: 24. táblázat)

5.4. Bond munkaindex meghatározás

A kísérletek a laboratóriumi golyós malommal, az előírt körülmények között, az egyensúly beálltáig végeztem, több lépcsős, körfolyamatos száraz őrléssel.

A golyós malom 350 x 350 mm méretű, u = 70/min fordulatszámmal jár és 20 kg őrlőgolyót tartalmaz. A Bond malom feladási szemcseméretének kritériuma X<3,15 mm. Ennek megfelelően pofás és hengeres törővel, kíméletesen előaprítottuk az anyagot, amelyet a mérés előtt szemcseelemeztünk

x [mm]	F(x)
<0,1	0,12
0,1 <x<0,4< td=""><td>0,25</td></x<0,4<>	0,25
0,4 <x<0,8< td=""><td>0,40</td></x<0,8<>	0,40
0,8 <x<1,0< td=""><td>0,49</td></x<1,0<>	0,49
1,0 <x<1,25< td=""><td>0,58</td></x<1,25<>	0,58
1,25 <x<1,6< td=""><td>0,65</td></x<1,6<>	0,65
1,6 <x<2,0< td=""><td>0,77</td></x<2,0<>	0,77
2,0 <x<2,5< td=""><td>0,9</td></x<2,5<>	0,9
2,5 <x<3,15< td=""><td>1</td></x<3,15<>	1

A szemcseelemzés eredménye:

19. táblázat: Bond-malom feladás szemcseeloszlása [80]

A mérés alapján meghatározott Bond munkaindex értéke:

 $W_{iB} = 8,71 \text{ kWh/t.}$

5.4.1. Az üzemi mérések alapján számított Bond – munkaindex

A gyárban, valós üzemi körülmények között végeztünk méréseket.

A mérések során vizsgáltuk a malom fontosabb paramétereit:

- Energiafogyasztás
- Kilépő levegő hőmérséklete
- Feladás
- Gázfogyasztás
- Fajlagos energiafogyasztás

A mért értékek alapján meghatároztam az üzemi Bond – munkaindexet.

A mérések alatt a kilépő hőmérséklet 40-45 °C körül szórt, ezért a mérési sorozatból a 40 °C közelébe lévő eredményeket emeltem ki és az adott hőmérsékleti értékekhez tartozó energiaigényeket átlagoltam.

Azért esett a választás a 40 °C-os értékre, mert a laborban végzett kísérletek is ezen a hőmérsékleten történtek. Így megkaptam a malom energia igényét 40 °C-on. A malom feladás és az őrlemény 80 %-os szemcsemérete adott volt $(X_{80} \cdot 21000 \ \mu\text{m}, X_{80} = 65 \ \mu\text{m})$. Az eredmények alapján az üzemi Bond munkaindexet. Ezek szerint az üzemben végrehajtott mérések szerint az üzemi Bond – munkaindex $W_{iB} = 10,021 \ kWh/t$.

A következőkben a laboratóriumban végzett kísérletet (Hardgrove, Bond) és az üzemi mérésekből kapott Bond-munkaindexek alakulását vessük össze.

Az eredmények azonos paraméterek mellett értendők:

Nedvesség tartalom	0,12 - 0,14 %
Hőmérséklet	~ 40 °C

	Hardgrove-v	izsgálat alapján	Üzemi	Bond-	
	Hardgrove-	Nyomatékmérésből	mérések	vizsgálat	
	számból számolt	számolt	alapján	alapján	
Bond-munkaindex [kWh/t]	13,66	9,83	10,02	8,71	

(Kivéve Bond vizsgálat, ami szobahőmérsékleten történik)

20. táblázat: Bond-munkaindexek alakulása(tiszta mészkő) [80]

A táblázatból kiolvasható, hogy a Hardgrove-számból számolt érték a legmagasabb, és a hagyományos Bond-vizsgálatból származó érték a legalacsonyabb. A nyomaték mérésből és üzemi mérésekből számolt Bond-munkaindex a fenti két érték között helyezkedik el.



21. diagram: Bond-munkaindexek

A 21. diagram értékelésénél figyelembe kell venni, hogy a mintaanyagok különbözőek voltak, mindenesetre a nyomatékmérés pontosabb, jobban egyezik az üzemi mérés eredményével. Az üzemi mérések egy átlagos, szokásos feladási anyag minőség mellett, és teljesen valós körülmények között lefolytatott mérések voltak.

5.5. Megállapítások, következtetés levonása a laboratóriumi mérések eredményeiből

A laboratóriumi mérések során a szakirodalomból ismert és az aprítási, őrlési energia meghatározására használt legfontosabb módszerek szerint végeztünk őrlési,- őrlési energia igényt meghatározó méréseket.

Az alap mérések, amelyek tiszta mészkőmintákra vonatkoztak, mellett megkíséreltük szimulálni az üzemi körülményeket, így vizsgáltuk a feladott anyag nedvesség tartalmának, meddő tartalmának és az őrlési tér hőmérsékletének a függvényében a fajlagos energia szükségletet.

A laboratóriumi mérések eredményei a meddő és nedvesség tartalommal összefüggésben megerősítették a szakirodalomban leírtakat, miszerint, e két paraméter növekedése a feladott anyagban, csökkenti az őrlés fajlagos energia igényét.

Az őrlési tér hőmérsékletének növelésével, tiszta mészkővel végzett kísérletek esetén a fajlagos őrlési energia igény konstans maradt, közvetlen hatás nem volt kimutatható.

6. Üzemi kísérletek az energiamodell meghatározására

6.1. Üzemi kísérletek

Az üzemi kísérletek ezen fázisában az volt az alapvető cél, hogy a technológiai rendszert a mérési eredmények alapján a minimális energiaráfordítással tudjuk üzemeltetni. A korábbiakban feltűnt, hogy a szárítást, a késztermék nedvességének határérték alatt tartását biztosító földgáz fajlagos felhasználása nagy értékű.

A rendszert szállító cég alapbeállításának következményeként a fajlagos földgáz felhasználás 3 m³/t volt.

Az alapbeállítás semmilyen folyamatvezérlési automatizmussal nem rendelkezett, nem vette figyelembe az őrlési folyamatot meghatározó paraméterek elsősorban az anyagminőség folyamatos változását.

A szárításhoz szükséges energiát befolyásolja a feladott anyag tömege, hőmérséklete, nedvességtartalma és az áthúzó légáram hőmérséklet változása.

A főbb összefüggések megállapítása az alábbiak szerint történt.

1. Az első kísérlet sorozatnál arra törekedtem, hogy meghatározzam az őrlési tér hőmérsékletének az alsó korlátját. Ez az a hőmérséklet, amelyet a kilépő levegő hőmérsékletén keresztül folyamatosan ellenőrizni lehet és ennél a hőmérsékletnél a késztermék nedvesség tartalma a kívánt határérték alatt marad, ugyanakkor a malomból távozó por-levegő elegyeinek szétválasztásához beépített zsákos porzsák leválasztása hatékony marad, nem következik be az eltömődöttség miatti nyomáskülönbség növekedés következtében a termelés ellehetetlenülése.

2. Az alsó hőmérsékleti küszöbértékek meghatározását követően, bevezetésre került az eredmények alapján a technológia ezen küszöbértéken történő üzemeltetése.

Az üzemeltetés során pozitív tapasztalatokat szereztünk.

Azokban az esetekben, amikor a feladott anyag hőmérsékletének, nedvességtartalmának a változása miatt a kilépő levegő hőmérséklet csökkenő tendenciát mutatva elérte a küszöbértéket, a gázégők üzembe helyezésével akadályoztunk meg a hőmérséklet további csökkenését.

A kísérletek során kapott eredmények üzemi alkalmazásával értük el, hogy a korábban már említett $3m^3/t$ fajlagos földgáz felhasználásával $0,1 - 0,2 m^3/t - ra$ csökkent, ami évi ~ 550 kt –s termelésnél nagyon komoly költségmegtakarítást eredményezett.

Nem olyan jelentős mértékben, mint a földgáz felhasználást, de szintén az üzemben elvégzett kísérletek alapján sikerült a fajlagos villamos energia értékét is csökkenteni.

Mérésekkel határoztuk meg azt a számunkra optimális malom feladást, amelynél a fajlagos villamos energia érték a legalacsonyabb volt.

Ezzel a feladási mennyiséggel, amely a termelésben bevezetésre került, és a korábbi 48-52 t/h feladást 54-56 t/h-ra növekedett tudtuk elérni, hogy az induláskor a ~ 29,5 kWh/t fajlagos érték ~25,7 kWh/t-ra csökkent, ami ~14,8 % megtakarítást eredményezett.

Kísérleteink, méréseink rámutattak a termék- mennyiség, minőség és a költségoptimalizálás fontossága, nélkülözhetetlenségére.

További kísérleteket folytattunk le a folyamatszabályozási modell kidolgozására.

Az üzemi kísérletek alapján megállapítható volt, hogy az őrlési tér hőmérsékleteinek növelésével az őrléshez szükséges villamos energia mintegy 30%-al csökkent (21. táblázat).

∆t Időszak h	Q Malom termelés t/h	Kilépő hőmérséklet C [°]	Malom vill.fogy. kWh	W _f Fajlagos vill.fogy. kWh/t	V g Gázfogy. m³/h	Fajlagos gázfogy. m³/t	Gáz- vill.energ. egyenérték kWh 1m ³ =9,3 kWh	Összes energia vill. + gáz kWh	Fajlagos Összes energia vill. + gáz kWh/t
2	50	37,8	687	13,74	0	0,00	0,00	687,00	13,74
2	50	50,0	644	12,88	56	1,12	520,80	1 164,80	23,30
2	50	60,0	642	12,83	84	1,68	781,20	1 422,70	28,45
2	50	70,0	630	12,60	112	2,23	1 036,95	1 666,95	33,34
2	50	80,0	614	12,27	139	2,78	1 292,70	1 906,20	38,12
2	50	90,0	528	10,56	153	3,05	1 418,25	1 946,25	38,92

^{21.} táblázat Fajlagos villamos energia fogyasztás

Ugyan ezt az energia igény csökkenést laboratóriumi körülmények között nem sikerült elérni.

A laboratóriumi mérések során a feladási anyagot megkíséreltük a valós állapotokhoz közelíteni, és a kísérletek eredményei bizonyították, hogy a meddő (és nedvesség) tartalom növekedése csökkenti az őrléshez szükséges fajlagos energiát, de tiszta mészkő esetén az őrlési energia igény az őrlőtér hőmérséklet változására nem változott.

6.2. Robbantás hatása az őrölhetőségre

A robbantás során a lerobbantott kőzet tényleges aprításán túl, a robbantási energia a kőzet szemcsékben, hibahelyeket un. "mikro repedéseket" hoz létre.

A korábbi gyakorlat szerint ~90 °C-os őrlőtéri hőmérsékletbe, a feladási anyag cellás adagolón keresztül, a környezeti hőmérsékletnek megfelelő állapotból jutott be az őrlési térbe.

Ez a változás a gyakorlatban egyik pillanatról a másikra, évszaktól függően 60 – 80 °C-os változást jelentett. Ennek a drasztikus hőmérséklet változásnak a hatására a robbantási energia okozta mikro repedések, hibahelyek mentén megindult az anyag tönkremenetele, a repedések tágulása, ami az őrléshez szükséges energia nagyságát csökkentette.

A 27. táblázatban feltüntetett mérési eredményeket alaposan szemügyre véve feltűnő, hogy a malomtér hőmérsékletének 90 °C-on tartásához 3,05 m³/t földgáz elégetése volt szükséges, ami, lényegesen nagyobb plusz energia bevitelt igényel, mint a villamos energiánál elérhető 3,18 kwh/t megtakarítás.

Miért nem jelentkezik a robbantás mikro repedezettséget okozó hatása a laboratóriumi méréseknél?

Feltételezésem szerint a laboratóriumi mérések feladási anyaga, amely a Hardgrove malomnál 59 – 119 μ m, a Bond malomnál 0 – 300 μ m, túl finom szemcsézetű, ezért a robbantás okozta mikro repedezettség nem, vagy nem számottevő hatással van az őrlés során a villamos energia igényre, még magas hőmérséklet esetén sem. A malomtér felfűtése a laboratóriumi körülmények között egyenletes volt, ezért az úgynevezett "hősokk" hatásról sem beszélhetünk, bár laboratóriumi körülmények között is 10 %- on belüli ingadozás volt kimutatható.

Az üzemi és laboratóriumi mérések eredményei ellentmondanak egymásnak. Územi körülmények között a hőmérséklet emelkedésével csökkent a villamos energia fogyasztás.

A robbantással kapcsolatos, az őrlési energia és hőmérséklet összefüggésének tisztázására kísérleteket végeztünk, ahol a bányatelken belül, kibúvásból vett mészkőminták kerültek összehasonlításra a robbantott készletből vett minták mikro repedezettségével. E kísérletek célja az volt, hogy kvantitatív értékekkel kimutassuk a robbantás hatására keletkezett mikro

repedések számának relatív emelkedését a szálban álló mészkőből vett mintához viszonyítva.. Ehhez alapvetően az akusztikus hullámterjedési sebesség meghatározását alkalmaztuk. Kiegészítésképp próbáltuk optikai módszerrel is megfogni a mikro repedéseket, de ez sem optikai mikroszkópos, sem elektronmikroszkópos vizsgálattal nem sikerült. A leginkább repedésekkel terhelt mintán a diszlokáció sűrűség jellemzése érdekében röntgendiffrakciós méréseket végeztünk, amelynek eredményét az 5. melléklet tartalmazza. A vizsgálatokból megállapítható, hogy a robbantás a kristályrácson belül a hibahelyek számát megnöveli, amely hatással van az őrlés energia igényére.

6.3. Az őrlési energia mérleg modell kialakítása

Annak érdekében, hogy a szárításra bevitt külső energia szükségességét, nagyságát meg tudjuk határozni, és ezen keresztül a folyamat vezérlését el tudjuk végezni, szükségünk van a malomba bevitt villamos energia malmon belüli megoszlásának az ismeretére.

Ha meg tudjuk mérésekkel határozni, hogy a malmon belül hol, mennyi és milyen jellegű energia felhasználás történik, kialakítható az energia mérleg és ebből az energia mérlegből meghatározható az az energia hányad, amely a súrlódásból, a törési felületek energia szintjének a növeléséből a malomtérében a szárítás oldaláról nézve mint hasznos energia rendelkezésünkre áll, és ezzel, a szárításra rendelkezésre álló energiával számolva, tudatosan, a tényleges szükségletnek megfelelően határozhatjuk meg a szárításhoz szükséges, földgázból biztosított másik energia fajta nagyságának, mennyiségének a szükségességét.

Elsőként vegyük számba az őrléssel kapcsolatos és az energiamérleget befolyásoló tényezőket.

- motor kialakítása
- feladott anyag minősége
- légáram jellemzői
- üresjárati energiaigény
- E tényezők két csoportba sorolhatók.

6.3.1. A malom szerkezeti kialakításából adódó tényezők

a) malom hajtó motor

A malmot egy 1000 kW-os malom motor hajtja, frekvencia váltós szabályozással.

Gyártója a Siemens és a gyártója által megadott hatásfoka 97 %. Ez azt jelenti, hogy fogyasztásmérőn leolvasott érték 97 %-a, amely az őrlési folyamat elvégzésére fordítható.

b) malom meghajtó

Az őrlőtányér és a malom motor közé beépített "fogaskerék" szekrény, amely a súrlódási veszteség miatt veszteséget, ill. energia felhasználást jelent számunkra.

- c) A hajtómű palástján keresztül a környezet irányában hőátadás történik, amelynek nagyságát meg kell határoznunk, mert az energia mérlegen belül az itt fellépő veszteségnek is szerepe van.
- d) Hasonlóan a malom paláston keresztül is történik hőátadás a környezet felé, aminek meghatározására fontos az energia mérleg helyes felállításához.

6.3.2. A malomra feladott anyag őrlést befolyásoló jellemzői

A technológiából adódóan a görgős malom feladási szemnagysága 0- 60 mm közötti mészkő, amely a robbantott halmazból egy meddő leválasztás, és két törési lépcsőben éri el ezt a szemszerkezetet.

Laboratóriumban vizsgáltam a mészkő őrölhetőségét, a meddő és nedvesség tartalom őrlési munkára gyakorolt hatását. Ezek a vizsgálatok jó támpontot adnak arra, hogy üzemi körülmények között az őrlés-osztályzás-szárítás, mint technológiai folyamat az elérhető legalacsonyabb energia felhasználási szintre kerüljön, de a tényleges üzemi körülmények mindig eltérnek a laboratóriumi körülményektől.

A laboratóriumban kényszerből, a feladat megoldása érdekében végzett egyszerűsítéseket az ipari méretű gyártás során nem lehet biztosítani, de valójában mégis ott dől el, hogy a technológia energia igénye pazarlóvá válik, vagy az átgondoltan végzett optimalizálással a minimális szinten marad.

Minden esetre a főbb tényezők:a malomra feladott mészkőtöret meddőtartama, a meddő milyensége, ezen keresztül a nedvesség tartalma, hőmérséklete szinte mindenhol az

üzemben folyamatosan változik. Ez a változás egy-egy robbantáson belül viszonylag szűk határok közt mozog, de talán a legfontosabb szerepe van a technológia energia igényére.

Vizsgáljuk meg a nedvesség tartalom és a hőmérséklet szerepét az üzemi malomra feladott anyagnál.

- a) A malomra feladott mészkő
 - <u>Nedvesség tartalom</u>

A feladási anyag 0 – 60 mm szemszerkezetű mészkő, amelynek max 3 %-ig lehet szennyezőanyag tartalma.

A késztermék nedvesség tartalmának határérték alatti biztosítása érdekében fontos a meddő tartalomról beszélni.

A mészkő nem nedvszívó, nedvességet csak a felületén visz magával az őrlési térbe, viszont a mészkő között található szennyező anyagok, mint esetünkben az erdei talaj, homok, pala, agyag ... stb. képesek az őrlőtérbe vizet bevinni, aminek elpárologtatásához, kiszárításához energia szükséges.

- <u>hőmérséklet</u>

A malom feladási anyag hőmérséklete megegyezik a gyárban uralkodó környezeti hőmérséklettel. A gyár épülete nem fűtött, de szigetelt, és így jól követi a külső környezeti hőmérséklet ingadozását.

A malomtérbe bekerülő anyagot a környezeti hőmérsékletről fel kell melegíteni a malmot elhagyó késztermék hőmérsékletére, aminek szintén komoly energia igénye van.

b) A malomból kilépő anyag, a késztermék jellemzői

Az őrlőtérben végbemenő folyamatok eredményeként, az áthúzó légáram magával viszi az osztályzóról kikerülő őrleményt.

Ennek az őrleménynek finomságban, nedvesség tartalomban ki kell elégíteni a vevő által megadott, a termékre vonatkozó minőségi előírásokat.

Ezért az energia modell kialakításánál fontos a malomból kilépő anyag hőmérséklete és nedvességtartalma, mert a változás nagysága határozza meg a szükséges energia mennyiséget.

6.3.3. Az őrlés-osztályzás áthúzó légárama

Az őrlőtérben belépő levegő hőmérséklete és páratartalma ill. a kilépő levegő ezen paraméterei szintén fontosak az energia modell kialakításában.

Bár meg kell jegyezni, hogy ennél a két paraméternél a levegő hőmérséklet változása az érdekes, mert a folyamat szempontjából ennek van hatása az energia mérlegre.

A feladott anyagban az őrlési térben bevitt nedvességből vízgőz-levegő keverék lesz.

"A gyakorlatban legtöbbször előforduló gázkeverék a levegő-vízgőz. Ezt tekinthetjük a kétkomponensű rendszerek legegyszerűbb példájának, bár a száraz levegő maga is több gáz keveréke. A víz és levegő keverékét abban a hőmérséklet és nyomástartományban vizsgáljuk, ahol a levegő és a vízgőz ideális gáznak, keverékük pedig ideális gázkeveréknek tekinthető. Ezzel egyértelműen azt tételezzük fel, hogy a levegő és vízgőz a Dalton-törvény szerint keveredik, az egyes alkotók entalpiája csak a hőmérséklet függvénye és az alkotók keveredésekor hőhatás nem lép fel. (vagyis a keveredési hő zérus)" [82]

A fentiek alapján az őrlési térbe kerülő a feladott anyagból származó vízgőz levegővel történő keveredéséhez energiára nincs szükség.

A vízgőz-levegő keverék őrlőtérből való elszállítását az áthúzó levegő mozgatását biztosító ventilátor, szárítását a malomtól-malomig tartó úton keletkező súrlódási hő biztosítja.

6.3.4. Az őrlőtányér egyenletes forgómozgását biztosító üresjárati energia igény meghatározása

A görgős malom szerkezeti felépítéséből adódóan a meghajtó az őrlő tányért forgatja állandó szögsebességgel, amire az őrlendő anyag kerül és az őrlés az őrlőtányér és a keretre rögzített 3 db őrlő görgő között megy végbe, úgy, hogy a görgőket a saját súlyúkból eredő nehézségi, vagy súlyerő mellett hidraulikusan is feszítjük az őrlőtányérra.

A gyakorlati tapasztalatok alapján az ehhez szükséges munka megegyezik a hajtóműben számolt veszteségekkel, többlet energiát nem igényel.

6.4. Az energia mérleg, mérlegmodell

A modell felállításának a célja, hogy a malomba bevitt villamos energia felhasználási helyeit és az egyes felhasználási helyeken az elfogyasztott villamos energia nagyságát meghatározzuk.

Ha ezeket a számításokat a modell alapján elvégezzük, valójában két megállításra juthatunk:

- A bevitt össz villamos energia ismeretében, megállapítható, hogy a ténylegesen őrlésre fordított energia milyen nagyságú, ha a számítható energiák és az összes energia különbségét meghatározzuk.
- 2. Az egyes energia felhasználási helyeken elfogyasztott energia nagyságból kiválasztható azon energia felhasználási területek, amelyeknél a bevitt villamos energia a töréssel járó deformáció és felmelegedés, valamint súrlódási hő formájában számunkra hasznos szárító munkát végez.



12. ábra Elvi mérési modell [79]

Az elvi mérési modell felállítása után meg kell határozni az egyes paraméterek mérési helyét, a mérési metodikáját, a mérési eredmények rögzítését.

6.4.1. A malom hajtómű vesztesége

A hajtómű olajhűtésű. A hűtőolaj mint hűtőközeg szállítja el a hajtóműben súrlódási hőként megjelenő energia veszteséget.

A hajtóműből távozó, magasabb hőmérsékletű olaj hűtése léghűtőben történik.

A rendszer kialakításakor a belépő és kilépő olaj hőmérsékletének a mérése kialakításra került. Jelen helyzetben az elmenő ágon, a léghűtő és a hajtómű között kellett egy új mérési helyet kialakítani, hogy a hajtóműből tényleges kilépő olaj hőmérsékletét a léghűtő előtt tudjuk mérni.

6.4.2. A hajtómű palást hőátadási vesztesége a környezet felé

A hajtómű palástján, három szinten, szintenként 3 db mérési pont került kijelölésre. A mérési pontok szintenként a függőlegestől 40°-al el lett tolva, és egy-egy spirál mentén helyezkedtek el a függőleges sík helyett a mérési pontok.

6.4.3. A feladott anyag hőmérséklete és nedvességtartalma

A malomra a 0-60 mm-es mészkövet a feladó silótól gumiszalaggal szállítjuk a malomhoz, ahol a kő adagolása egy cellás adagolón keresztül történik. A malomra feladott anyag mennyiségét a technológia eredendően méri és folyamatosan rögzíti. A feladási anyag mintázása a gumiszalagon lehetséges.

Az anyagminták hőmérsékletének a mérését közvetlenül a mintavételt követően a helyszínen végeztük el.

Az anyag nedvességtartalmának a mérése szintén a helyszínen történt szárító kemencében. A nedvesség tartalom meghatározásánál a minták 105 °C-on tömeg állandóságig szárítottuk, és nedvességtartalmat a nedves anyag %-ában a következő kifejezéssel számítottuk

$$n_{\rm f}\% = \frac{m_n - m_{sz}}{m_n} \, 100 \, \%$$

 $ahol \qquad n_f-nedvess{\'eg}\ tartalom$

m_n-nedves anyag tömege

 m_{sz} – száraz anyag tömege

A késztermék hőmérsékletének és nedvesség tartalmának a mérése.

A technológia kialakításakor a késztermék mennyiségének a mérése megoldásra került. Folyamatosan mérjük a malomból távozó késztermék mennyiségét, és az értékük számítógépen rögzítésre kerülnek.

A mennyiség mellett a hőmérséklet és páratartalom a késztermékből vett minták hőmérsékletének mérésével és nedvességtartalmának a mérésével történt, hasonlóan mint a feladott anyagnál.

6.4.4. Az áthúzó légáram hőmérlege

Az áthúzó légáram belépési és kilépési oldalán a légvezetékben alakítottunk ki mérési pontot.

A hőmérséklet és páratartalom mérés Comet típusú T3113T+RH távadós mérőműszerrel történik. Az érzékelőkről az adatok egy adatgyűjtőn kerültek tárolásra, ahonnét a mérések befejezését követően számítógépre mentettük a mérés eredményeit.

6.4.5. A malom palást hőleadása

A malom paláston, a hajtóműhöz hasonlóan 3 szintben, szintenként 3 hőmérőt helyeztünk el, amelyekről a palást hőmérsékletét minden mintavételezéskor leolvastuk, rögzítettük.

6.5. Az üzemi mérések végrehajtása

A kísérleti méréseket hétvégére terveztük. Péntek estétől hétfőn reggelig a korábban már ismertetett helyeken és módon végeztünk mérést, ill. mintavételezést.

A mérési sorozat alatt közel azonos szinten tartottuk a feladott anyag mennyiségét, minőségét és az áthúzó légáram mennyiséget. Feladott anyag mennyiségét (feladás: kb. 56 t/h volt).

A kísérlet alatt 30 percenként került sor mintavételezésre és ugyancsak 30 percenként rögzítettük a mérési helyeken mért értékeket.

A kísérlet befejezését követően a mérési eredményeket számítógépen, táblázatos formában dolgoztuk fel (2. melléklet).

A négy mérési sorozatot, amely összességében több mint 360 időmetszékben rögzített minden paramétert, időben is távol egymástól végeztük el, hogy tisztázzuk a körülmények változása esetén is hasonló eredményre jutok-e, illetve ha nem, milyen okok vezetnek az eltérő eredményekhez.

A négy kísérlet elvégzését követően került sor az adatok feldolgozására. Az adatok halmaza több, mint tízezer volt, annak feldolgozását, kiértékelését megkönnyítette a számítógép használata.

6.6. A mérési eredmények kiértékelése

6.6.1. Hajtómű veszteség

A hajtómű veszteség két elemből tevődik össze:

- a. Olajhűtési rendszeren keresztül mérhető veszteség
- b. A hajtómű palástján keresztül a környezetnek átadott hő veszteség.

a.) olajhűtés vesztesége

 $Q = C m \Delta t$

- A kísérlet során a hajtóműbe be- és kilépő olaj hőmérséklete 30 percenként leolvasásra, rögzítésre került, amely alapján a ∆t egyszerűen meghatározható.
- A hajtóműben Aral Degol BG 320-as típusú olajat használunk, melynek a sűrűsége 0,901 g/ml.

A hűtőolaj mozgatását, cserélődését fogaskerék szivattyú biztosítja, amelynek szállítási kapacitása 16.200 l/h = 14.482,8 kg/h.

 Az olaj fajhőjét a gyártótól – Deutsche Bp Aktiengesellscheft Mönchengladbach – közvetlenül kértem meg.

$$C_{20}^{o}C_{c} = 1,947 \text{ KJ/kgK}$$

$$C_{50}^{o}C_{c} = 2,06 \text{ KJ/kgK}$$

A számítások alapján a hűtőrendszeren "elveszett" villamos energia nagysága 21,74 kWh.

Ez az energia veszteség gyakorlatilag a léghűtő rendszeren keresztül távozik, a malom környezetét melegíti, számunkra ténylegesen veszteséget jelent.

Elgondolkodtató, hogy ezt az energia veszteséget, a malomból kilépő levegő hőmérsékletének növelésére is lehet használni, és ebben az esetben a szárításhoz szükséges külső energia mennyisége csökkenthető.

b.) A hajtómű paláston a környezetnek átadott hő

$$W = A k \Delta t$$

K – hő átbocsájtási tényező értéke

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\ell}{\lambda}}$$

α₁ – hőátadási tényező olaj-acél között

 α_2 – hőátadási tényező acél-levegő között

l - a hővezető acél vastagsága (palást vastagság)

 λ - hővezetési tényező, ami esetünkben az acél hővezetési tényezőjét jelenti.

Esetünkben a malomtér, zárt, belső légmozgás nincs, így a palástnál használt hőátviteli tényező a szakirodalom alapján

 $K = 10 \text{ W/m}^2 \text{K-ra vehető.}$

A Δt hőmérséklet különbség meghatározásánál a kilépő, és mért olajhőmérsékletből és a paláston elhelyezett hőmérőkről leolvasott értékeket vettem figyelembe.

A hajtómű paláston a hőmérők elhelyezését a mellékelt ábra mutatja, feltüntetve a palást nagyságának kiszámításakor.



13. ábra Malompalást

A hőmérők kereskedelmi forgalomban kapható eszközök voltak, melyeknek mérési pontosságát hitesített hőmérővel, laboratóriumban végeztük el, a mért eredmények szerinti hőmérsékleti tartományban.

2.	Etalon	22,0	22,0	22,0
4.	digitális	22,2	22,2	22,0
5.	digitális	22,3	22,4	22,3
6.	digitális	22,9	22,7	22,6
7.	digitális	22,5	22,4	22,3
8.	digitális	22,3	22,3	22,1
9.	digitális	22,8	22,6	22,6
10.	digitális	22,8	22,6	22,6
11.	digitális	22,8	22,8	22,5
12.	digitális	22,8	22,0	22,5
13.	digitális	22,1	22,5	21,8
14.	digitális	22,5	22,5	22,4
15.	digitális	22,5	22,6	22,5
16.	digitális	22,8	22,3	22,5
17.	digitális	22,4	22,6	22,3
18.	digitális	22,6	22,8	22,6
19.	digitális	22,8	22,3	22,8
20.	digitális	22,4	22,8	22,2
21.	digitális	22,9	22,8	22,7
25.	digitális	22,8	22,8	22,8

22. táblázat: Kalibrálás eredménye

A használt hőmérők mérési eredményének hibája +3,5 %-on belül esik.

Ez a pontosság a mérés céljához megfelelő, az adatok a kiértékelés során használhatók.

A mért adatok alapján a hajtómű palástján a környezet felé átadott hőenergia egyenértéke 2,42 kWh.

6.6.2. A malom szilárdanyag áramának hőtartalom változása

A malomra feladott anyag és a késztermék – a malomból távozó anyag – két fontos paramétere a hőmérséklet változás és a nedvesség tartalom változás, ami jelentős energia felhasználásával valósul meg.

A feladott anyag és a késztermék hőmérsékletét a 30²-es mintákra határoztuk meg. A méréseknél a feladott anyagnak és a készterméknek mértük a nedvességtartalmát, és ezekből a víz párolgásához szükséges energiát számoltuk.

A nedvesség tartalom meghatározásánál a mintákat 105 °C-on tömegállandóságig szárítottuk, majd a súlymérések eredménye alapján számítottuk ki az anyag nedvesség tartalmát.

a.) A feladott anyag és a késztermék hőmérséklet változásának energia igénye:

$$Q = c m \Delta t$$
 kJ/s

a képletben szereplő

m – a malomra feladott anyag mennyisége kg/s

 Δt – a feladott anyag és a késztermék hőmérséklet különbsége

c - a feladott anyag fajhője J/kg °C.

Az energia igény meghatározásához ismerni kell a feladott anyag fajhőjét. A különböző szakirodalmakból a mészkő fajhője kikereshető, de a malomra feladott anyag nem tiszta mészkő. A feladási anyag mindig tartalmaz különböző mértékben "meddő"-t, ami a feladott anyag fajhőjét a mészkőétől eltéríti.

A kérdéses fajhőt a Miskolci Egyetem Fémtani és Képlékeny-alakítástani Intézeti Tanszéke MTA-ME Anyagtudományi Kutatócsoportjának laboratóriumában [82] határozták meg, melyet a 6. melléklet tartalmaz.

A feladási anyag fajhőjének a meghatározása után, a számítások elvégzéséhez a 3 % meddő tartalmú őrölt mészkőpor fajhőjét választottam. Oka, hogy a malom feladási anyag, az előzetes meddő leválasztások eredményeként sohasem lépt át a 3 %-os küszöb értéket. Elméletben 0-3 % között mozog a meddőtartalom a malom feladási anyagban. Feladási anyag fajhője a mérések alapján c = 1.564 [J/kg^oK]

A feladott anyag és akésztermék hőmérsékletének változásának energiaigényét:

 $Q = c m \Delta t$ kJ/s

Képlett alapján az alábbi mért paraméterekkel számítottam ki

$$c = 1,564 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$$

m = 56000 kg/h
 $\Delta t = 24,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

A feladott anyagnak (száraz) belépési hőmérsékletről, kilépési hőmérsékletre történő felmelegítéséhez szükséges hőmennyiség az előbbiek alapján.

$$Q = 591,24 \text{ kWh}$$

6.6.3. A feladással a rendszerbe kerülő víz

A feladott anyag és a késztermék nedvességtartalmának különbségéből adódó víz mennyiség és az elpárologtatásához szükséges energia meghatározása a következő módon történt.

A malomra feladott anyag nem tiszta mészkő, hanem 0 - 3 % között tartalmaz szennyező anyagot, amely elsősorban a vivő anyaga a nedvességnek. A mészkő csak csekélyfelületi nedvességet visz a malomtérbe. Ahhoz, hogy a késztermékben csak a vevő által megadott nedvesség tartalom legyen, a "felesleges" nedvességet, a malomtérben el kell párologtatni és a malomtérből el kell szállítani.

A nedvesség tartalom elpárologtatásához szükséges energia egyrészt az őrlési folyamatba táplált villamos energia biztosítja, míg az elpárologtatott vizet az áthúzó légáram szállítja el.

A feladott és a késztermék nedvesség tartalmának a meghatározása a kísérletek során 30 percenként vett mintából, laboratóriumban történt, ahol a mintákat súly állandóságig szárítottuk.

A malomra feladott anyag

tömege:	56 t/h
hőmérséklete:	18,5 °C
nedvesség tartalma:	0,97 %

a feladott anyaggal bevitt víz mennyisége:

$$G_v = \frac{mx0,97}{100} = \frac{56000x0,97}{100} = 543,2 \text{ kg}$$

A késztermék

tömege:56 t/hhőmérséklete:42,8 °Cnedvesség tartalma:0,14 %

a késztermékkel távozó víz mennyisége:

$$G_v = \frac{mx0,14}{100} = \frac{56000x0,14}{100} = 78,4 \text{ kg}$$

A fenti számítások alapján a malomra feladott anyagból 464,8 kg vizet kell elpárologtatni óránként, amihez a szükséges energia:

$$Q = m c_v \Delta t + L m$$

ahol

m - a víz tömege

 c_v - a víz fajhője - 4,2 kJ/kg°C

L - a fajlagos párolgáshő

A fajlagos párolgáshő függ a folyadék hőmérsékletétől, ami víz esetében 0 °C – 100 °C között gyakorlatilag lineárisan csökken [Dr. Szalay Béla: Fizika] 2.500 kJ/kg-ról 2.260 kJ/kg-ra.

Esetünkben a víz hőmérséklete megegyezik a kilépő levegő hőmérsékletével, azaz 42,8 °C és így a fajlagos párolgáshő 2.397,3 kJ/kg.

A fenti adatokkal és számítási móddal a víz elpárologtatásához szükséges hőenergia Q_v = 388,82 kWh

6.6.4. Az áthúzó levegő hőmérséklet és páratartalom változása, energia igénye

Az áthúzó légáram belépési és kilépési hőmérsékletét nézve azt látjuk, hogy a levegő hőmérséklete a malomtérben csökken, azaz hőt ad le.

A belépő levegő hőmérséklete $t_B = 56,6$ °C, a kilépő levegő hőmérséklete $t_K = 47,8$ °C. A kilépő levegő újra a malomtérig való útján míg újra visszaér a malomtérig 8,8 °C-ot melegszik és természetesen a malomtérből magával vitt vizet is elveszíti, elpárologtatja. A malomtól a malomig a levegő szállítását egy Ventiold HR-750.1250 típusú ventilátor biztosítja, aminek meghajtó motorja 690 kW-os, és a levegő keresztül megy egy zsákos porszűrőn, aminek a felülete 2.240 m², 960 db zsák (2,33 m²/zsák)

A malom energia mérlege szempontjából számomra érdektelen, hogy milyen folyamatok játszódnak le a levegő malomtól – malomig jutásáig.

Egyetlen dolog fontos, hogy ezen az úton a levegő hőmérséklete 8,8 °C-t növekszik, és miután a mennyisége 166,79 em³/h, ezáltal jelentős, a malom villamos energia felvételétől független un. külső energiát juttat a malomtérbe.

A malomtérben ez az energia a malomra feladott anyag hőmérsékletének növelésére, és a feladott anyagban található víz hőmérsékletének növelésére, párologtatására fordítódik.

Az áthúzó légáram által leadott energia nagyságát számolva:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{m} \, \mathbf{c} \, \Delta \mathbf{t} = \mathbf{V} \, \boldsymbol{\rho} \, \mathbf{c} \, \Delta \mathbf{t}$$

ahol:	m - a levegő tömege kg-ban:	215.659 kg/h
	ρ _{lev} - a levegő sűrűsége:	1,293 kg/m ³
	c - a levegő fajhője:	1,008 kJ/kg°C
	V - a levegő térfogata:	166.790 m ³ /h

A hőmérséklet változás hatására a gázok nyomása a térfogata megváltozik. Elméletileg, majd később kísérletileg megállapították, hogy különbség van a gázok állandó nyomáson mért fajhője (c_{ρ}) és állandó térfogaton mért fajhője (c_{v}) között.

Esetünkben a mérések alapján a levegő tömeg, térfogata változó, így a számításoknál az állandó nyomáson mért fajhővel (c_p) számoltam.

A számításokat elvégezve az áthúzó légárammal a malomtérbe bevitt energia 510,88 kWh.

Az áthúzó légáram be- és kilépő <u>pártartalmának</u> mérése, a malomtérből elszállított víz mennyiségének a kiszámítása.

Mint azt már korábban írtam, a levegő és vízgőz a Dalton törvény szerint keveredik, az egyes alkotók entalpiája csak a hőmérséklet függvénye és az alkotók keveredésekor hőhatás nem lép fel, vagyis a keveredési hő zérus.

A malom energia mérlege szempontjából ez a keveredés érdektelen, nem igényel energiát. Amiért mégis foglalkozni kell a be- és kilépő levegő páratartalmával, az azért szükséges, mert a malomba, a feladási anyaggal bevitt víz nagy részének – a késztermékben maradó vízmennyiség kivételével az egész bevitt víznek – a malomból távozni kell. A víz távozását az áthúzó levegő kell, hogy biztosítsa, ezét a belépő és kilépő levegő páratartalom méréséből számítható a távozó víz mennyisége.

Az áthúzó levegő hőmérsékletének és relatív páratartalmának a mérése a be- és kilépő légáramba beépített a Comet cég által gyártott hőmérséklet és páratartalom érzékelőket és mérő adatgyűjtőt használtunk.

A műszer hitelesített, mérési hiba hatása ± 2 %-on belül van. Miután a műszer adatgyűjtővel is rendelkezik, a korábbi modell paramétereknél alkalmazott 30 perces mérési időközök helyett itt 5 perces időközöket állítottunk be, hogy még pontosabban tudjuk a páratartalom mérést, ill. a páratartalom változást nyomon követni.

6.6.5. A malompalást hő vesztesége

A malom palást felületén elhelyezett 9 db hőmérővel, a palástot három szintjén körbe elhelyezve, 30 perces leolvasással rögzítettük a palást hőmérsékletét.



14. ábra Malompalást

A palást nagy felülete miatt, méréseket végeztünk a környezeti hőmérsékletre is. A palástnál a távolság függvényében mértük az épületen belül a hőmérsékletváltozást. A mérés elvi vázlatát a 23. táblázat és a 15. ábra mutatja.

mérőpont:	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	21
1. mérérés	24,3	24,9	25	24,8	23,5	23,8	23,5	23,4	23,6	23,1	23,4	23	23,6	22,8	22,6	23,2	22,8
2. mérérés	26,1	25,9	25,8	25,4	23,8	23,3	22,4	21,7	25,1	23,2	22,4	22,4	28,9	24,7	23,3	23,1	19,7
mérérés	24,9	25,3	25,2	25	22,6	22,3	21,8	20,4	24,6	21,2	21,4	21,4	26,6	23,2	22,5	22,4	18,6
4. mérérés	21,9	22,3	21,6	21,3	16,6	16,3	15,8	14,7	18,4	15,4	15,8	16,3	23,9	19,1	18,4	17,8	13
5. mérérés	19,1	19,2	19,1	18,9	13,8	13,9	13,6	12,6	16,9	13,5	13,6	13,6	21,1	16,7	16	15,8	11,3
					22	111	1	111	1 •	11	4						

^{23.} táblázat Mérés elvi vázlata



Az eredményekből megállapítható, hogy a palásttól távolodva a hőmérséklet változás néhány tized °C, és már 1 m-es távolság után állandósul.

A hőmérséklet változásnak ez a minimális mértéke indokolt, hisz a malom zárt térben került elhelyezésre és ebben a zárt térben természetes légmozgás alig, mesterséges szellőztetés pedig egyáltalán nincs.

A mérési eredmények feldolgozása, a hő veszteség kiszámítása a hajtómű palást veszteségének analógiájára lett elvégezve.

A környezetnek átadott hő:

$$\mathbf{W} = \mathbf{K} \mathbf{A} \Delta \mathbf{t}$$

A K értéket hasonlóan K = 10 W/m^{20} C-nak vettem, mivel a hajtómű palástnál, hisz hasonló körülményekről és hasonló anyagról van szó, amire a szakirodalom, ezt az éréket ajánlja.

A Δt hőmérséklet különbség meghatározásánál a malomtérből kilépő levegő hőmérséklete és a paláston mért hőmérsékletek átlaga közötti különbséget vettem.
A palást felületét a malom geometriai paraméterei alapján számoltam ki.

A mért adatok alapján számított, a környezet felé átadott hő villamos energia egyenértéke:

$$W = KA\Delta t$$

$$K = 10 W/m^{20}C$$

 $\Delta t = 23,3 °C$
 $A = 87,08 m^{2}$

A mért adatok alapján számított, a környezet felé átadott hő villamos energia egyenértéke: 20,29 kWh.

6.6.6. Az őrlőtányér mozgási energiája

Az őrlési folyamat egy egyenletes forgómozgást végző őrlőtányér és egy 110°-os eltolással keretre szerelt 3 db görgő súlyából és hidraulikus hengerekkel az őrlőtányérra feszítéséből álló rendszerben történik.

A gyakorlati tapasztalatok és a szakirodalmi adatok is azt mutatják, hogy a hajtőművi veszteség – az olaj hűtőközegnél számított veszteségek – jól lefedi az őrlőtányér forgatásához szükséges energiát.

Az őrlési folyamat indításakor ennél nagyobb munkavégzésre van szükség. A forgótest energiáját a gyorsító forgatónyomaték munkája létesíti, és ez az energia visszaalakítható vele egyenlő nagyságú munkává. Esetünkben ez a folyamat az őrlőtányér fordulatszámának 0-ról 28-32 1/percre emelésekor játszódik le.

Ha a forgótestre ható erők forgatónyomatéka egyenlő a forgást akadályozó erők (súrlódás, hidraulikus feszítés, keret görgőkből származó nehézségi erő) forgatónyomatékával, akkor az őrlőtányér megtartja mozgási állapotát, azaz egyenletesen, állandó szögsebességgel forog.

A tényleges őrlési folyamatnál ez az állapot áll fenn, hisz a malom indítási fázisát követően, amely indítási fázis időben gyors lefutású, az őrlés már az egyenletes forgómozgás fázisában történik.

6.6.7. Az őrlési folyamat energia eloszlása

Ahhoz, hogy az energia eloszlás modellje alapján az őrlési-osztályzás- szárítás technológiai egységen belül az energia "fogyasztás" nagyságát meg tudjuk határozni, több ciklusban végeztünk az üzemben kísérleti méréseket. Időben egymástól jól elkülöníthetően, négy mérési sorozatot végeztünk el.

A kísérletek időpont kiválasztásánál figyelembe vettem, hogy legyenek közel azonos feltételek között végzett mérések, amelyek eredményéből, a nagyszámú mérések alapján általánosítani lehet a malomban történő folyamtokra, ugyanakkor a feladott anyag minőségében, paramétereiben jelentősen eltérést mutató kísérleteket is végeztem, amelynek célja szintén az volt, hogy bizonyos következtetések levonására az eltérő körülmények alkalmat biztosítsanak.

A négy kísérletsorozat, amely során az energia felhasználás a folyamaton belül, a paraméterek különbözősége miatt változott, sok érdekes kérdésre hívta fel a figyelmem.

Az egyes kísérletek energia eloszlásainak az átlagát, a mérési eredmények alapján a 24. táblázat tartalmazza.

	1. Malom motor munka	2. Szilárd anyag hő tartalma	3. Hajtómű hőveszteség Olai	4. Hajtómű hőveszteség Palást	5. Levegő hőtartalma	6. Levegő hőm.	7. Malomtér Palást	8. Őrlési + üresjárati energiaigény		9. Bond munka index
	kW	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	%	kWh/t
1. kísérlet	658,86	720,52	14,77	2,64	254,4	517,98	22,55	161,96	24,58%	10,08
2. kísérlet	679,91	611,96	17,59	2,41	360,57	508,75	20,64	175,49	25,81%	10,44
3. kísérlet	727,28	484,76	37,16	2,08	551,57	562,71	16,46	197,97	27,22%	10,43
4. kísérlet	673,77	518,21	17,42	2,56	291,46	500,66	21,42	323,36	48,00%	10,03
Össz. átl.	684,95	591,24	21,74	2,42	388,82	510,88	20,29	171,32	25,01%	10,25

24. táblázat

Mérlegegyenlet:

$$W_{be} = W_{ki}$$

$$\begin{split} W_{be} &= 1 + 6 = 684,95 + 510,88 = 1.195,83 \ kWh \\ W_{ki} &= 2 + 3 + 4 + 5 + 7 + 8 = 591,24 + 21,74 + 2,\,42 + 388,82 + 20,29 + 171,32 = 1.195,83 \ kWh \end{split}$$

A 24. táblázat számsorainak értelmezésekor feltétlenül szükséges a 25. táblázat adatait is figyelembe kell venni, hogy az egyes energia felhasználási helyeken számított energia mennyiséget, a folyamat legjellemzőbb paramétereivel együtt vizsgálva felismerjük az összefüggéseket.

			1.	2.	3.	4.	
			kísérlet	kísérlet	kísérlet	kísérlet	átlag:
Tényl. felad.		t/30 min	28	27	29	28	28
Malom motor	teljesítmény	kW	343	350	375	350	355
Fajlagos	teljesítmény	kW/to	12,42	12,87	12,86	12,67	12,71
Malom feladás	hömérséklet	C°	14,5	17,1	21,5	21,0	18,5
	nedvességtartalom	%	0,69	0,97	1,43	0,80	0,97
Elmenő levegő	hömérséklet	C°	48,7	47,7	44,2	50,6	47,8
	nedvességtartalom	%	14,9	20,6	25,2	12,0	18,2
	teljesítmény	m ³ /hx1k	165,46	166,21	0,00	161,72	123,35
Bemenő levegő	hömérséklet	C°	57,3	56,1	53,8	59,3	56,6
	nedvességtartalom	%	11,8	21,8	30,9	12,5	19,3
	teljesítmény	m ³ /hx1k	166	166	162	162	164
Malom palást	hömérséklet	C°	44,8	44,7	42,5	46,3	44,6
Hajtómű palást	hömérséklet	C°	45,6	46,2	47,3	46,1	46,3
Hajtómű kimenő olaj	hömérséklet	C°	55,4	53,6	54,3	53,0	54,1
Hajtómű bemenő olaj	hömérséklet	C°	53,2	51,1	49,0	50,4	50,9
Környezet	hömérséklet	C°	18,9	21,0	23,6	21,7	21,3
Kásztormák	hömérséklet	C°	44,8	42,9	40,7	42,7	42,8
NG321CI IIICN	nedvességtartalom	%	0,08	0,10	0,21	0,17	0,14
Olajszivattyú	teljesítmény	l/min	261	277	276	270	271

25. táblázat

Azonnal feltűnik a 24. táblázatnak az adatait vizsgálva, hogy a 3. kísérlet során a feladási anyag hőmérséklete és nedvesség tartalma a legmagasabb volt, így a szárítás energia igény szintén a legmagasabb, és ezzel együtt, miután a szárításra bevitt energia a mérés során független volt a feladott anyag nedvesség tartalmától, a késztermék nedvesség tartalma is kiemelkedik a kísérletek során mért késztermék nedvesség tartalomból.

A 3. kísérlet eredményeinek megértésénél feltétlen figyelembe kell venni, hogy a feladott anyag mennyisége eltér a másik három kísérlet feladási mennyiségétől, és ugyan ennél a kísérletnél a késztermék finomsága is jelentősen meghaladta a többi kísérlet végtermékének finomságát.

A fajlagos szabadfelület mérési eredménye az 1, 2, 4 kísérletnél 1,6 m²/g, míg a 3. kísérlet esetében 2,2 m²/g volt (4. melléklet).

A IV. fejezetben már leírtak szerint végeztem kísérletet a malom teljesítményének változása és az őrléshez szükséges fajlagos energia közötti összefüggés feltárására.

A táblázatból (13. táblázat) kiolvasható, hogy

55,0 t/h malom teljesítmény esetén a fajlagos vill. energiafogyasztás	12,2 kW/t
58,0 t/h malom teljesítmény esetén a fajlagos vill. energiafogyasztás	11,7 kW/t.

A teljesítmény növekedése a fajlagos villamos energia 9,6 %-os csökkenését eredményezte. (A fajlagos energia teljesítmény növekedésével közel lineárisan csökken.)

Ugyanakkor, ha összehasonlítjuk a négy kísérlet őrlési energiáját és a késztermék finomságát, azt látjuk, hogy

1,6 m²/g szabad felületet (1, 2, 4. kísérlet) ~ 670,85 kWh vill. energia bevitellel

 $2,2 \text{ m}^2/\text{g}$ szabad felületet (3. kísérlet) ~ 727,28 kWh vill. energia bevitellel tudtunk elérni.

A teljesítménynövekedésből adódóan (13. táblázat alapján) a 670,85 kWh-ás villamos energia bevitelnek 4,09 %-kal azaz 27,43 kWh-val csökkenni kellet volna a 2,4. kísérletnél 643,42 kWh-ra.

Ezzel szemben a 3. kísérlet esetében a várható 643,42 kWh-val szemben 727,28 kWh bevitt energiára volt szükségünk. A két érték közötti 83,86 kWh-ás energiakülönbség kizárólag a felületnövekedésre fordítódott.

Megállapíthatjuk, hogy az őrlés ezen fázisába 37,5 %-os új felületnövekedés 13 %-os plussz energia bevitel árán érhető el. Esetünkben a késztermék szabad felületének határértéke 1, 6 m2/g, így megállapítható, hogy a késztermék szemszerkezetének folyamatos elemzésének szükségessége fontos, mert az indokolatlan szemszerkezet finomítás a villamos energia felhasználás jelentős növekedését, ezen keresztül jelentős költségnövekedést eredményez, amit az árban nem lehet érvényesíteni.

A 24. táblázat eredményei alapján került felállításra az őrlési folyamat során felhasznált villamos energia mérleg.

A kísérletek során minden esetben mellőztük a szárításhoz földgázból eredő energia bevitelét, hogy egyszerűbbé váljon az energia mérleg felállítása.

6.6.8. Üzemi Bond-index meghatározás

A kísérlet során minden esetben mértük a feladási anyag x_{80} és a késztermék X_{80} jellemző szemcseméretét, így a malom mért villamos energia fogyasztásából, és a malom teljesítményéből számoltam az üzemi Bond munkaindexet.

$$W_{iB} = \frac{W}{10 \left[\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right]}$$

ahol W – az őrlési munka a P teljesítmény és a Q feldolgozó képesség hányadosa.

Az egyes kísérletek számított Bond-munkaindex értékei a következők szerint alakultak (feltüntetve a tényleges vill. energia fogyasztást)

		Bond-index	Villamos teljesítmény	Feladás	m^2/g
1.	kísérlet	10,08 kWh/t	658,86	56	1,6
2.	kísérlet	10,44 kWh/t	679,91	54	1,6
3.	kísérlet	10,43 kWh/t	727,28	58	2,2
4.	kísérlet	10,03 kWh/t	673,77	56	1,6
	A szélsőértékek el	térése: 4 %	~ 10,4 %		

A táblázatból jól láthatóan kitűnik, hogy az üzemi mérések alapján számított Bond-index értékének az ingadozása, a kísérletek során elvégzett több száz mérés és szemcseelemzés alapján kis ingadozást mutat, és a teljes adatsorokkal összevetve, az ingadozás oka a feladott anyag meddőtartalmai közötti különbségben keresendők.

A Bond-index 4 %-on belüli változásával szemben a folyamat villamos energia igényé ~ 10,4 %-os ingadozást mutat, amit a feladott anyag mennyisége, ill. a késztermék finomsága közötti különbségek indokolnak.



22. diagram Vill. energia Bond-index /kísérlet

Ha a Bond-indexet a feladott anyag és az áthúzó levegő számunkra fontos paramétereivel vetjük össze (hőmérséklet, nedvesség tartalom) megállapíthatjuk, hogy a Bond-indexet ezen paraméterek alig, míg a malom motor teljesítményt jelentősebben befolyásolják.



23. diagram Bond száraz és nedves L_G
6.6.9. Az őrlés energiamérlege

A malomtérben az őrlési folyamatok elvégzésére egyrészt villamos energiát viszünk be, másrészt az áthúzó légáramnál villamos energiára átszámítható hőenergiát juttatunk be, amelynek elsősorban szárítási feladata van.

1. A bevitt villamos energia:	684,95 kWh
6. Az áthúzó légárammal bevitt energia:	510,88 kWh
A rendszerbe bevitt össz energia:	1.195,83 kWh

A bevitt össz villamos energia eloszlása az egyes, mérhető részfolyamatok között:

2. Szilárd anyag hőtartalom	591,24 kWh
3. Hajtómű olaj hőveszteség	21,74 kWh
4. Hajtómű palást hőveszteség	2,42 kWh
5. Levegő hőtartalma	388,82 kWh
7. Malompalást hőveszteség	20,29 kWh
8. Üresjárati és őrlési energia	171,32 kWh
Össz. energia	1.195,83 kWh

Az őrlési munka igény származtatott érték. Gyakorlatilag azt feltételeztem, hogy a bevitt össz energia és a mérhető, az egyes folyamatokhoz szükséges energiák összegének a különbsége adja az üresjárati és az őrlés, a tényleges mészkőaprítási energia igény nagyságát. Ez az energia igény tartalmazza mindazokat a tételeket, amelyek mérésére üzemi körülmények között nincs lehetőség, de tudjuk, hogy léteznek ezek a folyamatok és van energia igényük. (pl. rugalmas deformáció a felületi energia szintnövekedés, a gépek rugalmas deformációja ... stb.). A bevitt és az egyes pozíciókban felhasznált energia mérlegben számunkra vannak kifejezetten hasznos tételei, és vannak olyan, energiát fogyasztó folyamatok, amelyek az őrlés-szárítás folyamat számára hasznos munkavégzést nem jelentenek, kifejezetten veszteségek. Ha elvégezzük az energia modell alapján ezt a felosztást, meghatározhatjuk a technológia üzemeltetési körülményei között, hogy a bevitt villamos energia hány százaléka az, amivel a szárításnál számolhatunk. Ennek később az előrecsatolásos folyamat üzemelési rendszer elvi meghatározásánál van jelentősége.

Ennek ismeretében határozható meg a földgáz, mint külső energia forrás, bevitelének és a felhasználás nagyságának az értéke.

A bevitt villamos energia megoszlása a mérési eredmények alapján.

- 1. A bevitt össz villamos energia684,95 kWh(33. táblázat 1.)
- 2. Az őrlési és szárítási folyamat szempontjából veszteségként jelentkező tételek:

	a. Hajtómű hőveszteség	21,74 kWh	(33. táblázat 2.)
	b. Hajtómű palást hőveszteség	2,42 kWh	(33. táblázat 4.)
	c. Malom palást hőveszteség	20,29 kWh	(33. táblázat 7.)
	Veszteségek összesen:	44,45 kWh	
3.	Üresjárati és őrlésre fordított energia:	171,32 kWh	(33. táblázat 8.)
4.	Szárításra fordított energia: (1-(2+3))	469,18 kWh	

6.6.10. A modul eredménye alapján meghatározható energiatakarékos termék minőség szabályozás

A technológia üzembe helyezését követően 2001 – 2005 között a szárításhoz felhasznált fajlagos földgáz felhasználás a következők szerint alakult:

	Fajlagos	Gázfogyasztás
2001.	$2,36 \text{ m}^3/\text{t}$	797.609 m ³
2002.	2,81 m ³ /t	$1.092.443 \text{ m}^3$
2003.	2,89 m ³ /t	$1.236.272 \text{ m}^3$
2004.	3,00 m ³ /t	$1.284.134 \text{ m}^3$
2005.	$2,80 \text{ m}^3/\text{t}$	$1.250.479 \text{ m}^3$

Megállapítható, hogy éves földgázfelhasználás, ill. az 1 t késztermékre jutó földgáz felhasználás rendkívül magas, és ma már a kísérletek elvégzése után kimondható, hogy indokolatlan.

A technológia zavartalan működését felügyelő programban az őrlési tér hőmérséklete, és így az ehhez szükséges földgáz mennyisége a korábbi, más technológiáknál tapasztalt értékek alapján lett beállítva és nem vette figyelembe, az üzembe helyezett technológia, és az üzemvitelt alapvetően meghatározó paramétereket.

Az évek során tudatosan az energiacsökkentés lehetőségét kereső kísérletek vezettek eredményre.

Alapvetően a bevitt villamos energiából keletkező súrlódási hő és a feladott anyag hőmérséklete, nedvesség tartalma, valamint az áthúzó légáram hő bevitele összefügg a késztermék vevő által előírt nedvesség tartalom biztosításával.

A rendszer akkor üzemel az elérhető legalacsonyabb energia felhasználással, ha a földgáz elégetésével biztosított, az áthúzó légáram hőmérsékletét növelő plusz energia nem haladja meg a szárításhoz a villamos energiából nyert hő, és a feladott anyag paramétereiből számított hő igény különbséget.

Az energia modell alapján felállítható az a matematikai modell, amelynek a számítógépes programja a mérési eredmények alapján, azt kiértékelve, automatikusan szabályozza 0-tól, a szárításhoz feltétlenül szükséges földgáz mennyiséget.

Az áthúzó légáram hőmérséklet változásából számolt, a malomtérben leadott hőmennyiség villamos energia egyenértéke és a bevitt villamos energiaszárításra fordított része áll rendelkezésünkre, mivel a késztermék szárítását biztosító energia.

$\mathbf{Q}_{sz\acute{a}r} = \mathbf{Q}_{leveg\acute{o}} + \mathbf{k} \boldsymbol{\cdot} \mathbf{Q}_{bevitt \ vill.en.}$

 k – az energia modellből meghatározott tényező, amely azt mutatja meg, hogy a bevitt villamos energia hány százaléka fordítódik szárításra esetünkben a kísérletek eredménye alapján

Az elvégzett kísérletek alapján k = 0,685.

 $Q_{leveg \vec{o}} = c_l \ m_l \ \Delta t$

Q_{levegő –} az áthúzó levegő hőtartalom változása

m_l – az áthúzó légáram tömege (kg)

A mért paraméterek alapján matematikailag meghatározható az az energiamennyiség, vagy átszámítva hőmennyiség, amely ahhoz szükséges, hogy a pillanatnyi mérési adatok alapján mennyi hőre van szükség ahhoz, hogy a késztermék nedvesség tartalma a megengedett érték alatt maradjon.

$$\begin{split} Q_{aszp} &= Q_1 \left(\text{feladott anyag hőváltozás} \right) + Q_2 \left(\text{párologtatás feladott anyag} \right) \\ Q_1 &= c_a \ m \ \Delta t \\ Q_2 &= c_v \ m \ \Delta t + \phi_v m \\ Q_{aszp} &= c_a \ m_a \ \Delta t_a + c_v \ m_v \ \Delta t_v + \phi_v m_v + c_1 \ m_1 \ \Delta t_1 \\ Q_{aszp} - a \ pillanatnyi \ feladott anyag \ paraméterei \ alapján \ meghatározott \ szárítási \ energia \\ c_a - a \ feladott \ anyag \ fajhője \ KJ/kg^oC \end{split}$$

- m_a a feladott anyag tömege kg
- Δt_a a belépő és kilépő anyaghőmérséklet különbsége ^oC
- c_v a víz fajhője KJ/kg^oC
- m_v a feladott anyagban és a késztermékben lévő víz mennyisége (kg)
- Δt_v a belépő anyagban lévő víz és a kilépő anyagban lévő víz hőmérséklet különbsége (kg)
- ϕ_v a víz fajlagos párolgási hője a malomtér hőmérsékletén (KJ/kg)

c_e – a levegő fajhője KJ/kg°C

Energiahasznosítást optimáló szabályozási alapelv:

1. $Q_{sz\acute{a}rit\acute{a}s} \ge Q_{aszp}$, akkor a szárításhoz külső energia nem szükséges.

Ebben az esetben a szárításhoz külső energiára nincs szükség, a rendszerben energiafölösleg van (pl.: kánikulai időszak).

Az energiafelesleg hasznosulását a malomra feladott anyag tömegáram növelésével tudjuk elérni. Az anyag tömegáram növelés nagyságát:

 $\Delta m = \Delta Q/W_{\text{üBi}}$

 Δm - feladott tömegáram töblet [t/h]

 ΔQ – a rendszer energiafeleslege [kW]

W_{üBi} – mért üzemi Bond-munkaindex [kWh/t]

2. $Q_{sz\acute{a}rit\acute{a}s} < Q_{aszp}$, a rendszerbe külső energia bevitele szükséges (földgáz).

Ebben az esetben a szárításhoz szükséges külső energia nagyságát a következő összefüggéssel határozom meg:

$Q_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} = Q_{aszp}$ - $Q_{sz\acute{a}r\acute{t}\acute{a}s}$

A kísérletek során a külső energia beviteli módja az áthúzó légáram belépési hőmérsékletének földgáz elégetésével történő növelése, amely a malomtéren áthaladva elősegíti a késztermék nedvesség tartalmának határérték alatt tartását.

A matematikai modellből meghatározható a külső energiaforrás nagyság.

A gázégőben elégetett földgáz technikai paramétereit ismerve, és ismerve az áthúzó légáram és a feladott anyag tömegét, számítható a szükséges és elégetendő földgáz mennyisége.

A földgáz átlagos fűtőértéke a TIGÁZ Zrt. szolgáltatási területén 34-34,1 MJ/m³. Ezt az értéket átszámítva villamos energia egyenértékre, meghatározhatjuk a szükséges földgáz mennyiséget.

1 joule = 2,778 x 10^{-4} Wh 34 MJ/m³ = 34 x 10^{6} J/m³ = 94,455 x 10^{2} Wh/m³ = <u>9,4455 kWh</u>

A fentiekben felvázolt matematikai modellhez tartozóan az őrlési folyamatban a következő paraméterek mérése, adatinak számítógépes rögzítése, és a folyamatszabályozási program számára az elérése szükséges.

- 1. A malom feladási anyag folyamatos hőmérséklet és nedvesség tartalom mérése
- 2. A késztermék hőmérsékletének és nedvesség tartalmának a folyamatos mérése
- Az áthúzó légáram belépő és kilépő hőmérsékletének, valamint mennyiségének a folyamatos mérése
- 4. A malom motor energia felvételének folyamatos mérése
- 5. A feladott anyag, ill. késztermék tömegének a mérése

7. Összefoglalás

A szakirodalmi áttekintés alapján megállapítható, hogy az általam áttanulmányozott munkák behatóan foglalkoznak az őrölhetőség vizsgálatával, az őrlési munka meghatározásával. Számos módszer került kidolgozásra, , amelyek célja, hogy meghatározza az őrlés energia igényét, és ezáltal segítse az őrlőberendezések méretezését, tervezését.

Az őrlési folyamat bonyolultsága, az őrlést befolyásoló paraméterek időbeli folyamatos változása azonban a gyakorlatban mindig eltérő eredményeket hoz a laboratóriumi kísérletek során elért eredményektől.

Kutatásaim során konkrét technológiai sor és adott mészkő előfordulásból származó anyag őrölhetőségi vizsgálatait végeztem el.

Célul tűztem ki továbbá, hogy a komplex őrlés-osztályzás-szárítási folyamat energia felhasználását optimalizáljam, ehhez olyan mérési és számítási modellt dolgoztam ki, amely alapján a hasonló technológiák energia felhasználásának optimálása elvégezhető.

A vizsgálatok elvégzése egyrészt laboratóriumban, szakirodalomból ismert őrölhetőségi vizsgálati módszerekkel történt, másrészt a gyárban, az alkalmazott technológiai gyártósoron üzemi kísérletekkel.

A laboratóriumi mérések során vizsgálatot végeztem a Bond és Hardgrove malmokkal a Bond- munkaindex és Hardgrove index , valamint az őrléshez szükséges fajlagos energia igény meghatározására.

Az első kísérleti körben, amikor üzemi kísérletekre is sor került az őrlési tér hőmérséklete és az őrlés villamos energia igénye közötti függvény kapcsolatok feltárása volt fontos.

A késztermék nedvességtartalmának határérték alatt tartását a technológiánk az áthúzó légáram hevítésével biztosította, amihez földgázt égettünk el. Induláskor az őrlőtér hőmérséklete 80 – 150 °C közötti hőmérsékletre volt szabályozva, ami a korábbi tapasztalataim alapján túlzónak tűnt. Kísérleteim első szakaszában a folyamat vezérlési rendszer levegő hőmérsékleti szabályzásának első, 80 °C-os határát oldottam fel, és a kísérletek során a hőmérséklet szakaszos emelésével növeltük az őrlőtér hőmérsékleté t és rögzítettük az őrlési folyamat paramétereit. A kísérlet eredményeként az őrlési tér hőmérsékletének az emelésével a villamos energia igénye a malomnak csökkent.

Kifejezetten gazdaságossági haszna a kérdésnek nem volt, hisz a felhasznált földgáz villamos egyenértéke és a tényleges villamos energia felhasználás összességében meg háromszorozta

az energia igényt, és az üzemi kísérletek után feltártam a hőmérséklet – őrlési energia összefüggést, majd laboratóriumban végeztem őrölhetőségi vizsgálatokat Hardgrove malommal, amelynél az őrlési tér hőmérséklete változtatható volt.

Az üzemihez hasonló módon emeltük az őrlési tér hőmérsékletét, miközben a bányában található három típusú mészkő munkaindexeinek a számításához szükséges értékeket is rögzítettük.

A számszerű adatok azt jelzik, hogy azonos hőmérsékleti adatoknál összehasonlítva az őrléshez szükséges energia igény értékeket a szürke és fehér mikrokristályos mészkő minden hőmérsékleti ponton nagyon jól megközelíti egymást. A kovás mészkő esetében láthatók eltérések a fent említett két mészkő típushoz képest.

Az eltérések legmarkánsabban 20 °C-nál jelentkeznek, ahol 17 %-ot tesznek ki, valamint 80 °C-nál haladja meg a 10 %-ot.

A sötétszürke és fehér mikrokristályos mészkő, hasonlóan a nyomatékmérés alapján számított értékekhez, szinte minden mérési pontban megegyeznek, minimális az eltérés. A kovás mészkő őrlésének az energia igénye ebben az esetben kevesebb, mint a sötétszürke és fehér mikrokristályos mészkőé, de az eltérés nagysága sehol sem haladja meg a 10 %-ot. Megállapítható, hogy a munkaszükséglet értékét a hőmérséklet érdemlegesen nem befolyásolja.

Az üzemi és laboratóriumi kísérleteket összevetve az őrlési tér hőmérséklete és az őrlési energia nagysága között jelentős különbség van.

A különbség okát a robbantásos jövesztésben kerestem.

A robbantás során a lerobbantott kőzet tényleges aprításon túl a robbantási energia, a kőzet szemcsékben hibahelyeket un. "mészkőrepedéseket" hoz létre.

A robbantás hatása a laboratóriumi mérések során nem jelentkezik látványosan, mert a kísérletek során a feladási anyag Hardgrove malomnál 60 – 120 μ m, a Bond malomnál 0 – 300 μ m, azaz túl finom szemcsézetű, ezért a robbantás okozta mikro repedezettség nem, vagy nem számottevő hatással van az őrlés során a villamos energia igényre, míg magasabb hőmérséklet esetén sem.

Kísérleteket végeztünk az őrlési energia és a hőmérséklet összefüggésének tisztázására, ahol a bányatelken belül, kibúvásból vett mészkő minták kerületek összehasonlításra a robbantott készletből vett minták mikro repedezettségével. Ehhez alapvetően az akusztikus hullám terjedési sebesség meghatározását alkalmaztuk. Kiegészítés képen próbáltuk optikai

módszerrel is megfogni a mikro repedéseket, de ez sem optikai, sem elektronmikroszkópos vizsgálattal nem sikerült.

A terjedési sebességből megállapítható, hogy a tetőről vett, robbantással nem érintett minták esetében a legkisebb sebesség a palásságra merőleges irányban mérhető, a legnagyobb pedig a palássággal és lineációval párhuzamosan. Mivel ezek a minták irányított szövetű mikro kristályos mészkövek, a kőzet szövetében szemcsealaki irányítottság lép fel. A szemcsék a palássággal párhuzamosan lapultak, így erre merőlegesen egységnyi szakaszra több szemcse kontaktus jut, ez csökkenti a terjedési sebességet.

A tetőről, kibúvásból vett minták esetében a három fő szöveti irányban mért hullám terjedési sebesség értéke a neomorfózissal kialakult szövettel függ össze.

Ezzel szemben az egyes robbantási szintekből vett minták ettől eltérően viselkednek. A tetőről vett minták, a már említett szöveti okokból PPLM-PM értékei kissé pozitívak és a PPLM-PPLP értékek kissé negatívak. Ezzel szemben a robbantott készletből eredő minták mindkét különbség értéke negatív. A repedezett mintákban jelentősen lecsökken a sebesség a PPLM irányban, ebből következtethetünk arra, hogy ezekben a robbantás hatására repedések többnyire a PMLP sík mentén keletkeztek.

A 435. 1. mintából a három orientációs síkban vett mintákon röntgen por diffrakciós felvételeket készítettünk. Az egyes diffrakciós csúcsok kiszélesedéséből. Eltolódásából, illetve intenzitásuk változásából a kristályszerkezeti irányítottság mértékére, a neomorfózist létrehozó geo dinamikai körülményekre, azaz a disz lokáció sűrűségre lehet következtetni.

Ezen az üzemi és laboratóriumi mérések eredményei alapján újfent leszögezhetjük, hogy a magas hőmérsékletű őrlési tér összességében jelentősen növeli az őrlésre fordított összes energiát, gazdaságtalan.

A malomtérben és az osztályzón áthúzó légáram hőmérsékletének a növelése és ezen keresztül az őrlési tér hőmérsékletének a növelése csak egy célt, a késztermék nedvesség tartalmának határérték alatt való tartását, azaz a szárítást segíti elő.

Ha a földgáz, mint energiaforrás, csak a termék szárításához szükséges, ismerjük-e pontosan az őrlési technológia energia modelljét és kihasználjuk-e tudatosan az őrlésre bevitt villamos energia azon részét szárításra, amely az őrlés szempontjából veszteség, de mint súrlódási hő, a késztermék nedvesség tartalmának határértéken belül tartásában jelentős szerepe lehet.

Munkám további részében a technológia energia eloszlási modelljének a kidolgozásával, az ehhez szükséges mérési metodika kidolgozásával, és a mérések ipari körülmények közötti elvégzésével foglalkoztam.

A mérések során felmerült kérdések újabb problémákra világítottak rá.

Így került felszínre a fajlagos szabadfelület növelés és az energia kérdése, amely arra irányította rá a figyelmem, hogy az indokolatlan szemszerkezet finomítás komoly villamos energia felhasználás növekedést eredményez.

Jelentős számú kísérlet alapján határoztam meg ismételten az üzemi Bond munkaindexet, amelynek eredményei nagyon minimális ingadozást mutatnak, s az ingadozás oka a feladott anyag meddőtartalmai közötti különbségben keresendők.

Alapvetően az energia modellből határozható meg, hogy a bevitt villamos energiából keletkező súrlódási hő és a feladott anyag hőmérséklete, nedvesség tartalma, valamint az áthúzó légáram hő bevitele összefügg a késztermék előírt nedvesség tartalmának a biztosításával.

A rendszer akkor üzemel az elérhető legalacsonyabb energia felhasználással, ha a földgáz elégetésével biztosított, az áthúzó légáram hőmérsékletét növelő plusz energia nem haladja meg a szárításhoz a villamos energiából nyert hő és a feladott anyag paramétereiből számított hő igény különbséget.

Az energia modell alapján felállítható az a matematikai modell, amelynek a számítógépes programja a mérési eredmények alapján, azt kiértékelve, automatikusan szabályozza nullától, a szárításhoz feltétlenül szükséges földgáz mennyiségét.

8. Summary

Based on the review of professional literature, it can be established that the works I studied go deeply into the examination of grindability, the definition of the grinding work. Several methods have been developed, the aim of which is to define the energy requirement of grinding, and thus help the sizing and planning of grinding equipment.

The complexity of the grinding procedure, the continuous time-wise change of the parameters influencing grinding, however, in practise always yield results different from the results achieved during the course of laboratory experiments.

During the course of my research, I performed the grindability examinations of materials originating from the occurrence of a concrete technological line and a given limestone.

Furthermore, I set it as a goal to optimise the energy consumption of the complex grinding – classification – drying procedure; for this, I developed a model of measurement and calculation on the basis of which the optimisation of the energy consumption of similar technologies can be carried out.

The execution of the examinations took place partly in the laboratory, with grindability examination methods known from the professional literature, partly in the factory, on the technological production line applied, with plant experiments.

During the course of the laboratory measurements, I executed examination with the Bond and Hardgrove mills, to define the Bond- work index and Hardgrove index, as well as the specific energy requirement necessary for the grinding.

In the first round of experiment, when plant experiments also took place, the exploration of the function relationships between the temperature of the grinding space and the electric energy need of the grinding was important.

Keeping the humidity contents of the finished product below the limit value was secured by our technology though the heating of the drawn-over air current, for which we burnt natural gas. Upon starting, the temperature of the grinding space was regulated between $80 - 150^{\circ}$ C, which, on the basis of my earlier experience, seemed exaggerated. In the first phase of my experiments, I released the first, 80° C limit of the procedure control system air temperature regulation, and, during the course of the experiments, by increasing the temperature in a periodical manner, we increased the temperature of the grinding space, and we recorded the parameters of the grinding procedure. As the result of the experiment, through the increase of the temperature of the grinding space, the electric energy need of the mill dropped.

The issue did not have an expressly economic benefit, as, in its entirety, the electric equivalent of the natural gas used and the actual electric energy use tripled the energy need, and, following the plant experiments, I explored the temperature – grinding energy relationship, then conducted grindability examinations in the laboratory with a Hardgrove mill, where the temperature of the grinding space could be varied.

Similar to that of the plant, we increased the temperature of the grinding space while we also recorded the values necessary for the calculation of the work indexes of the three types of limestone to be found in the mine.

The numerical data indicate that, upon identical temperature data, when comparing the energy requirement values needed for grinding, grey and white micro-crystal limestone approach each other very well at every temperature point. We can see differences in the case of silicious limestone, as compared to the two above-mentioned types of limestone.

The differences manifest themselves most markedly at 20° C, where they constitute 17 %, while they exceed 10 % at 80° C.

Dark grey and white micro crystal limestone, similar to the values calculated on the basis of the measurement of stress, are the same at almost every point of measurement, the difference is minimal. The energy requirement of the grinding of silicious limestone in this case is lower than that of the dark grey and white micro crystal limestone, but the extent of the difference does not exceed 10% anywhere. It can be established that the value of work-requirement is not influenced by temperature on its merits.

When comparing plant and laboratory experiments, there seems to be a significant difference between the temperature of the grinding space and the extent of the grinding energy.

I looked for the reason of the difference in shooting on the free.

During the course of explosion, the rock exploded down; in addition to the actual pounding, the explosion energy creates spots of error, so-called "limestone cracks" in the rock granules.

The effect of explosion does not manifest itself spectacularly during the course of laboratory measurements as, during the course of the experiments, the loading material at the Hardgrove mill is $60 - 120 \ \mu$ m, at the Bond mill it is $0 - 300 \ \mu$ m, that is, of too fine granules, therefore, the micro cracks caused by the explosion have no or insignificant effect on the electric energy requirement during the course of grinding, even at higher temperatures.

We conducted experiments to clarify the relationship of grinding energy and temperature, where limestone samples were compared within the mine plot, taken from the exposure, with the micro cracks of the samples taken from the exploded stock. For this, we applied basically the acoustic wave spreading speed definition. By way of supplement, we tried to catch the micro cracks with an optical method as well but this was not successful either by means of the optical or the electron-microscopic examination.

It can be established of the spreading speed that, in the case of samples taken from the roof, unaffected by explosion, the smallest speed can be measured in the direction perpendicular to foliation, while the highest parallel to foliation and lineation. As these samples are micro crystal limestones of directed texture, there is a granular directedness manifested in the texture of the rock. The granules were nestled parallel with the foliation, thus perpendicular to this; there is more granule contact per one unit of section, which decreases the speed of spreading.

In the case of samples taken from the roof, the exposure, the wave spread speed value measured in the three main textual directions is related to the texture established with neomorphosis.

Contrary to this, the samples taken from the individual levels of explosion behave in a manner different from this. The PPLM-PM values of the samples taken from the roof, for the texture reasons mentioned above, are slightly positive, and the PPLM-PPLP values are slightly negative. Contrary to this, both difference values of the samples coming from the exploded stock are negative. Speed in the cracked samples significantly drops in the PPLM direction, thus we can draw the conclusion that in these, as a result of the explosion, the cracks emerged mostly along the PMLP plane.

From the 435. 1. sample we prepared x-ray dust diffraction shots on the samples taken in three orientation planes. From the widening of the individual diffraction peaks. From their shift, as well as the changes of their intensity, one can draw conclusions about the extent of the crystal structure directedness, the geo dynamic circumstances creating the neomorphosis, that is, the density of the dislocation.

On the basis of the results of these plant and laboratory measurements, we can establish one more time that, in its entirety, the high-temperature grinding space significantly increases the total amount of energy used for grinding, and is not economical.

Increasing the temperature of the air flow drawn through the mill space and the grader, and through that, increasing the temperature of the grinding space promoted just one aim: keeping the humidity contents of the finished product under the limit value: that is, drying.

If natural gas, as a source of energy, is necessary only for the drying of the product, do we know the energy model of the grinding technology precisely and do we exploit that part of the electric energy input for grinding consciously for drying, which is a loss from the aspect of drying but, as friction heat, may have a significant role in keeping the humidity contents of the finished product within the limit.

In the remaining part of my work, I dealt with the development of the energy distribution model of the technology, the development of the methodology of measurement necessary for this, and the execution of the measurements among industrial circumstances.

The questions emerging during the course of the measurements highlighted newer problems.

It was thus how the issue of the increase of specific free surface and energy came to the surface, which drew my attention to the fact that un-called for refining of grain structure leads to a serious increase of electric energy consumption.

I redefined the plant Bond work index on the basis of a significant number of experiments, the results of which show a minimal fluctuation, and the reason for the fluctuation should be looked for in the differences between the gangue contents of the materials loaded.

Basically, it can be defined from the energy model whether the friction heat produced by the electric energy input and the temperature and humidity contents of the material loaded, as well as the heat input of the air flow drawn through are related to securing the required humidity contents of the finished product.

The system operates using the lowest achievable amount of energy consumption if, through the burning of natural gas, it is secured that the plus energy increasing the temperature of the air flow drawn through does not exceed the difference between the heat gained from the electric energy for drying and the heat requirement calculated from the parameters of the material loaded.

On the basis of the energy model, we can set up the mathematical model whose computer program – on the basis of the results of measurement, by evaluating those – automatically regulates the amount of natural gas indispensably necessary for drying, from zero.

9. Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok témavezetőmnek Prof. Dr. Csőke Barnabásnak a lehetőségért, amely munkám sikeres elvégzését, értekezésem megírását jelentette, és köszönöm segítőkész támogatását, munkám kritikus véleményezését, amely munkám jobbá tételét eredményezte.

Köszönetet mondok a Műszaki Földtudományi Kar valamint az Előkészítéstechnikai Intézet valamennyi oktatójának, munkatársának hasznos tanácsaikért, szakmai észrevételeikért és biztató szavaikért.

Külön szeretném kiemelni Dr. Mucsi Gábor szakmai koordinálását és segítségét a laboratóriumi mérések szervezésében és segítésében.

Hálával és köszönettel tartozom munkatársaimnak, akik az üzemi kísérletek elvégzéséhez és az értekezés technikai elkészítéséhez nyújtottak komoly segítséget. Szeretném külön kiemelni és megköszönni Farkas Andrásné és Gyulai Péter kollégáim támogatását és munkáját.

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

10. Publikációk

- 1. Nagy Lajos: Korszerű finomosztályzás: osztályozás és őrlés görgős malommal BKL 2005. 138. évf. 6. szám 8-11. old.
- 2. Nagy Lajos: Az Eger-Felnémeti mészkőbánya BKL 2001. 134. évf. 6. szám 463-466. old.
- 3. Nagy Lajos: Korszerű finomosztályzás, osztályzás és őrlés görgősmalommal

Bányagépész Konferencia kiadványa 2005. Balatongyörök 2005. szept. 29-30. 16-22. old.

4. Nagy Lajos: Környezettudatos bányászkodás Felnémeten XI. Bányászati-Kohászati és Földtani Konferencia – BKF 2009. EMT Konferencia kiadványa, Máramarossziget 2009. ápr. 2-5. 78-87. old.

- 5. Nagy Lajos: Környezettudatos bányászkodás Felnémeten BKL 2009. 142. évf. 2. szám 12-18. old. (megjelenés alatt)
- 6. Nagy Lajos: A robbantás geometriai paramétereinek és a robbantott kőhalmaz szemszerkezetének az összefüggései BKL 2009. 142. évf. 5-6. szám 15-19. old.
- 7. Dr. Mádai Ferenc Nagy Lajos: Effects of the temperature and the blasting to the grinding energy Acta Montanistica Slovaca (megjelenés alatt)
- 8. Nagy Lajos: Az őrlési folyamat energia-optimalizálása az Omya Hungária Kft-nél

Építőanyag (megjelenés alatt)

11. Szakirodalom

- 1. Magyar Geológiai Szolgálat, majd Magyar Bányászati és Földtani Hivatal
- 2. Magyarország ásványi nyersanyagvagyona MGSZ, Bp. 2006.
- 3. Energetikai Hivatal adatszolgáltatás
- 4. SMEKAL, A.: Proc. Of the Intern. Symp. on the Reactivity of Solids. 131. (1952).
- 5. BEKE B.: Aprításelmélet. Akadémiai Kiadó, Budapest 1963.
- 6. AUSTIN, L. G.- KLEMPEL, R. R.: Aufbereitungs-Technik 1. 10 (1966).
- 7. JUHÁSZ, Z.: Aufbereitungs-Technik 10, 558 (1974)
- 8. GRIFFITH, A.A.: Phil. Trans. Roy.Soc. London. 221 A, 163 (1920).
- 9. RUMPF, H.: Chem.-Ing.-Techn. 34. 731 (1962)
- SCHNEIDER, U.: Aufbereitungs-Technik 11, 567 (1968), R.: Freiberger Forschungshefte A. 392, (1966).
- TARJÁN GUSZTÁV: Ásványelőkészítés II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1969. pp.313-348
- 12. NÁRAY-SZABÓ J.: Kristálykémia. Akadémiai Kiadó, Budapest 1965.
- 13. HOUWINK, R.: Elastizität und Struktur der Materie. Dresden 1950.
- 14. KITTEL, CH.: Bevezetés a szilárdtest fizikába. Műszaki Kiadó, Budapest 1966.
- JUHÁSZ, A. Z.-OPOCZKY, L.: Szilikátok mechanikai aktiválása finom őrléssel. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1982.
- 16. PETHŐ Sz.: Aprítás és osztályozás. Tankönyvkiadó, Budapest, 1988 p. 17-27
- BEKE B.: Növelhető-e az őrlési folyamat hatásossága? Építőanyag, XXXII. évf.
 1980. 6. szám p. 209-211.
- STAIRMAND, C.J.: The Energy Efficiency of Milling Process. Zerkleinern. Dechema-Monographien Nr. 79. (1976) pp. 1-17.
- MERIC, J. P.: Le broyage. Rev. Mat. Constr. (C. B. P. C.) No. 6/78 715 (1978) pp. 329-333.
- 20. R. T. HUKKI, I. G. REDDY: The relationsship between net energy input and fineness in comminution. Zerkleinern Symposion in Amsterdam 1966. B5 pp. 313-339.
- 21. BEKE B.: Anyagok őrölhetősége és az őrölhetőség mérőszáma. Építőanyag, XXVI. évf.. 1974. 12. szám p. 449-455
- 22. (KIRPICSEV, V.L.) В.Л КИРПИЧЕВ: Журнал Русского физико-химического общества. VI.I. часть., физическая, выпуск IX. 152 (1874).

- 23. KICK, F.: Dinglers Journal 250, 141 (1883).
- 24. FEJES G.:, TARJÁN G.: Vegyipari gépek és műveletek, Budapest 1979. pp. 61-71.
- 25. PETHŐ SZ., CSŐKE B.: Hazai kőzetek Bond-munkaindexének meghatározása. Építőanyag 1983.11. szám p. 401-407.
- 26. BEKE B.: A finomőrlés folyamata. Budapest, 1975 pp. 65-82.
- 27. CHARLES, R.J.: Mining Engeneering (Trans.A.I.M.E.) 208, 80 (1957).
- 28. HOLMES, J.A.: Trans.Inst. Chem. Eng. 35, 125 (1957).
- SVENSSON, J.-MURKES, J.: International Mineral Dress. Congress. Stockholm. 37. (1957)
- CHARLES, R. J.: Energy-size reduction relationship in comminution. Mining Eng. (Trans. A:I:M:E[©] 208, 80 (1957)
- A. GUPTA, D. YAN: Mineral Processing Design and Operations. ELSEVIER, ISBN-13: 978-0-444-51636-7, 2006. pp. 68-96.
- 32. BEKE.B.: Építőanyag 13, 241 (1961).
- 33. RUMPF, h.: Aufbereitungs-Technik 40, 59 (1973).
- 34. PATAT, F.:Dechema-Monographien, Bd. 57, Verlag Chemie, Weinheim 0967. 183.o.
- STEIER, K. SCHÖNERT, K.: Dechema Monographien. Bd. 69, Verlag Chemie, Weinheim 1972. 167. o.
- 36. SMEKAL, A.: Zeitschr. VDI. 81. 1321 (1937).
- 37. BEKE B.: Építóanyag 25, 47 (1973).
- 38. BOWN, R.W.: Bull. Trans. Instn. Min. Metall. Sc. C., London 75. 715, 173 (1966).
- 39. SCHELLINGER, A.K.: Min. Engng. 4, 369 (1952).
- 40. SEKULA, F.-KRUPA, V. MERVEA, M. HOCMANOVA, I.: Bilanz der energetischen Transformation beim Drehbohren (Vortrag) Kosice 1973.
- MERVA, M. KRUPA, V.: VI. Symposium f
 ür Mechanoemission und Mechanochemie. Berlin. Kurzreferate Nr. 33. (1977).
- 42. TKAČOVA, K. SEKULA. F. KRUPA, V. BEJDA, I. KAVEČANSKA, V.:
 VI. Symp. Für Mechanoemmission und Mechanochemie, Berlin, Kurzreferate Nr. 32. (1977).
- 43. (HODAKOV, G) Г. С. ХОДАКОВ: Исследования в области физико-химичесской механики тонкого измелъчения. Докторская диссер. АН СССР. Москва. (1967).
- 44. SCHELLINGER, A.K. LALKAHA, R.D.: Ming. Engng. 3, 523 (1951).
- 45. BERNHARDT, C.-GOTTSCHALK, J.-HEEGEN, M.-HUSEMANN, K.:: Silikattechnik 25, 183 (1974).

- 46. HUSEMANN, K.-BERNHARDT, C.-GOTTSCHALK, J.-HEEGN, M.: Silikattechnik 25, 238 (1974).
- 47. HEEGN, M.-BERNHARDT, C.-GOTTSCHALK, J.-HUSEMANN, K.: Chem. Techn. 26, 696 (1974)
- 48. HEEGN, M.-BERNHARDT, C.: Freiberger Forschungshefte A 553, 57 (1976).
- 49. REMÉNYI K.: Őrölhetőségi eljárások és kétkomponensű keverékek aprítása. Budapesti Műszaki Egyetem Továbbképző Intézete, Budapest 1974. 31. o. The Theory of Grindability and the Comminution of Binary Mixtures, Akad. Kiadó, Budapest 1974.
- 50. ASTM Standard D 409-51. Pub. By the American Society for Testing Materials, Philadelphia 49. (1951).
- ZEISEL, H. G.: Schriftenreihe der Zementindustrie, Verein Deutscher Zementwerke e.
 V., Düsseldorf. Heft 14, 31 (1953)
- 52. LEHMANN, H. HAESE, U.: Tonind. Ztg. 79, 91 (1955).
- 53. TOMPOS E., SCHULTZ GY., CSŐKE B., BŐHM J.: Ásványelőkészítési mérések és laboratóriumi gyakorlatok. Tankönyvkiadó, Budapest (1984)
- 54. BOND, F.C.: Brit. Chem. Engng. 6, 378 (1961): Aufbereitungs-Technik 5,211 (1964).
- 55. F. C. BOND: Berechnungsmethode zur Feinzerkleinerung (Evulation of fine particle grinding) Aufbereitungs-technik Nr. 5. 1964. pp. 211-218.
- F. C. BOND: Crushing and grinding calculations I-II. British Chemical Engineering 1961. pp. 1-14.
- F. C. BOND, W. L. MAXSON: Standard grindability tests an calculations. Trans. Soc. Min. Eng. AIME 153 (1943), pp. 362-372.
- 58. REMÉNYI KÁROLY: Őrölhetőségi Eljárások és a kétkomponensű keverékek aprítása. Budapest Kézírat (1974) p. 28-47.
- CSŐKE B.: Előkészitéstechnika: Apritás és oszályozás, Miskolci Egyetem, Eljárástechnikai Tanszék (2005) pp. 44-46, 101-105.
- 60. MRAKOVICSNÉ T. K.: Őrölhetőség vizsgálati módszerek. SZIKKTI Tudományos Közleménye, 1983 p. 76
- R. J. DEISTER: How to determine the Bond work index using lab ball mill grindability tests. E&MJ 1987. February pp. 42-45
- 62. 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

- 63. 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.
- 64. 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
- 65. 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
- 66. LEVIN, J.: A Proposed Test for the Determination of the Grindability of Fine Materials. (1984) Mintek Report M177, Council for Mineral Technology, South Africa
- 67. KAPUR, P. C.: Analysis of the Bond grindability test. Trans. IMM, Vol. 79. 1970. pp C-103-108.
- V. K. KARRA: Simulation of the Bond grindability test. CÍM Bulletin, Vol. 74. no. 827. 1981. pp. 195-199.
- 69. R. F. YAP, J. L. SEPULVEDA, R. JAUREGUI: Determination of the bond work index using an ordinary laboratory batch ball mill. (Anaconda Minerals Company, Tuscon, Arisona) (Chapter 12) pp. 176-201.
- 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.
- 71. T. NIITTI: Rapid evaluation of grindability by a simple batch test. IXth International Mineral Processing Congress, Czech Republik 1970. pp. 41-45.
- MCINTYRE A, PLITT L, "The interrelation between Bond and Hardgrove Grindabilities" CÍM Bulletin 1980 vol 73 no. 818 pp. 149-154.
- 73. BOND, F. C.: Crushing and grindling calculations. CÍM Bulletin, Vol. 47. No. 507.1954. pp. 466-472
- 74. B. CSŐKE, L. BOKÁNYI, J. BŐHM, SZ. PETHŐ: Selective grindability of lignites and their application for producing an advanced fuel. Applied Energy 74 (2003) pp. 359-368.
- 75. Standard Tests Method for Grindability of Coal by Hardgrove-Machine method. 1931. ASTM D409-71
- 76. 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.
- 77. 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.

- 78. MATTHIAS STIEß : Mechanische Verfahrenstechnik 2
- 79. M. H. PAHL: Zerkleinerungstechnik (1991)
- 80. ÁRVAI GÁBOR: Diplomamunka (2008)
- 81. DR. FEKETE IVÁN DR. MENYHÁRT JÓZSEF: A légtechnika elméleti alapjai IV. fejezet
- 82. DR. CZÉL GYÖRGYNÉ DR. TRANTA FERENC: Elemzések
- 83. MUCSI GÁBOR: Vizsgálati eljárások fejlesztése finom szemcseméretű anyagok őrölhetőségének, valamint különleges körülmények mellett történő őrlés energiaszükségletének meghatározása (2009)
- 84. TARJÁN G. : Ércelőkészítéstan (1954)
- 85. Dipl.-Ing(FH) o.Jung: Auslegung von Walzenschüsselmühlen auf der Basis von Mahlgutuntersuchungen
- 86. MATTHIAS STIEß : Mechanische Verfahrenstechnik (1994)
- 87. JUHÁSZ A.Z. OPOCZKY L.: Építőanyag: Mecanokémia és agglomeráció (2003)
- 88. HORST BLUMENAUER GERHARD PUSCH: Műszaki törésmechanika (1987)
- 89. MUCSI GÁBOR: Finom szemcseméretű anyagok őrölhetőségi vizsgálata Építőanyag59. évf. 2007.2. szám
- 90. M. A.TÜZÜN : Minerals Engineering, Vol. 14. No. 3. 369-373 (2001)

12. Mellékletek

1.	Malom adatai	2. kötet
2.	Energiamodell mérési jegyzőkönyv	2. kötet
3.	A levegő és vízgőz keverék állapotjelzői	2. kötet
4.	Fajlagos felület mérési jegyzőkönyv	2. kötet
5.	Hullámterjedési sebesség és röntgendiffrakciós mérések	
	jegyzőkönyve	2. kötet
6.	Fajhőmérési jegyzőkönyv	.2. kötet