

Miskolci Egyetem – Műszaki Földtudományi Kar
Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet



HARDGROVE MALOMBAN VÉGZETT
KÖRFOLYAMATOS ŐRÖLHETŐSÉGI VIZSGÁLATOK

CLOSED CYCLE HARDGROVE GRINDABILITY TEST

Készítette:

Mag Gergely András

előkészítéstechnikai szakos MSc hallgató

Konzulensek:

Dr. Mucsi Gábor egyetemi docens

Rácz Ádám tudományos segédmunkatárs

Miskolc, 2013

Tartalomjegyzék

Bevezetés	1
2. Irodalmi áttekintés	2
2.1. Örlés	2
2.2. Aprítási munkatörvények.....	3
2.2.1. Rittinger-féle munkatörvény	3
2.2.2. Kick-Kirpicsev-féle munkatörvény	4
2.2.3. Bond-féle munkatörvény.....	4
2.3. Örölhetőségi vizsgálatok	5
2.3.1. Hardgrove módszer.....	5
2.3.2. Bond – eljárás	7
2.3.3. A Bond- vizsgálat kivitelezése laboratóriumban	8
2.3.4. További vizsgálatok	9
3. Anyagtulajdonságok	10
4. A mérések menete.....	12
4.1. A Hardgrove örölhetőségi index meghatározásának menete	13
4.2. Bond mérések menete.....	14
4.3. A körfolyamatos Hardgrove mérések menete.....	15
5. A mérési eredmények	17
5.1. A Hardgrove örölhetőségi vizsgálat eredményei	17
5.2. Bond mérés eredményei	18
5.3. A körfolyamatos Hardgrove mérések eredményei	20
5.4. Összefüggések megállapítása.....	26
6. Bond munkaindexek közötti összefüggések vizsgálata.....	28
7. Összefoglalás	32
8. Szakirodalom	34
9. Köszönetnyilvánítás.....	35

Bevezetés

Napjainkban a legköltségesebb és legtöbb energiát felemésztő nyersanyag- és hulladékéltőkészítési folyamat az őrlés. Az ásványfeldolgozásban nagyon fontos hogy ez az eljárás ne csak az elvart minőséget garantálja, hanem költségkhatékony is legyen. Ennek függvényében, a költség optimalizálás szempontjából, kiemelt figyelmet kell szentelni az őrlőberendezések pontos és szakszerű beállítására, illetve az őrlendő anyag tulajdonságainak vizsgálatára. Az őrlhetőség vizsgálata és meghatározása egy fontos feladat. Erre manapság több vizsgálati módszer is létezik, és a laboratóriumi eredmények összefüggésbe hozhatóak az ipari, üzemi termelés energiaszükségletével. A körültekintően kivitelezett mérésekkel, az ipari felhasználás során nagy mennyiségű energiát lehet megtakarítani, ami beruházási, üzemeltetési és profittermelési szempontból is rendkívül fontos.

AZ üzemi őrlés energiaszükségletének becslésére kidolgozott módszerek azonban nem alkalmazhatóak tetszőlegesen, minden malomtípus és szemcseméret esetén. A leggyakrabban alkalmazott, a körfolyamatos őrlést modellező ún. Bond-módszer elsősorban a golyós malmok méretezésére használható, más aprítóberendezésekre csak bizonyos feltételekkel alkalmazható. A Hardgrove vizsgálat pedig egy gyűrűs malmokra kifejlesztett szakaszos, laboratóriumi eljárás. A mai gyűrűsmalmok azonban már általában szélosztályozóval egybekötve zárt körfolyamatban üzemelnek. Ezen hiányosság kiküszöbölésére szükséges egy körfolyamatos őrlhetőségi vizsgálat kifejlesztése a gyűrűs malmok méretezéséhez, optimalálásához.

Fentiekkel összefüggésben a kutatás célkitűzése: körfolyamatos Hardgrove malmi kísérleti módszer kifejlesztése és szisztematikus ellenőrzése andezit, mészkő, homokos-kavics, bazalt és klinker minták felhasználásával. A vizsgálatok során egylépcsős Hardgrove, körfolyamatos Hardgrove és Bond vizsgálatokat folytattam, majd elvégeztem a mérési eredmények összehasonlítását. A vizsgálati eredmények értékelése alapján az egyes őrlhetőségi paraméterek között matematikai módszerekkel leírható összefüggések megállapíthatók.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. Örlés

A XXI. században elérte már alapvető követelménynek számít, hogy a fenntartható fejlődés érdekében járó a rendelkezésre álló természeti erőforrásokat (ásványvagyon) a lehető legkisebb környezeti terheléssel megfelelő módon termeljük ki és hasznosítsuk. A kibányászott nyersanyagot oly mértékben kell feldolgozni, hogy a célnak és igényeknek, továbbá a vonatkozó előírásoknak megfeleljen. Ezek a feldolgozási eljárások általában többlépcsős folyamatokból tevődnek össze, mint például: aprítás, őrlés, darabosítás. A végtermékek minőségével szemben támasztott egyre növekvő elvárások újabbnál újabb problémákat gördítenek a mérnökök elé. A különleges követelményeknek is megfelelő minőségű anyagok előállítása hatalmas energiaigénnyel rendelkezik, ami az előállítási költséget, és így pedig a piaci árakat is növeli, ill. akár veszteségessé is teheti magát az előállítást.

Ezért elengedhetetlen és nélkülözhetetlen az ipar számára, hogy laboratóriumi kísérleteket végezzünk, melyek eredményeiből üzemi és számolható. Az őrlési kísérletek tervezésével és kivitelezésével számos problémára találhatunk megoldást vagy éppen ezekkel világíthatunk rá új problémákra.

Számos iparágban fontos szerepe van az őrlésnek. „Az őrlés nagy energiaigényű művelet, melyet a széleskörű alkalmazásoknak megfelelően különféle működési elvű őrlőkészülékekkel végeznek. A folyamatos őrlések kétfélek: nyílt és zárt őrlések. A nyílt folyamatos őrléskor az őrlendő anyagot folyamatosan táplálják be a malomba annak bejáratánál, az anyag a malmon való végighaladása során őrlődik, majd a kijáraton keresztül az őrlemény folyamatosan kiáramlik a malomból. Nagyon gyakran osztályozót is társítanak a malomhoz. Ilyenkor a malom kijáratánál az őrlemény osztályozásra kerül. Az apró szemcséket, mint készterméket eltávolítják az őrlési folyamatból, míg a nagy szemcséket újraőrlésre visszaadják. Az ilyen típusú őrlés a zárt folyamatos őrlés”[1].

2.2. Aprítási munkatörvények

Az aprítandó vagy őrlendő anyag diszperzitásfoka és az őrlésre fordított energia közötti összefüggéseket az aprítási munkatörvények fejezik ki. A fizikai aprítási munka azonban több részből tevődik össze:

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

A bevezetett energia, azaz a gépi aprítási munka 10...100-szorosa a fizikai aprítási munkának. Ennek oka az aprítógép belső súrlódása (golyók, szemcsék és fal egymás között) és külső súrlódása (csapágy, hajtómű és fogaskerék súrlódási vesztesége) [2].

A legfontosabb és legnagyobb gyakorlati jelentőséggel bíró aprítási munkatörvények a Rittinger-, Kick-Kirpicsev- és Bond-féle törvények.

2.2.1. Rittinger-féle munkatörvény

A Rittinger által megalkotott energiaszükségleti alaptörvény kimondja, hogy az aprításhoz szükséges energia nagysága független az aprított anyag mechanikai és reológiai tulajdonságaitól, ugyanakkor arányos a keletkezett új felület nagyságával [12].

Tehát az őrlés során végzett munka az újonnan képződött felületek nagyságával arányos. A fajlagos munkaszükséglet a következő képlettel határozható meg:

$$W_{Rittinger} = C_R \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x_0} \right) \quad (1)$$

Ahol $a(z)$:

- C_R – a fajlagos felületi energiával arányos Rittenger állandó

- $1/x$ és $1/x_0$ – azonos méretűnek feltételezett szemcsékből álló halmaz térfogategységére vonatkoztatott fajlagos felületét jellemzik, amelyben x_0 a kiindulási, x pedig a keletkezett szemcse mérete.

•

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 finomörlés tartományában ($x < 50 \mu\text{m}$) alkalmazhatók eredményesen, ahol a nagy aprítási fok miatt a friss törési felület is nagy [3].

2.2.2. Kick-Kirpicsev-féle munkatörvény

Az úgynevezett térfogati elmélet az energiaszükségletet függetlennek tekinti a szemcsenagyságtól, ezért durva aprításnál alkalmazható ($x > 50 \text{ mm}$). Kick és Kirpicsev szerint a rideg anyagok törése a rugalmassági határ eléréséig szükséges igénybevétel hatására következik be, vagyis az energiaszükséglet az aprítandó test térfogatával arányos [4].

$$W_K = C_K \left(\lg \frac{1}{x} - \lg \frac{1}{x_0} \right) = C_K \cdot \lg \left(\frac{x}{x_0} \right) \quad (2)$$

Ahol $a(z)$:

- C_k – Kick-Kirpicsev állandó
- x, x_0 – a keletkezett és kiindulási térfogati átlagszemcsenagyság

Az összefüggés alapján a munkaszükséglet térfogatfüggő és nem veszi figyelembe a szemcsenagyságot, így finom anyagok őrlésénél ez nem alkalmazható megbízhatóan.

2.2.3. Bond-féle munkatörvény

Az eddig említett két munkatörvény a finom és durva anyagok őrlésénél, aprításánál használható, a felületnövekedés vagy a térfogatváltozás alapján. A két összefüggés közötti átmenetet Bond alkotta meg, szerinte a szemcsén keletkező repedések hossza az igénybevétel során, arányos az aprítási munkaigénnyel. Az általa megalkotott képlet szerint a törési munka:

$$W_B = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad (3)$$

Ahol a(z):

- C_B – Bond állandó
- x_{80} , X_{80} – a termék és a feladás 80%-os szemcsemérete
-

A Bond-index azt mutatja, hogy egységnyi tömegű (térfogatú) ∞ szemcseméretű anyag $x_{80}=1$ μm -re történő őrléséhez mennyi energiára van szükség. Ennek meghatározása a termék kis szemcsemérete miatt nehézségekbe ütközik, ezért a mutatót a gyakorlatban használt 100 μm -e történő őrlésre határozzák meg, amit Bond - munkaindexnek neveznek [6].

$$W_{iB} = \frac{C_B}{\sqrt{100}} \quad (4)$$

$$C_B = 10W_{iB} \quad (5)$$

$$W_B = W_{iB} * \left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad (6)$$

2.3. Őrölhetőségi vizsgálatok

A mechanikai diszpergálásra kerülő anyagok jellemzéséhez elengedhetetlen az őrlendő anyag mechanikai igénybevétellel szembeni ellenállásának, illetve őrölhetőségének ismerete. Az őrölhetőség anyagjellemző, amelynek meghatározása nehéz feladat. Az őrölhetőségi mérőszám azt mutatja meg, hogy egységnyi energiaráfordítással milyen aprítási eredmény érhető el. Az a törekvés, hogy a laboratóriumi vizsgálatokból következtetni lehessen az üzemi őrlés energiaszükségletére, az őrlőberendezések kapacitására több őrölhetőségi vizsgálati módszer (Hardgrove, Zeisel-, Bond-módszer, stb.) kidolgozására vezetett. Az ásványiparban és az ásványelőkészítésben mind a mai napig a Bond-módszer a legelterjedtebb.

2.3.1. Hardgrove módszer

A Hardgrove-módszert az Egyesült Államokban 1937-ben szabványosították (ASTM D 409 sz. alatt) szenek őrölhetőségének vizsgálatára. A módszer lényege az, hogy ASTM D 409 típusú csapágymalomban 50 g mintát, melynek szemcsemérete 630 és 1250 μm közötti, 60 fordulatig őrlnek. A keletkező őrleményt 0,074 mm-es szitán Retsch-szitagéppel 20 percig

szitálják és az áteső frakció tömegét lemérik ($m_{<74}$). Több párhuzamos vizsgálatot kell végezni, melyek eredményeinek eltérése nem haladhatja meg a 2 – 3 %-ot.

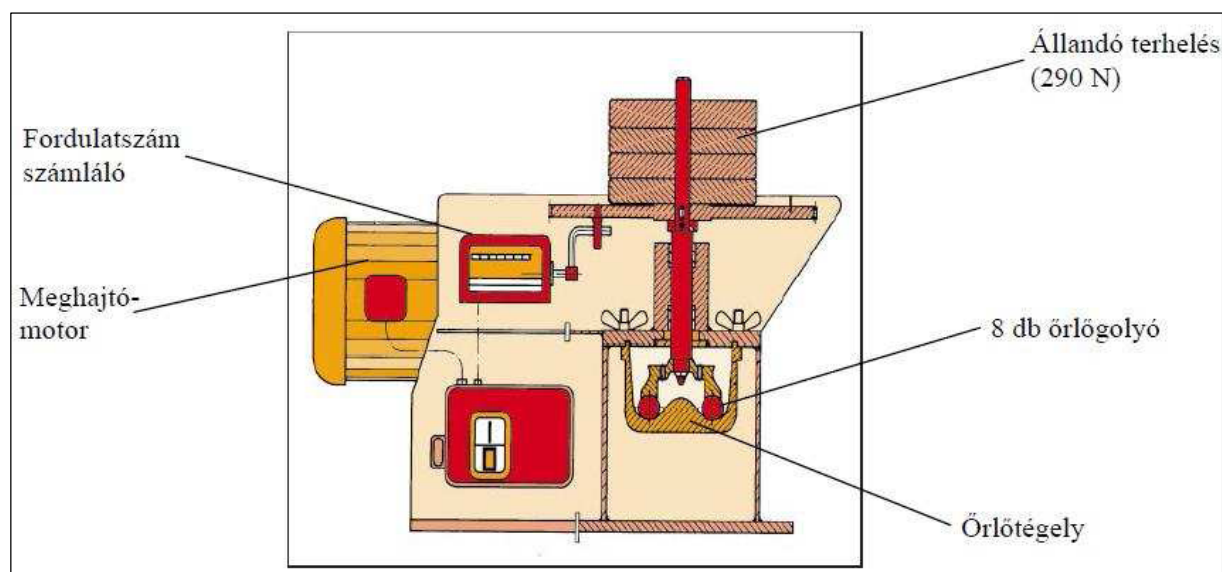
A Hardgrove-index a következő képlettel számítható:

$$^{\circ}H = 13 + 6,93 m_{<74} \quad (7)$$

A (7) egyenlet két állandóját (13 és 6,93) úgy határozták meg, hogy a közepesen őrlhető Jerome bánya (USA Pennsylvania) szenének indexe éppen 100 °H. Nehezen őrlhető szenek Hardgrove-indexe 100-nál kisebb. Nagyobb Hardgrove-szám tehát jobb őrlhetőséget jelent, de nem jelent arányosságot, azaz pl. H=100 nem jelent H=50-hez képest kétszeres teljesítményt. Szenek esetében gyakoribb értékek 40 és 100 közöttiek. H=40-nek 7,8%, H=100-nak 25% áthullás felel meg, azaz a Hardgrove-módszer csak az őrlés durva fokozatára jellemző. Ipari méretű finomőrlésre csakis azonos berendezésre és hasonló anyagra vonatkozó bőséges gyakorlati adatok ismeretében ad megbízható felvilágosítást. A három módszer közül egyébként a leggyorsabb és legegyszerűbb.

Csőke szerint a Hardgrove-indexből a Bond-index a következő empirikus formulával számolható [6] [7]:

$$W_H = \frac{468}{(^{\circ}H)^{0,82}} [kWh/t] \quad (8)$$



1. ábra: Hardgrove malom szerkezeti felépítés

2.3.2. Bond-eljárás

Bond az egyesített felületi és térfogati elméletén alapuló, általa kidolgozott munka-törvényben szereplő c_B munkaindex meghatározására vizsgálati módszert fejlesztett ki.

Bond szerint az üzemi őrlés fajlagos energiaszükséglete:

$$W_B = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad [\text{kWh/t}] \quad (9)$$

Ahol:

- W_B – az üzemi őrlés fajlagos energia szükséglete,
- X_{80} – a feladás 80 % -os áthullásához tartozó szemnagysága.
- x_{80} – az őrlemény 80 % -os áthullásához tartozó szemnagysága,
- C_B – Bond-index: anyagi tulajdonságoktól függő őrlhetőségi jellemző [kWh/t]

A C_B az az őrlési energia, amely egységnyi tömegű anyag $X_{80} \rightarrow \infty$ szemcsenagyságról $x_{80} = 1 \mu\text{m}$ -re való őrléséhez szükséges. Ennek mérése azonban – az 1 μm -re való őrlés miatt – igen nehézkes. Ha a valóságban igen gyakran előforduló $x_{80} = 100 \mu\text{m}$ őrlési finomságot vesszük alapul, akkor ($X_{80} \rightarrow \infty$ -ről) e szemnagyságra való őrlés fajlagos energiája:

$$W_{iB} = \frac{C_B}{\sqrt{100}} \quad (10)$$

amelyből $C_B = 10 W_{iB}$, mely utóbbit a (9) összefüggésbe behelyettesítve:

$$W_B = W_{iB} \left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right) \quad (11)$$

kifejezéséhez jutunk, amelyben a W_{iB} az úgynevezett Bond- munkaindex – az adott anyag $X_{80} \rightarrow \infty$ szemcsenagyságról $x_{80} = 100 \mu\text{m}$ -re való őrléséhez szükséges fajlagos energiája.

Bond az eljárást laboratóriumi körülmények között modellezte. $\varnothing 2,44 \times 2,44$ m méretű üzemi golyósmalomban végzett, zárt körfolyamatú nedves őrlést, ahol a kész finom termék aránya a visszajáró durva anyag mennyiségéhez képest 1 : 2,5. A laboratóriumi és üzemi mérések összevetése alapján a laboratóriumi mérés adataiból a munkaindex (W_{iB}) az alábbi empirikus képlettel számítható:

$$C_{B100} = \frac{4,9}{x_{\max}^{0,23} G_e^{0,82} \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right)} \quad [\text{kWh/t}] \quad (12)$$

Ahol $a(z)$:

- $x_{\max}$ – az előírt őrlési finomság, a kész finom termék maximális szemnagysága (rendszerint 100 μm)
- x_{80} – a őrlemény 80 % - szemnagysága
- X_{80} – az feladás 80 % - szemnagysága

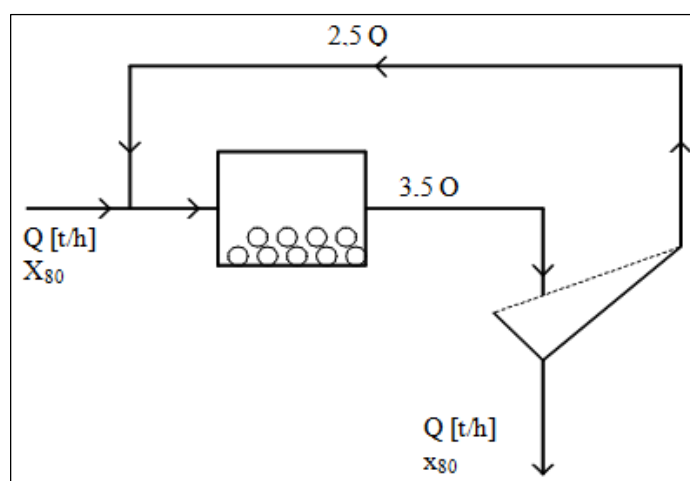
- G – őrlhetőségi koefficiens [g/fordulat], az egyensúlyi állapotban, a laboratóriumi malomban 1 fordulat alatt újonnan képződő $< x_{\max}$ szemcseméretű anyag mennyisége.

A G őrlhetőségi koefficiens meghatározása laboratóriumi golyósmalomban, előírt körülmények között, az egyensúly beállásáig végzett többlépcsős, körfolyamatos száraz őrléssel történik.

A C_{B100} általában az anyag szilárdságától, törékenységétől függő anyagi jellemző [8] [9].

2.3.3. A Bond-vizsgálat kivitelezése laboratóriumban

A laboratóriumi vizsgálat célja a G őrlhetőségi koefficiens meghatározása. Az őrlhetőségi vizsgálat speciális malomban ($\varnothing 305 \times 305 \text{ mm}$, fordulatszám $n = 70 \text{ min}^{-1}$, golyótöltet 20 kg), előírt körülmények között, az egyensúly beállásáig végzett többlépcsős körfolyamatos száraz őrléssel történik. A malomba $0,7 \text{ dm}^3$ laza térfogatú ($x < 3,15 \text{ mm}$) anyagot töltünk, és minden lépcsőben a kiszitált kész ($x < 100 \mu\text{m}$ –es) termék mennyiségét friss anyaggal pótoljuk. Az egyensúlyi helyzetben (amikor az utolsó három lépcsőben $G = \text{konst.}$) kapott őrleményt szitaelemezzük, és megállapítjuk a 80 %-os áthulláshoz tartozó szemcseméretét.



2. ábra: A körfolyamatos Bond őrlés folyamatábrája

2.3.4. További vizsgálatok

Számos kutató foglalkozott a korábban ismertetett őrlhetőségi vizsgálatok továbbfejlesztésével és egyszerűsítésével.

Berry és Bruce (1966) a munkaindex meghatározását egy ismeretlen és egy ismert Bond-munkaindexű anyag feladásának és termékének szemcseméret-eloszlásának összehasonlításával végezte el [10]. 2000 g minta nedves őrlését hasonló körülmények között végezték, meghatározott ideig. A munkaindexhez a következő összefüggést felhasználva jutottak:

$$W_{i, referencia} \left(\frac{10}{x_{80}} - \frac{10}{X_{80}} \right) = W_{i, ismeretlen. anyag} \left(\frac{10}{x_{80}} - \frac{10}{X_{80}} \right) \quad (13)$$

A módszer lehetővé teszi ismeretlen minta munkaindexének közelítő meghatározását a referencia minta hasonló mutatójának ismeretében. A szerzők kihangsúlyozzák, hogy a minta fizikai és reológiai tulajdonságaira nagy hangsúlyt kell fektetni a pontos őrlhetőség meghatározása érdekében. Például, ha az őrléseket különböző szilárdanyag koncentráció mellett hajtjuk végre, akkor várhatóan más termék szemcseméret eloszláshoz jutunk [11].

3. Anyagtulajdonságok

A kísérletek lefolytatásához öt mintaanyagot választottam. Ezek közül kettő vulkanikus eredetű, kettő üledékes, egy pedig mesterséges kőzet. Ennek oka, hogy különböző az ásványi összetételük, az őrlhetőségük, az sűrűségük, keménységük. A felhasznált minták a következők voltak: recski andezit, mexikó-völgyi mészkő, alsózsolcai homokos-kavics, uzsai bazalt és klinker.

Andezit általános jellemzői:

- kemény kiömlési vulkanikus kőzet, aminek SiO_2 tartalma kb 55-65%,
- főként plagioklász földpátból és kőzetalkotó ásványokból (amfibol, piroxén) áll,
- fekete, (sötét) szürke, barnás-szürke színű,
- felhasználási területek: útépitési zúzalék, vasúti ágyazat, alapozás, burkoló és falazó anyag,
- sűrűsége: 2200-2650 kg/m³,
- keménysége: 6-6,5 (Mohs féle keménységi skála szerint),
- ellenáll a fagynak és olvadásnak, a nyomásnak, mechanikai kopásnak.

Mészkő általános jellemzői:

- üledékes kőzet, aminek túlnyomó részét kalcit, aragonit (CaCO_3) ásvány, a fennmaradó részét pedig valamilyen szerves anyag vagy kvarc (SiO_2) alkotja,
- színe a nagy karbonát tartalom miatt fehér, de előfordul barnás, sárgás, vöröses színekben is, amit az Fe^{3+} beoldódás okoz,
- felhasználási területek: cementipar, építészeti kötőanyag, díszítő-, burkolókő, festékipar,
- sűrűsége: 2700 kg/m³,
- keménysége: 3 (Mohs féle keménységi skála szerint).

Homokos-kavics általános jellemzői:

- összetétele alapján tulajdonképpen kvarc (SiO_2), a földkéreg egyik leggyakoribb eleme, kőzetalkotó ásvány, általában kevés szennyező anyag fordul benne elő,
- színe: az egyik legszín gazdagabb ásvány,

- felhasználási területek: a tiszta kvarc felhasználása nagyon sokrétű (kvarcüveg előállítás, üveg- és kerámiaipar, díszítő- és ékkő), a homokos-kavicsot szintén számos helyen használják (útalapozás, feltöltés, ágyazó habarcs, vakolás, térburkolat, parkok díszítése, szivárgók építése, minőségi betonok, kertek felső rétege, táptalaj),
- sűrűsége: 2600-2700 kg/m³,
- keménysége: 7 (Mohs féle keménységi skála szerint).

Bazalt általános jellemzői:

- az egyik leggyakoribb kiömlési, vulkanikus kőzet, alacsony SiO₂ tartalmú, bázisos,
- színe: feketétől a szürkéig terjed,
- felhasználási területek: útburkolás, aszfaltburkolat, vasúti ágyazat, útszegély kő,
- sűrűsége: 2800-3000 kg/m³,
- keménysége: 7 (Mohs féle keménységi skála szerint).

Klinker általános jellemzői:

- mészke kalcinálásával és hozzáadásával keletkezett anyag a klinker,
- felhasználási terület: építőipar, a cementgyártás alapanyaga,
- sűrűsége: változó (kb. 3000 kg/m³),
- keménysége: változó.

4. A mérések menete

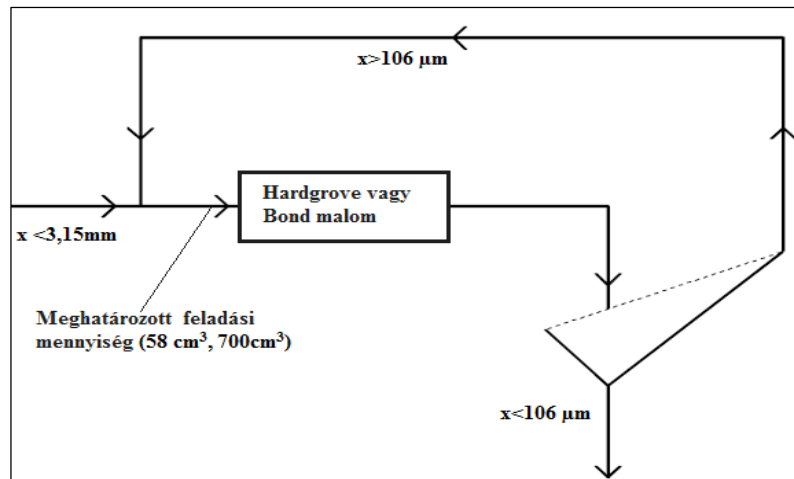
Először elvégeztem a vizsgálati anyagok (andezit, bazalt, mészkő, klinker, homokos-kavics) előkészítését. A minta mennyiségétől függően, elvégeztem a minta osztását Jones-féle mintakisebbítővel, az előtörésüket pedig pofás-, majd hengeres törővel hajtottam végre. A hengeres törő esetében 4 mm-es résmérettel dolgoztam, az őrleményből pedig a $> 3,15$ mm-es frakciót választottam le.

Ezután meghatároztam a minta szitafrakció szemcseméret eloszlását kézi ill. gépi szitálással. Minden szitálást egy kontrollszitálással ellenőriztem, majd a szitálás adataiból meghatároztam az eloszlásfüggvényt ($F(x)$), a feladáshoz tartozó 80 %-os szemcseméretet (X_{80}) Grapher grafikus program segítségével, továbbá a feladásban lévő $106\text{ }\mu\text{m}$ alatti szemcsék százalékos mennyiségét (m_0^*), amely adatok az őrlhetőségi vizsgálatok értékeléséhez szükségesek.

A minta előkészítést a halmazsűrűség (ρ_{halmaz}) meghatározásával folytattam egy ismert térfogatú henger segítségével. Mivel a két mérésnél eltérőek voltak a feladási térfogatok (Hardgrove: 58 cm^3 , Bond: 700 cm^3), ezért a feladás térfogatával megegyező hengerekben mértem a halmaz sűrűséget. A halmazsűrűség vizsgálatot minden mintán ötször végeztem el, amely eredmények átlagát vettem alapul.

A mérések megkezdése előtt meg kellett határoznom a méréshez szükséges, anyagmennyiség tömegét (m_f) a halmazsűrűség segítségével. A Hardgrove-mérés esetében 58 cm^3 , a Bond-mérés esetében pedig 700 cm^3 mintát kellett kimérnem. A körfolyamatos mérés során, minden egyes lépcsőnél ezt a meghatározott mennyiséget adtam fel a berendezésekre.

A minta előkészítés és a berendezések beállítása után elkezdtem a laboratóriumi méréseket. Minden őrlési lépcső után a mintaanyagot $106\text{ }\mu\text{m}$ alá szitáltam Retsch szitagéppel majd meghatároztam a G értéket, a következő lépcső fordulatszámát és őrlési idejét vagy jelmennyiségét. A körfolyamatos méréseket addig folytattam, amíg a G őrlhetőségi koefficiens 3 egymást követő lépcsőben konstanssá vált. A körfolyamatos méréseket a csapágymalom esetében háromszor, a golyósmalom esetében pedig egyszer végeztem el mintánként. Ez után a vizsgálati anyagokat Horiba lézeres szemcseméret elemzővel vizsgáltam, a 80%-os (x_{80}) áthulláshoz tartó szemcsenagyságok és az őrlhetőségi index meghatározása céljából.



3. ábra: A körfolyamatos őrlés folyamatábrája

A mérési adatokat táblázatokban, diagramokban dolgoztam fel. A kiértékelések során pedig összefüggéseket kerestem a mérésből származó adatok között, amiket a továbbiakban prezentálok.



4. ábra: Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet Bond- és Hardgrove-malma

4.1. A Hardgrove őrlhetőségi index meghatározásának menete

A kísérlet során meghatároztam a vizsgálati anyagok őrlhetőségi indexét (HGI). Minden mintán 3 mérést végeztem. A vizsgálathoz 600-1180 μm -os osztályozott frakciót használtam, melyet a 60 fordulatig csapágymalomban őrltem, majd az örleményt 75 μm -es szitán végeztem szitáltam 20 percig Retsch szitagéppel. Az eredményekből meghatároztam a Hardgrove-indexet (HGI), majd ebből számítással a Bond munkaindexet (8).

4.2. Bond munkaindexek meghatározása

A vizsgálat során a malmot 700 cm^3 anyaggal töltöttem meg. Minden őrlési lépcső előtt meghatároztam a malomfordulatok számát (N) és az őrlési időt (t). A malomfordulatok számát a következő képlettel számoltam ki:

$$N_i = \frac{0,286 * m_f - A_{i-1} * m_0^*}{G_{i-1}} \quad (14)$$

Ahol $a(z)$:

- N_i – az i -edik őrlési lépcsőhöz tartozó malomfordulatok száma,
- m_f – feladott anyagmennyiség [g],
- A_{i-1} – $106 \mu\text{m}$ alatti szemcsék mennyisége a legutolsó lépcső feladásában [g],
- m_0^* – $106 \mu\text{m}$ alatti szemcsék százalékos mennyisége a feladásban [-],
- G_{i-1} – egy fordulat alatt képződő friss, $106 \mu\text{m}$ alatti anyagmennyiség [g/fordulat].

Az őrlési időt a golyósmalom esetében az adott lépcső malomfordulat számából számítottam a (14) képlet alapján:

$$t = \frac{N - 24}{1,1666} \quad (15)$$

Ahol $a(z)$:

- t – őrlési idő [s]
- N – malomfordulatok száma.

Az időt stoppperral mértem. A malom fordulatszámát 70 ford./min -ra egy frekvencia váltóval állítottam be. A vizsgálat kezdetekor a kiindulási érték mindig $N=100$ és $t=65\text{s}$ volt.

A vizsgálatot addig folytattam, amíg három egymást követő lépcsőben 2 tizedes pontossáig megegyező G (g/fordulat) értéket nem kapta. Az utolsó lépcső örleményéből mintát vettem és lézeres szemcseméret elemzővel meghatároztam a 80%-os áthulláshoz tartozó szemcseméretét. Ezután kiszámítottam a Bond munkaindexet. A klinker őrlését a Hardgrove-malomnál használt vizsgálati anyagból az én méréseim előtt Rácz Ádám tudományos segédmunkatárs már elvégezte, így az Ő engedélyével adatait felhasználtam kutatási munkámhoz.

A vizsgálatok megkezdése előtt meghatároztam a két méréshez a halmazsűrűséget a feladások térfogat igényeihez (700 cm^3).

Minta neve	Bond-mérés
	$\rho_{\text{halmaz}} (\text{g/cm}^3)$
Andezit	1,600
Bazalt	1,528
Homokos-kavics	1,625
Mészkeő	1,485
Klinker	1,493

1. táblázat: A vizsgálati anyagok halmazsűrűsége

4.3. Körfolyamatos Hardgrove mérések menete

A vizsgálat során 58 cm^3 anyagot adtam fel a malomra, mivel a $600\text{-}1180 \text{ }\mu\text{m}$ közötti szénfrakció Hardgrove-index méréséhez szükséges 50 grammjának térfogata átlagosan ennyi volt.

Az őrlmények szétválasztását $106 \text{ }\mu\text{m}$ -nél végeztem Retsch szitagéppel. A feladott anyag maximális szemcsemérete $3,15 \text{ mm}$ volt. A vizsgálatokhoz 5 különböző anyagot (andezit, mészkeő, homokos-kavics, klinker, bazalt) használtam.

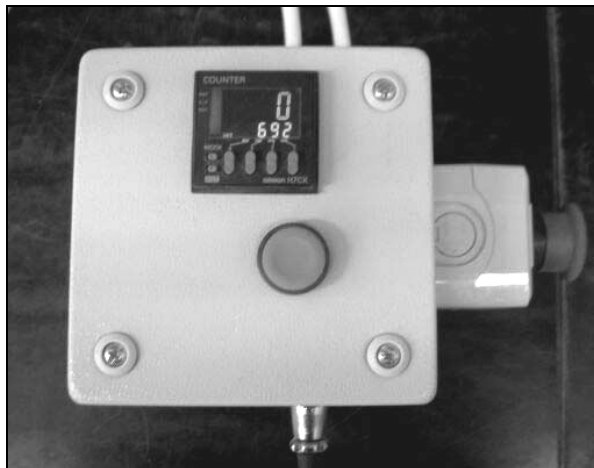
A Hardgrove vizsgálat esetében is a Bond vizsgálatnál alkalmazott képletet használtam az őrléshez szükséges fordulatok meghatározására, mivel a Bond modell (2. ábra) szerinti anyag visszajáratást feltételeztem (2,5/1). Itt azonban az őrlési idő valójában egy meghatározott számú jel volt, ami a fordulatok számából adódott. Egy jelfogadó berendezés számolta a fordulatokat. Egy fordulat alatt a vevő egység 12 jelet mért ($N = 12 \text{ jel}$), azaz:

$$Jm = (N * 12) - 28 \quad (16)$$

Ahol a(z):

- Jm – jelmennyiség
- N – malomfordulatok száma.

A képletben szereplő „-28 egy korrekciós tényező mivel, a beállított jelszám elérése után ennyi jellel fordul tovább a malom. Azonban ekkor is őrlődik még a vizsgálati anyag és így az őrlési fordulatok száma nem haladta meg az előre kiszámított értéket.



5. ábra: Mérés indító, jelszámláló az oldalán vészmegállítóval

Egy-egy vizsgálati sorozatot addig végeztem, amíg a G érték 3 egymást követő lépcsőben konstans érték nem lett. Minden vizsgálati sorozat utolsó három lépcsőjének őrleményét lézeres szemcseméret elemzővel megvizsgáltam, majd az adatokból kiszámoltam a Bond munkaindexet és a fajlagos energiaigényeket. A körfolyamatos Hardgrove vizsgálati anyagokon háromszor végeztem el a pontos és helytálló eredmények biztosítása végett.

Minta neve	Hardgrove-mérés
	$\rho_{\text{halmaz}} (\text{g/cm}^3)$
Andezit	1,609
Bazalt	1,450
Homokos-kavics	1,719
Mészkő	1,569
Klinker	1,460

2. táblázat: A vizsgálati anyagok halmazsűrűsége

5. A mérési eredmények

5.1. Hardgrove őrlhetőségi vizsgálat eredményei

A 4.1.-es pontban ismertetett módon elvégeztem a kísérleteket a vizsgálati anyagokon és meghatároztam a Hardgrove őrlhetőségi indexet és a Bond munkaindexet. A vizsgálati eredmények az eltéréseink nagysága egy esetben sem haladja meg az előírt maximális 3%-ot az egyes vizsgálati anyagok vizsgálatánál. A mérési eredményeket átlagoltam és a következő táblázat foglalja magában:

Minta neve:	HGI (°H)	W_{IB} (HGI- ből) [kWh/t]
Andezit	45,18	20,57
Mészkö	87,57	11,96
Homokos- kavics	45,24	20,54
Klinker	63,19	15,62
Bazalt	48,713	19,34

3. táblázat: A Hardgrove-index és az abból számított Bond munkaindex átlag értékei

Az őrlhetőségi indexet (HGI) és a Bond munkaindexet (W_{IB}) a már 2.3.1. fejezetben említett képletekkel (7),(8) határoztam meg.

Az eredményekből jól látható hogy a mészkő őrlhető a legjobban és az energia szükséglete is jóval alacsonyabb, egyes esetekben közelítőleg 50%, a többi mintához viszonyítva. A nehezen őrlhető ásványok kőzetek átlagos HGI-e 40-50 HGI, ez alapján az andezit, bazalt és homokos-kavics nehezen őrlhetőnek mondható. A két tartomány között található a klinker, amit közepesen őrlhető anyagnak jelenthetünk ki.

5.2. Bond mérés eredményei

A mérések végén, miután meghatároztam a termék 80%-os szemcseméretét kiszámoltam a Bond munkaindexet a következő képlettel:

$$W_{B106} = \frac{4,9}{x_{\max}^{0,23} G_e^{0,82} \left(\frac{1}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X_{80}}} \right)} \quad (17)$$

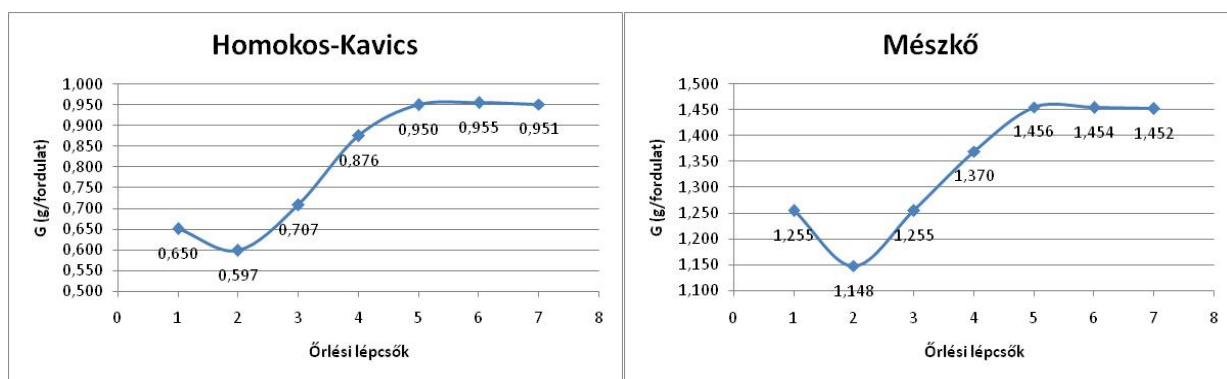
Minta neve:	X_{80} (μm)	x_{80} (μm)	WiB (kWh/t)	G (g/ford.)
Andezit	2165	70	19,73	0,84
Mészkö	2440	69	12,39	1,45
Homokos-kavics	1790	85,33	20,589	0,95
Klinker	2453	89	17,05	1,21
Bazalt	2530	57,03	21,08	0,65

4. táblázat: A Bond mérések vizsgálati ményei

Az eredmények a homokos-kavics kivételével összevágának a Hardgrove mérési sorozatokban kapott munkaindexszel.

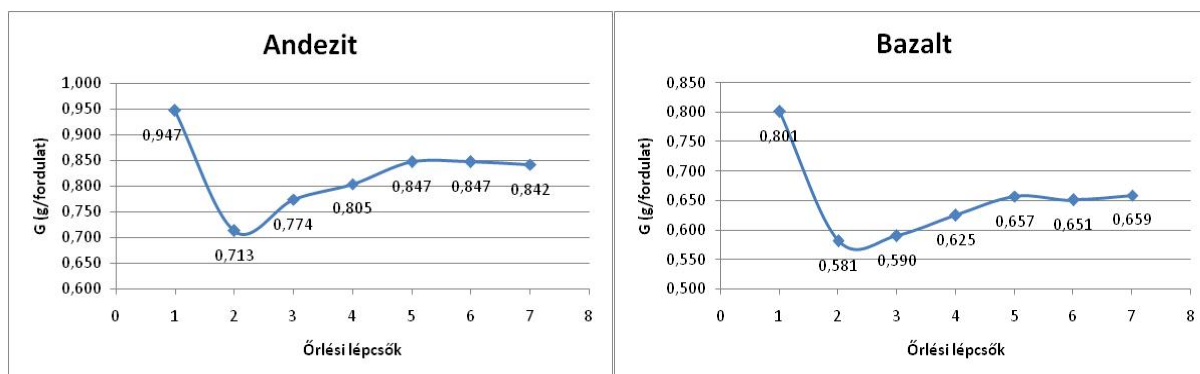
A mérések során két üledékes (homokos-kavics, mészkő), két vulkanikus (andezit, bazalt) és egy mesterséges (klinker) vizsgálati anyagot használtam a kísérletek elvégzéséhez. A mérések végére a G konstans értékeket vett fel. Ezeket az értékeket az őrlési lépcsőkkel párosítva összevetettem és a következő ábrákon megfigyelhető módon ábrázoltam.

A homokos-kavics és a mészkő, mint üledékes kőzetek egymáshoz képest hasonló változásokat mutatnak a G értékek tekintetében. A kezdeti értéket egy kb 10%-os esés követ, majd a G érték nagyjából lineárisan nőni kezd addig a pontig, amíg a G érték konstanssá nem válik. Mivel a mészkő a homokos-kavicsnál könnyebben őrlhető anyag így az egy fordulat alatt keletkező friss anyagmennyisége is nagyobb (6. ábra).



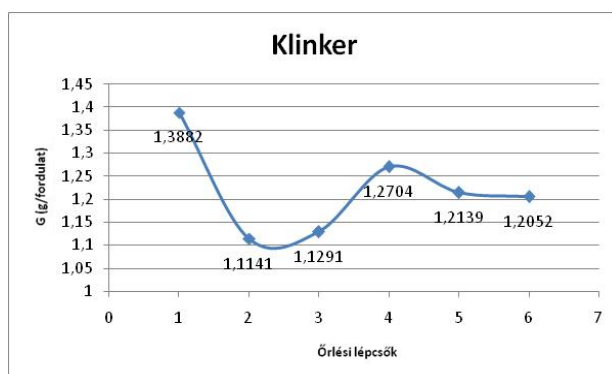
6. ábra: Homokos-kavics, mészke - Bond mérés

Az andezit és bazalt esetében, mint kiömlési vulkanikus, kemény kőzetek, tekintetében is hasonló az egymáshoz képesti lefutása a görbének. Magas értékről indulnak, ami ezt követően azonnal lecsökken a következő lépcsőben. Ezt követően a friss 106 μm alatti anyagképződés, az üledékes kőzetektől eltérően, lassan, fokozatosan emelkedik majd egy adott értéken stagnál és konstanssá válik (7.ábra).



7. ábra: Andezit, bazalt - Bond mérés

A klinker, mint ásványi adalék és mészke őrlemény kalcinálásából keletkező mesterséges anyag, a vulkanikus kőzetekhez hasonlóan egy magasabb értékről indul, majd azonnal lecsökken a második lépcsőben. Ezután az őrlhetőségi koeficiens fokozatosan konstanssá kezd válni (8. ábra).



8. ábra: Klinker - Bond mérés

5.3. A körfolyamatos Hardgrove mérések eredményei

A mérések során egy erőmérőcella, egy mérőkártya és egy számítógépes mérőprogram segítségével, minden őrlés után feljegyeztem az erőmérő által mért munkát és ebből számított WB fajlagos munkát $[Ws]$, amit átváltottam kWh/t -ba. Az így kapott energia szükséglet a mért energiaszükséglet (W_B). Ez után határoztam meg a Bond munkaindexet a feladás és a termék 80%-os szemcsenagyságából, a következő képlet alapján.:

$$W_{iB} = \frac{W_B}{\left(\frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{x_{80}}}\right)} \quad (18)$$

A mérési sorozatok összesített mérési eredményei az alábbi összefoglaló táblázatban tekinthetők meg:

Andezit:

	X_{80} (μm)	Őrlési lépcső	x_{80} (μm)	WiB (kWh/t)	G (g/fordulat)
1. sorozat	2165	6	81	17,668	0,096
		7	73,5	17,705	0,095
		8	74,5	17,335	0,096
		Átlag:	76,333	17,57	0,096
2. sorozat	2165	4	71,4	16,334	0,098
		5	71,2	16,424	0,097
		6	73,7	16,532	0,097
		Átlag:	72,1	16,43	0,097
3. sorozat	2165	6	78,8	17,989	0,097
		7	71,5	17,268	0,095
		8	76,3	17,781	0,095
		Átlag:	75,533	17,679	0,096

5. táblázat: Andezit körfolyamatos Hardgrove őrlésének eredményei

Az eredmények jól mutatják, hogy az energiaszükségletek mind a három esetben közel azonosak, az eltérés a két szélsőérték között kevesebb, mint 10%. Az őrlhetőségi koeficiens indexszámon, amely az egy kör alatt képződött 106 μm alatti anyagmennyiséget jelzi, jól megfigyelhető hogy az egyensúlyi tényező konstanssá válása mind három mérési sorozat esetében közel azonos. A három mérés átlag Bond-munkaindex 17,26 kWh/t, a őrlhetőségi koeficiens átlaga pedig 0,096 g/fordulat volt.

Mészke:

	X_{80} (μm)	Örlési lépcső	x_{80} (μm)	WiB (kWh/t)	G (g/fordulat)
1. sorozat	2275	6	74,4	13,929	0,151
		7	64,7	12,481	0,151
		8	59,1	11,608	0,152
		Átlag:	66,067	12,673	0,151
2. sorozat	2275	7	63,4	12,722	0,147
		8	62,2	12,795	0,144
		9	65,9	13,146	0,146
		Átlag:	63,833	12,888	0,146
3. sorozat	2275	4	52,2	12,252	0,14
		5	56,1	12,561	0,139
		6	58	12,632	0,139
		Átlag:	55,433	12,481	0,139

6. táblázat: Mészke körfolyamatos Hardgrove örlésének eredményei

A mészke esetében, az energia igények szempontjából kedvező értékeket kapunk. Habár a G értékek csekély mértékben mérésenként eltérnek így is megfigyelhető hogy ennek a sorozatnak az energiaigény átlagai csupán csak 0,5 kWh/t eltérést mutatnak egymástól. A Hardgrove örlhetőségi index meghatározásából számított munkaindex közel azonos (2. táblázat). A három mérés átlag Bond-munkaindex 12,68 kWh/t, a örlhetőségi koefficiens átlaga pedig 0,145 g/fordulat volt.

Homokos-kavics:

	X_{80} (μm)	Örlési lépcső	x_{80} (μm)	WiB (kWh/t)	G (g/fordulat)
1. sorozat	1706	10	74,4	32,586	0,048
		11	64,7	32,189	0,046
		12	59,1	31,081	0,046
		Átlag:	66,067	31,952	0,47
2. sorozat	1706	8	75,5	34,389	0,049
		9	70,1	33,151	0,048
		10	72,8	33,748	0,048
		Átlag:	72,8	33,763	0,48
3. sorozat	1706	6	75,1	31,789	0,051
		7	73,7	32,3	0,050
		8	77,5	33,809	0,050
		Átlag:	75,433	32,633	0,050

7. táblázat: Homokos-kavics körfolyamatos Hardgrove örlésének eredményei

A homokos-kavics mind három mérési sorozata egybevágó, jó értékeket ad egymáshoz viszonyítva. A munkaindexek kis eltérést mutatnak egymástól és a G értékek differenciája is minimális a sorozatok között. Viszont ha megfigyeljük, magát a Bond-munkaindex értékeket azt tapasztaljuk, hogy ennek az anyagnak az őrléséhez a vártnál sokkal nagyobb energiaszükséglete van és nagyban meghaladja a HGI-ből meghatározott energiaszükségletet. A háromszor elvégzett mérés a hiba valószínűségét nagyban kizárja. Ennek a problémának a vizsgálatára a későbbiekben még ki fogok térni. A három mérés átlag Bond-indexe 32,78 kWh/t, a őrlhetőségi koeficiens átlaga pedig 0,048 g/fordulat volt.

Klinker:

	X₈₀ (μm)	Őrlési lépcső	x₈₀ (μm)	WiB (kWh/t)	G (g/fordulat)
1. sorozat	2460	12	80,57	-	0,093
		13	81,07	-	0,092
		14	80,64	-	0,089
		Átlag:	80,76	-	0,091
2. sorozat	2460	7	81,19	-	0,089
		8	77,52	-	0,087
		9	77,77	-	0,088
		Átlag:	78,827	-	0,088
3. sorozat	2460	7	81,37	-	0,096
		8	81,17	-	0,095
		9	86,5	-	0,096
		Átlag:	83,01	-	0,096

8. táblázat: Klinker körfolyamatos Hardgrove őrlésének eredményei

A mérési sorozat megkezdése előtt a nyomatékmerő cella meghibásodott. Javítását sajnos nem tudtuk megoldani a dolgozat beadásáig (jelenleg folyamatban van). A mérési körfolyamatok végére a vizsgálati anyag közel azonos G értékekre állt be. Az őrlések végén a lézeres szemcseméret elemzővel mért szemcsenagyságok nagyon jól egybevágnak. A Bond munkaindex meghatározását egy későbbiekben leírt módon valósítottam meg. A három mérés őrlhetőségi koeficiens átlaga 0,092 g/fordulat volt.

Bazalt:

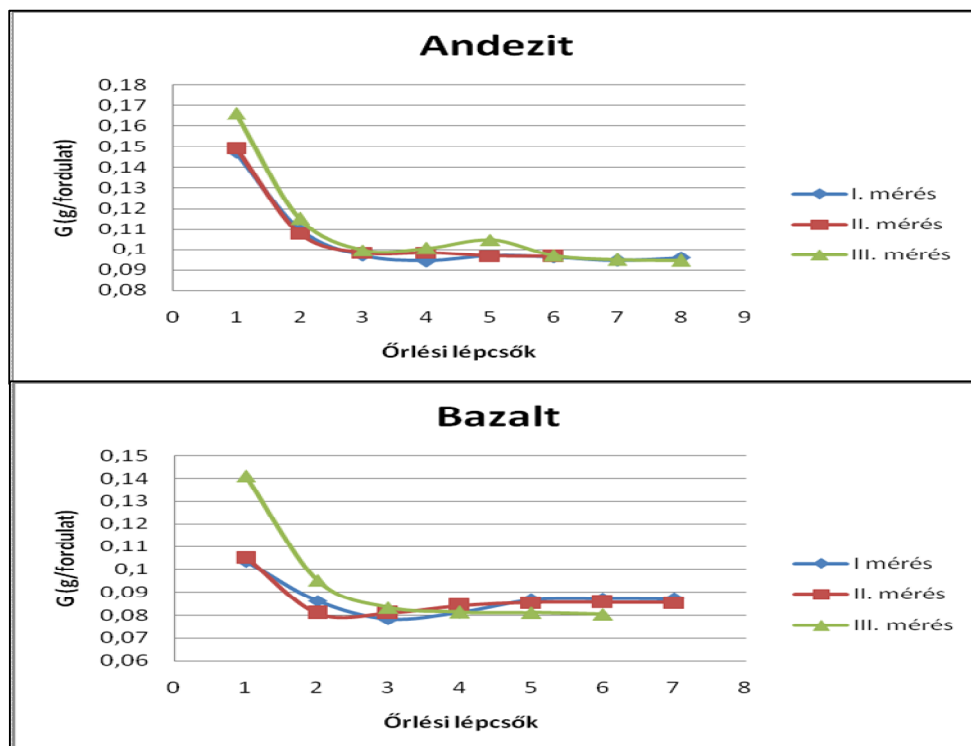
	X_{80} (μm)	Örlési lépcső	x_{80} (μm)	WiB (kWh/t)	G (g/fordulat)
1. sorozat	2530	5	68,84	-	0,087
		6	67,76	-	0,087
		7	67,64	-	0,087
		Átlag:	68,08	-	0,087
2. sorozat	2530	5	70,86	-	0,086
		6	66,98	-	0,086
		7	68,29	-	0,086
		Átlag:	68,71	-	0,086
3. sorozat	2530	4	63,19	-	0,081
		5	72,02	-	0,081
		6	70,01	-	0,081
		Átlag:	68,41	-	0,081

9. táblázat: Bazalt körfolyamatos Hardgrove őrlésének eredményei

A mérésekből eredő G értékek a mérési sorozatok végére, sorozatonként közel megegyeznek. Az őrlési minták lézeres elemzéseiből származó x_{80} értékek átlagai is azonos értéket adtak. A három mérés őrlhetőségi koeficiens átlaga pedig 0,085 g/fordulat volt.

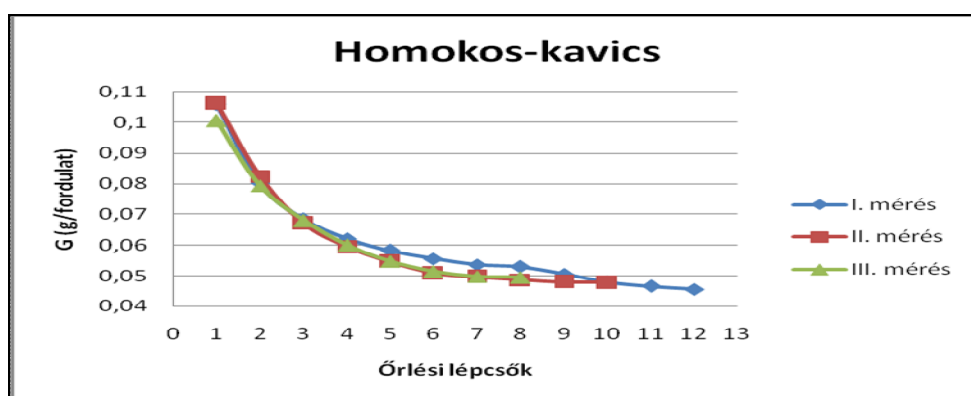
A körfolyamatos Hardgrove őrlésnél hasonló jelenséget tapasztalhatunk, mint a Bond vizsgálatnál, azonban itt minden esetben az őrlhetőségi koeficiens először relatíve magas értékről indult, majd az őrlés előrehaladásával egyre kisebb, egymástól kis differenciálban eltérő értékeket adott addig, amíg konstanssá nem vált.

Az andezit és a bazalt közel azonos lefutást és G értéket hozott a mérések során. A kezdeti értékek csökkennek, majd fokozatosan ellaposodnak és az őrlési lépcsők számának növekedésével vízszintessé válnak mind a két esetben. A mérést háromszor végeztem el és a diagramok alapján a mérések ebből a szempontból egybevágnak.



9. ábra: Andezit, bazalt - Körfolyamatos Hardgrove mérések

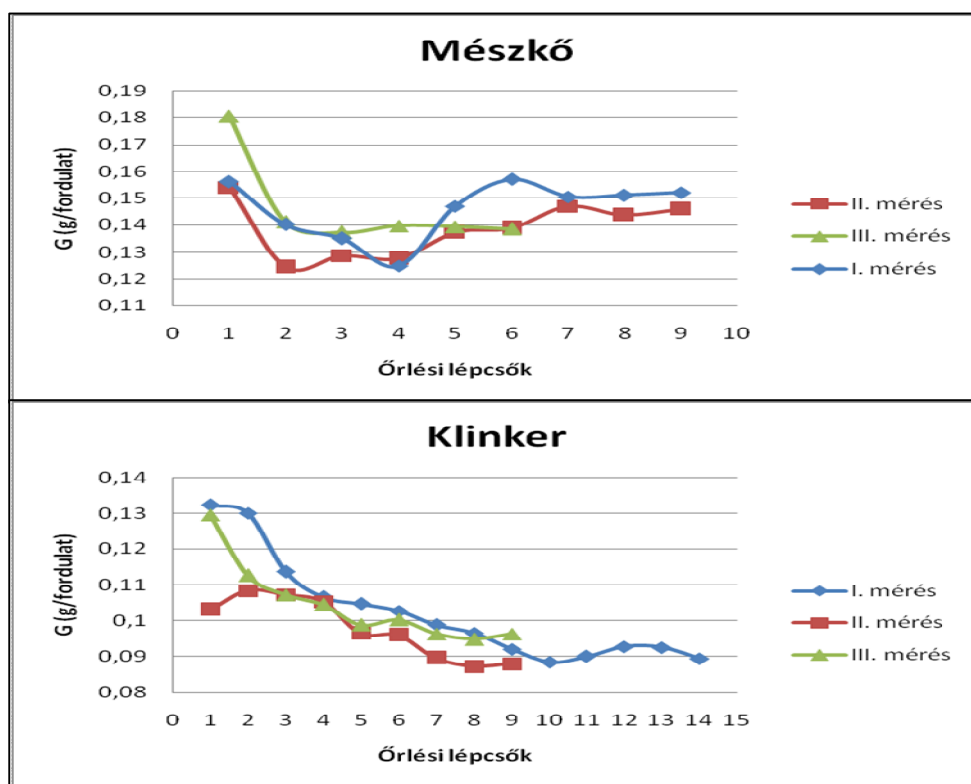
A homokos-kavics, a három mérés során közel azonos értékeket adott, a diagramon jól megfigyelhető hogy ez az anyag viselkedett a legszabályosabban ebből a szempontból. A G érték mind három esetben folyamatosan csökken, közel a kiindulási érték felére, és a végére mindegyik mérésnél konstanssá válik. A megismételt mérések egymástól való eltérése, a frissen képződött 106 μm alatti anyagmennyiség tekintetében, nem haladta meg a 0,005 g/fordulat eltérést.



10. ábra: Homokos-kavics - Körfolyamatos Hardgrove mérések

A mészkő és a klinker szabálytalan, ingadozó értékeket adott, amíg a G érték közel konstanssá nem vált. A megismételt mérések egymáshoz képest is eltérnek. A szabálytalan, fluktuáló „viselkedés” ellenére az őrlhetőségi koefficiensek anyagonként megegyeznek a

megismételt vizsgálatok végére és az így tapasztalat eltérés nem nagyobb 0,01 g/fordulatnál. A mészkő esetében az őrlemény szemcséi gyakran összetapadtak és eltömítették a szitalapot.



11. ábra: Mészkő, klinker - Körfolyamatos Hardgrove mérések

5.4. Összefüggések megállapítása

A vizsgálati anyagok előkészítése és őrlése során számtalan adathoz jutottam. Ezek alapján többféle összefüggést állt módunkban keresni a Hardgrove-indexből számított Bond munkaindexek, körfolyamatos Hardgrove mérésből számított munkaindexek, ill. a Bond mérésből számított munkaindexek közötti összefüggések megalkotásához.

	Átlag G (g/fordulat)		Bond-G/ Hardgrove-G
	Hardgove	Bond	
Andezit	0,096	0,842	8,77
Mészke	0,145	1,459	10,06
Homokos-kavics	0,048	0,951	19,81
Klinker	0,091	1,21	13,30
Bazalt	0,085	0,65	7,65

10. táblázat: A G értékek egymáshoz való viszonya a két körfolyamatos kísérletnél

A fenti táblázatban a körfolyamatos Hardgrove és a Bond mérések egy fordulat alatt keletkező 106 µm alatti anyagmennyiségeit vettem össze. Ehhez a Bond koefficiensét elosztottuk a körfolyamatos Hardgrove mérések átlag értékével. Az eredmények nagyon eltérőek ezért a feladás mennyiségének tekintetében is összevetettük az adatokat.

	Körfolyamat típusa	Feladás		Halmaz sűrűség (g/cm ³)	Feladási tömegek közötti arány
		V (cm ³)	m (g)		
Andezit	Bond	700	1126,3	1,609	12,064
	Hardgrove	58	93,36	1,610	
Mészke	Bond	700	1039,61	1,485	11,451
	Hardgrove	58	90,79	1,565	
Homokos-kavics	Bond	700	1137,46	1,625	11,407
	Hardgrove	58	99,72	1,719	
Klinker	Bond	700	1044,81	1,493	12,338
	Hardgrove	58	84,68	1,460	
Bazalt	Bond	700	1069,56	1,528	12,718
	Hardgrove	58	84,1	1,450	

11. táblázat: Feladási tömegek közötti eltérés

A táblázat utolsó (Feladási tömegek közötti arány) oszlopa jelzi az 58 cm^3 és a 700 cm^3 anyag tömeg közötti viszonyt. Ha a táblázat eredményeivel összevetjük, az eltérés 10 %-on belüli. Az eltérést magyarázza, hogy a feladások halmazsűrűsége a Bondhoz 700 cm^3 -es mérőhengerben, a Hardgrove-hoz pedig $55,91 \text{ cm}^3$ mérőhengerben lett kimérve. A két mérőhengerben a szemcsék különbözőképp rendeződnek el, így más lesz a halmaz sűrűségük is.

Ezeket az arány (Feladási tömegek közötti arány) számokat felhasználva, összevetési célból összesoroztuk a körfolyamatos Hardgrove mérési sorozatok végén, a legideálisabbnak G értékek átlagával. Így egy olyan G értéket kaptunk amiből, a már elvégzett körfolyamatos Hardgrove és Bond mérések X80, x80 eredményeit felhasználva Bond munkaindexeket számítottunk.

	Hardgrove –G (g/fordulat)	Feladási tömegek közötti eltérés	G *Feladási tömegek közötti eltérés [g/fordulat]	Számított Bond-WiB [kWh/t]	
				HG, x80	Bond, x80
Andezit	0,097	12,064	1,170	15,31	15,03
Mészkö	0,146	11,451	1,672	10,56	10,98
Homokos-kavics	0,048	11,407	0,548	29,52	32,36
Klinker	0,091	12,338	1,123	16,73	17,76
Bazalt	0,086	12,718	1,094	15,36	13,84

12. táblázat: Számítás útján kapott energiaszükséglet

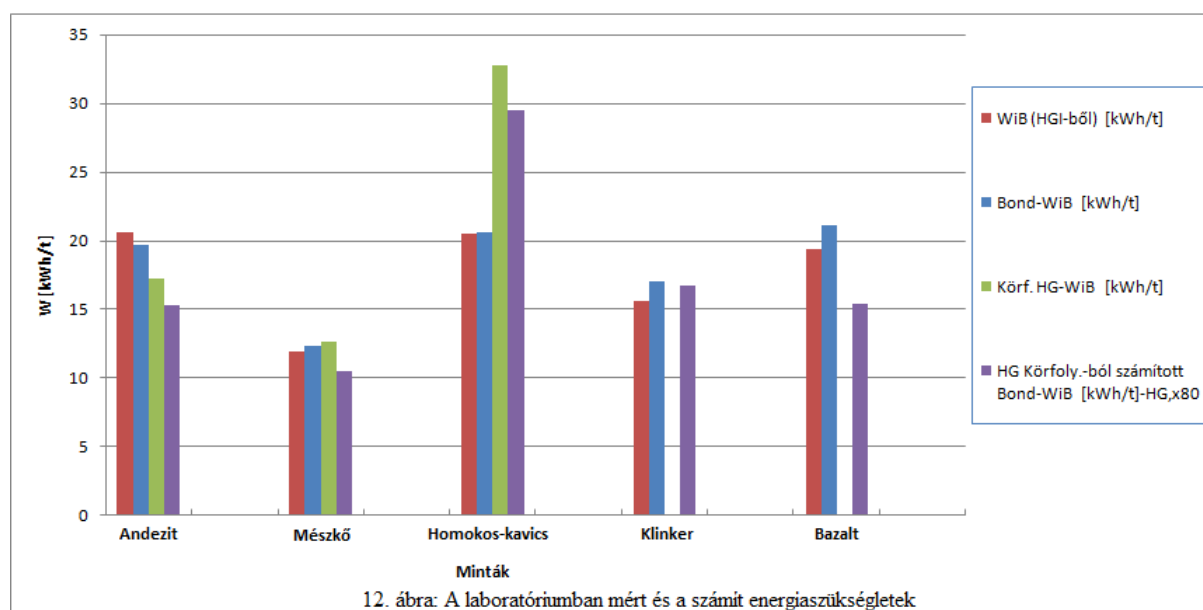
A számítás alapján kapott munkaindexeket a körfolyamatos Hardgrove és Bond őrlések mintáinak x80 értékéből származtattam az 5.2. fejezetben használt Bond képlet (17) alapján. Az eredmények hasonlítanak a valós mérésekből származó eredményekhez. A homokos-kavics így számított értéke viszont konvergál a körfolyamatos Hardgrove mérések által adott kiugróan magas energiaszükséglet eredményeihez. Amíg a Hardgrove indexből származtatott munkaindex és a Bond mérésből adódó munkaindex jól egybevágh, addig a fent említett valós,

ill. számított értékek is jól párhuzamot vonnak egymással ugyan azzal az anyaggal végzett kísérletek alapján.

6. Bond munkaindexek közötti összefüggések vizsgálata

A mérések során számos eredmény és érték keletkezett, amelyek között kutattam az összefüggéseket. Ennek érdekében az öt vizsgálati anyaghoz tartozó vizsgáltam.

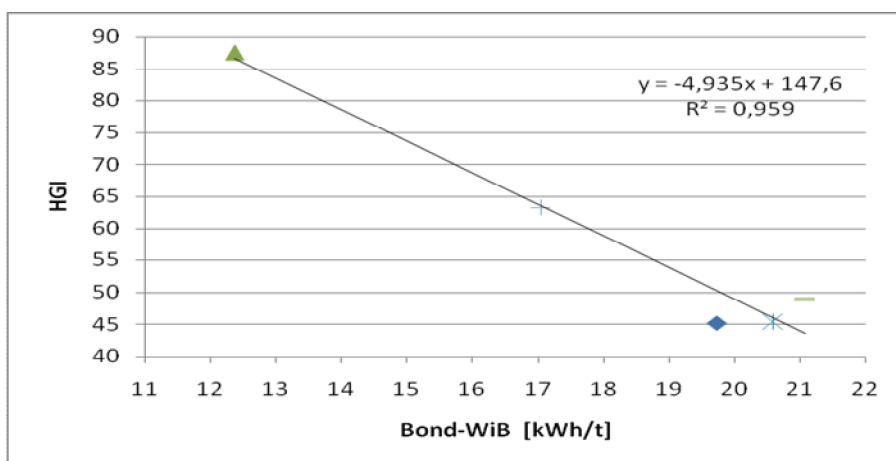
Mivel az egyik legfontosabb szempont az őrlés során felhasznált energia, ezért a laboratóriumban különböző módon mért és a számított Bond-munkaindexeket összevettem egymással (12. ábra). A diagramon jól megfigyelhető hogy a mérések között jelentős az eltérés, vizsgálati anyagonként megfigyelve. Minden esetben a Hardgrove számból származtatott és a Bond mérésből adódó energiaszükséglet közel azonos. A körfolyamatos Hardgrove mérések eredményeit csak az első három mintán vizsgálhatjuk. Itt megfigyelhető, hogy ezek az adatok eltérnek az előbb említett energiaigényektől és az eltérések között sem vonható párhuzam.



A korrelációval a mért és számított adatok összefüggésének nagyságát és irányát vizsgáltam. Ha a korreláció értéke az 1 felé közelít, akkor az adatok függnek egymástól tehát korrelálnak. Megbízható értéket csak evidens esetben kaptunk, ami a mérés helyességét támasztotta alá. A diagramokban minden anyagnak más-más színt és jelölést adtam (andezit (◆), mésző (▲),

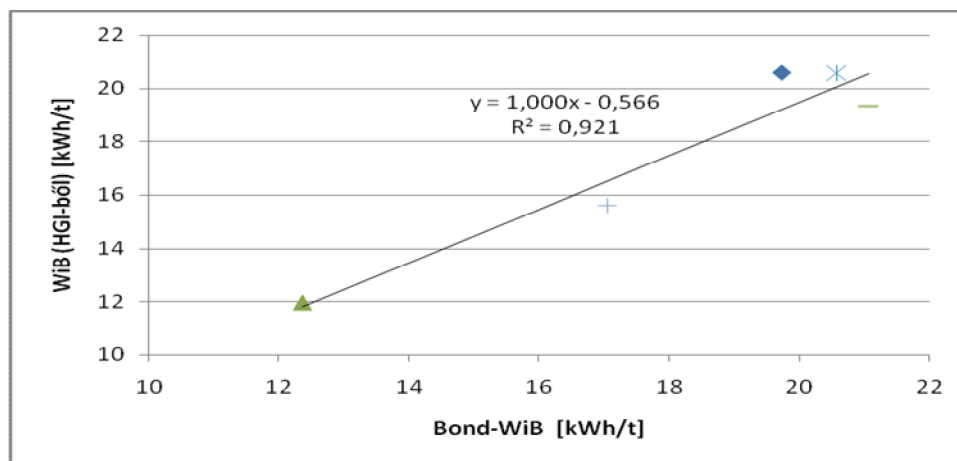
homokos-kavics (*), klinker (+), bazalt (—)) és a tengelyeken feltüntetett módon vettem össze őket.

Elsőként a Hardgrove-index eredményeit vetem össze a Bond mérések munkaindexének eredményeivel. A 13. ábrán jól megfigyelhető, hogy az ezekre az értékekre illesztett egyenes korrelációs együtthatója egyhez közelít, az őrlhetőségi mérőszámok egyezőséget mutatnak. Minimális eltérést a két vulkáni kőzet mutat, a másik három vizsgálati anyag értékei szinte egy egyenesen vannak.



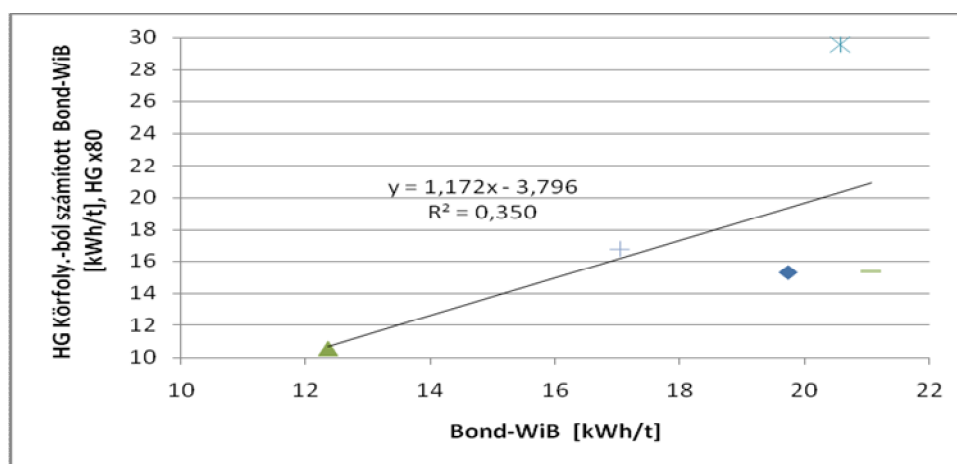
13. ábra: Hardgrove-index és Bond energiaszükséglet korrelációja

Ezt az egyezőséget követve összevettem a hagyományos Bond munkaindexet a Hardgrove őrlhetőségi indexből számított Bond munkaindexszel és a 14. ábrán ábrázoltam. Az előbb említett evidensnek tekinthető egyezés megfigyelhető. A korrelációs együttható négyzete az egyhez konvergál, tehát a számított és mért Bond index egymással való lineáris kapcsolatot feltételez, az $1-R^2$ pedig, akár a 13. ábra esetében, véletlen hibának feltételezhető.



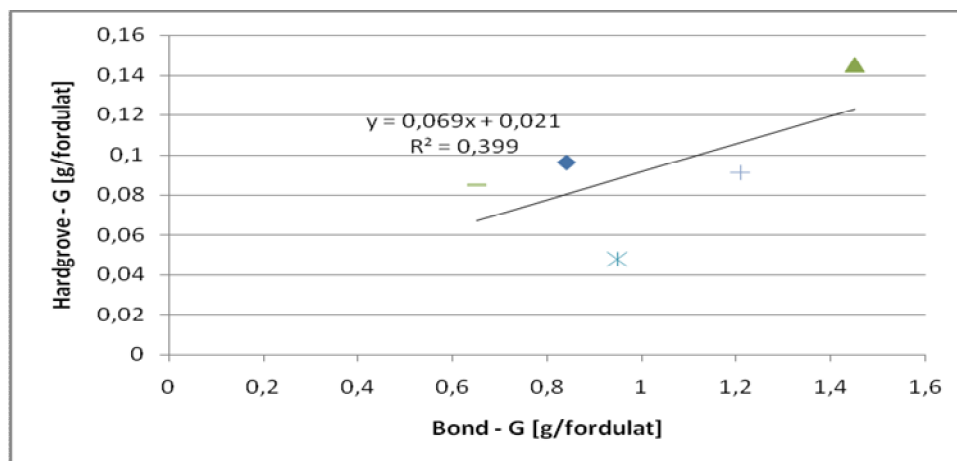
14. ábra: Hardgroveból számított és mért Bond energiaszükséglet korrelációja

A 15. ábrán a 12. táblázat, számított HGI alapú Bond képlet segítségével nyert Bond-munkaindex értékeit, az eltérő x80 alapján, vetettem össze a Bond mérések eredményeivel. Az összehasonlítás eredménye rossznak nevezhető, ez az adatok lineáris kapcsolatát így nem feltételezi, az R^2 a nullához konvergál. Mind a két esetben megfigyelhető a homokos-kavics nagy eltérése a korrelációs vonaltól, azonban nem ez okozza az egyezőtleniséget, mivel enélkül az adat nélkül is megvizsgáltam az eredmények közötti kapcsolatot, tehát valóban az adatok össze nem illeszthetősége a probléma.



15. diagram: Számított és mért Bond energiaszükséglet

. A 16. ábrán a körfolyamatos Hardgrove és a Bond őrlések őrlhetőségi koefficienseit korreláltattam egymással. Az adatok között van kapcsolat, ahogy ezt a 10. táblázatnál bemutattam, ezzel ellenben viszont ez a diagramon az adatok nem illeszthetők egy egyenesre, ezért az R^2 nem közelíti meg az egyet, azaz a 100%-ot.



16. ábra: Őrlhetőségi koefficiensek összehasonlítása

A kutató munka során, az általam bemutatott és alkalmazott módszerekkel megállapítható hogy a Bond mérések nem illeszthetők a körfolyamatos Hardgrove mérésekre a bemutatott eltérések alapján. Ezzel szemben a 12. ábra alapján megfigyelhető hogy a számított Bond munkaindexek, a homokos-kavics és klinker kivételével, 15-30%-kal alulmarad a Hardgrove indexből számított munkaindexektől. Ez az összefüggés fent áll a gyűrűsmalmok esetében is, ahol az őrlhetőségi munkaindexből kiinduló méretezés után, az üzemeltetés során mért munkaindexek 10-20%-kal kevesebbek a számítottnál. A körfolyamatos Hardgrove őrlés tehát lehetőséget adhat a gyűrűsmalmok méretezéséhez szükséges adatok pontosításához.

Fenti mérési eredmények összhangban vannak a korábban tapasztalt üzemi és HGI alapú Bond index közötti eltéréssel, amely eltérést Árvay Gábor is kimutatta a 2008-ban készült „Az OMYA felnémeti gyárában feldolgozott mészkő őrlhetőségének vizsgálata” című szakdolgozatában.

7. Összefoglalás

Feladatom a körfolyamatos Hardgrove malmi kísérleti módszer fejlesztése és szisztematikus ellenőrzése öt vizsgálati anyag felhasználva. A vizsgálatok során egylépcsős Hardgrove, körfolyamatos Hardgrove és Bond kísérletek folytattam le. A mérések során nyert eredmények korrelációját végeztem el.

Megmértem az anyagok őrlhetőségét a Hardgrove módszerrel. Meghatároztam a Hardgrove őrlhetőségi indexet és Bond munkaindexet majd összevettem az eredményeket. A mérési adatokból kiderült, hogy a mészkő a legkönnyebben őrlhető anyag ($87,57^{\circ}\text{H}$) a minták közül. Ezt követte közepesen őrlhetőként a klinker ($63,19^{\circ}\text{H}$), a további három minta pedig a nehezen őrlhető anyagok ($^{\circ}\text{H} < 50$) kategóriájába sorolható a Hardgrove index és az abból számított Bond munkaindex alapján.

Bond mérési kísérleteket végeztem a mintákon. A mérési adatokból kiszámoltam az Bond munkaindexet, majd az adatokat táblázatba foglaltam és jellemeztem őket. Az energiaszükséglet közel azonos volt a Hardgrove-indexből meghatározott eredményekkel.

Körfolyamatos Hargrove őrlési kísérletet végeztem minden mintán háromszor megismételve. Az eredményeket táblázatokba foglaltam és jellemeztem őket az energiaszükségletből számított Bond munkaindex és az őrlhetőségi koefficiens szempontjából. Az mérés során minden minta közel azonos eredményeket adott egymáshoz képest. Az egyik minta (homokos-kavics) azonban kiugróan magas munkaszükségletet mutatott ($32,78 \text{ kWh/t}$) a mérések során a Bond- és az egylépcsős Hardgrove méréshez képest az őrlhetőségi koefficiens alacsony értékéhez ($0,048 \text{ g/fordulat}$) képest.

Az őrlhetőségi koefficiens vizsgálatát is elvégeztem a Bond- és körfolyamatos Hardgrove mérések eredményeiből kapott adatok alapján. Ezeket diagramokban ábrázoltam és jellemeztem őket. A körfolyamatos Hardgrove őrlésnél azonos trend mutatkozott végig az őrlések között, amíg ez a közetek eredeténél (vulkanikus, üledékes) volt tapasztalható a Bond őrlés során.

Összefüggéseket kerestem az elvégzett őrlési kísérletek között. Ezeket az összefüggéseket táblázatokba foglaltam. Az őrlhetőségi koefficiens vizsgálatával kezdtem, majd a feladási

tömegek közötti különbségeket vizsgálta és egy módosított G értékeket alkottam, amiből energiaszükségleteket számoltam (12. táblázat). Az eredmények alacsonyabbak vagy közel azonosak voltak a Bond mérésekből származó eredményekkel.

A kutató munka végén a Bond munkaindexek közötti kapcsolatot kezdtem el vizsgálni. Összevettem a mért és számított munkaindexeket, majd megfigyeltem az adatok közötti egyeztetetőséget vagy lineáris kapcsolatot. Nyilván való esetekben az összehasonlításból származó korrelációs négyzet szám megbízható értéket adott (13.;14.;15. ábra), ennek ellenére a többi vizsgálat során nem adódott összefüggés.

A körfolyamatos Hardgrove őrlés tehát lehetőséget adhat a gyűrűsmalmok méretezéséhez szükséges adatok pontosításához.

8. Szakirodalom

- [1] Dr. Buzáné Kis Piroska: Folyamatos őrlési folyamatok számítógéppel segített numerikus vizsgálata
- [2] PETHŐ Sz.: Aprítás és osztályozás. Tankönyvkiadó, Budapest, 1988 p. 17-27
- [3] NÁRAY-SZABÓ J.: Kristálykémia. Akadémiai Kiadó, Budapest 1965.
- [4] TARJÁN GUSZTÁV: Ásványelőkészítés II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1969. pp. 313-348.
- [5] BEKE B.: A finomörlés folyamata. Budapest, 1975 pp. 65-82.
- [6] Beke Béla: Anyagok őrlhetősége és az őrlhetőség mérőszáma. Építőanyag, XXVI. Évfolyam, 1974. 12. szám
- [7] Pethő Szilveszter – Csőke Barnabás: Hazai közetek Bond-munkaindexének meghatározása. Építőanyag, XXXV. Évfolyam, 1983. 11. szám
- [8] Austin, L.G. - Klimpel, R.R. - Luckie, P.T.: Process Engineering of Size Reduction. Ball Milling American Institute of Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York, 1984.
- [9] Mular, A.L. - Jergensen, G.V.: Design and Installation of Comminution Circuits Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York, 1982.
- [10] 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
- [11] Mucsi Gábor (Doktori értekezés) - Vizsgálati eljárások fejlesztése finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségének, valamint különleges körülmények mellett történő őrlés energiaszükségletének meghatározására
- [12] Gömze A. László Az aprítási elmélet néhány aktuális kérdése – képlékeny viszkoelasztikus anyagok aprítása görgőjáraton

9. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni Mucsi Gábornak és Rácz Ádámnak a szakmai koordinálását és segítségét a laboratóriumi mérések szervezésében és segítésében, továbbá az adatok szakszerű kiértékelésében.

Köszönetet szeretnék nyilvánítani a Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetnek, amiért lehetőséget biztosítottak számomra a mérések elvégzéséhez.

A tanulmány a TÁMOP-4.2.2.A-11/1KONV-2012-0005 jelű projekt részeként, a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Fenntartható Természeti Erőforrás Gazdálkodás Kiválósági Központ tevékenységének részeként az Új Széchenyi Terv keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.