

# Az őrlési folyamat energia-optimalizálása üzemi körülmények között

NAGY Lajos • OMYA Hungária Kft. • lajos.nagy@omya.com

Érkezett: 2010.05.14. • Received: 14.05.2010. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2010.16>

## Energy optimization of the grinding process in operating conditions

The efficiency of grinding is most determined by the speed of grinding, which depends on the particle size of the material, grindability as determined by the cohesion forces and the micro structure of the particles, the surface characteristics (tendency to adhesion) and moisture content of the resulting fine particles, as well as the type of stress subjected to the particles in the grinding machine (impact, abrasion...) and the stress intensity depending on the design and technological features of the grinding machine (specific rate of energy input). At the Felnémet limestone processing plant of OMYA Kft. grinding is performed using grinding mills featuring built-in wind sifters; additionally, hot air is supplied to the mill for drying. Therefore, electricity and natural gas, respectively, are used for grinding the limestone and keeping the moisture content of the end-product within the specified limits. Consequently, the total energy needed for grinding is determined by grinding and drying in correlation. The measurement model for the consumption of energy entering the grinding-grading-drying technological process is established based on a large number of experiments. Based on the design of the model and the evaluation of the measurements, a feed-forward control system can be established, which – making use of the major parameter data of the process – allows the automatic control of the volume of natural gas usage required for drying.

## 1. Bevezetés

A fejlett társadalomnak egyre több nélkülözhetetlen ásványi nyersanyagot kell kitermelnie a földkéregből. A kitermelés, mely bányászati módszerekkel történik, csak az első lépés abban a folyamatban, amely során a nyersanyagokból a létfenntartáshoz szükséges tárgyak, eszközök készülnek.

A nyersanyagok feldolgozása során feltűnően nagy az aprítási és őrlési előkészítést igénylő nyersanyagok aránya, amihez komoly mennyiségű energiára van szükségünk. Az aprítás az ásványfeldolgozás legenergiaigényesebb művelete. A fejlett országokban a teljes felhasznált energiának 3–5%-át aprításra fordítják. Az energiaigényesség különösen igaz az őrlésre, a finomőrlésre. Ezért igen fontos, hogy az őrlést hatékonyan valósítsuk meg. A felhasznált energia csökkentése nem csupán gazdasági kérdés, hanem nagyon komoly szerepe van a természeti környezetünk állapotának megóvásában is.

Az őrlés hatékonyságát legerőteljesebben az őrlési sebesség határozza meg, amely az anyag szemcseméretének, a kohéziós erők és szemcsék mikroszerkezete által meghatározott őrlhetőségének, a képződő finom szemcsék felületi tulajdonságainak (adhézióra hajlamának), nedvességtartalmának éppúgy függvénye, mint az őrlőgépben megvalósuló igénybevételi módnak (ütés, dörzsölés...), az őrlőgép kialakításától és technológiai jellemzőktől függő igénybevételi intenzitásnak (bevitt energia fajlagos mértékének).

Az felnémeti mészkefeldolgozó őrlési-osztályozási rendszere egybeépített görgős malomból és légosztályozóból, valamint szárító levegőt előállító egységből áll. Tehát villamos és földgázenergia segítségével történik a mészke őrlése, ill. a késztermék nedvességtartalmának adott határértéken belüli tartása.

Dr. NAGY Lajos

bányamérnöki oklevelét 1975-ben szerezte a Miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen. 1975 és 1985 között a Borsodi Szénbányák Farkaslyuki Aknaüzemében dolgozott, mint üzemmérnök, majd körletvezető, később főmérnök. 1985-től 1990-ig az Egerecehi Bányauzem üzemvezető főmérnöke volt. 1990-től az Országos Érc-és Ásványbányák Felnémeti Bányauzeméhez került, ahol a tulajdonosváltás után az OMYA Eger Kft. ügyvezető igazgatója lett. Irányításával készült el a világszínvonalú technológiájú új felnémeti bánya és mészkeőrlő üzem beruházása. Az új technológia megépítése, és üzembe helyezése óta foglalkozik az őrlés, osztályozás szárítás energia felhasználásának optimalizálásával, illetve egy általánosan használható modell felállításával.

Az őrlés összes energia-szükségletét az őrlés és szárítás kölcsönös összefüggésben határozza meg:

- egyrészt a nedvességtartalomnak az őrlhetőség vonatkozásában van optimális értéke (a nedvesség őrlést gátló és őrlést elősegítő anyagként egyaránt hathat);
- másrészt az őrlésre fordított energia nagy része hővé alakul, amely részt vesz a szárításban;
- harmadrészt a hőmérséklet nemcsak szárítja a szemcséket, hanem a szemcsék őrlhetőségét is kisebb-nagyobb mértékben befolyásolhatja (gondoljunk a hó hatására kitágult mikroszerkezetre, és ebből következően a diszlokációk könnyebb vándorlására, hibahelyek keletkezésére [1]).

Az üzemeltetés során korábban elvégzett kísérletek is megerősítették, hogy az őrlés-osztályozás energiaigénye, költségei az üzemparaméterek alkalmas megválasztásával jelentősen csökkenthetők.

**A jelen tanulmányba foglalt kutatómunka célja** az energia-optimalis üzemviszonyok meghatározása, valamint az őrlőrendszer energia-optimalis viszonyok közötti működését szolgáló üzemszabályozási módszerének elméleti és kísérleti vizsgálatokkal történő kidolgozása.

E vizsgálatokhoz szorosan kapcsolódó területeket több kutató vizsgálta. *Smekal* [2] az aprítás eredményeinek a felületi energiát tekintette, és ezzel vezette le az aprítás hatásfokát. *Beke* [3] foglalkozott *Smekal* állításának bírálatával, s megállapította, hogy az őrlés hatásfokát egy tört adja meg, melynek számlálója a hasznosított, nevezője pedig az összes bevezetett energia. A nem hasznosított energia hővé alakul. *Bown* [4] szintén foglalkozott a lassú őrlési folyamatra jellemző energia mérleg felállításával. *Sekula* [5–7] és munkatársai módszert dolgoztak ki a diszperz rendszer, valamint az őrlési folyamat energia eloszlásá-

nak kvantitatív meghatározására. Mindemellett megállapítható, hogy a jelen munka célkitűzésével és tartalmával az általam át tanulmányozott szakirodalom közvetlenül nem foglalkozik.

## 2. Az elvégzett kísérleti vizsgálatok

A szisztematikus üzemi kísérletek keretében az alábbi vizsgálatokra került sor:

- az őrlési tér hőmérséklet növelésének hatása az őrölhetőségre, földgáz felhasználás csökkentésének lehetőségei (adott terhelés és őrlési finomság mellett);
- a malomtérből távozó gáz hőmérsékletének hatása a porleválasztó működésére: földgáz felhasználás csökkentésének korlátai;
- a malomterhelés és fajlagos energiafelhasználás kapcsolata (adott őrlési finomság mellett);
- az őrlés-szárítás energiamérlegének kimérése ill. meghatározása, a szárításra fordított villamos energia mennyiségének megállapítása;
- szabályozási modell és stratégia kidolgozása.

A szisztematikus üzemi kísérleti vizsgálatok eredményei alapján az őrlés-osztályozás-szárítás technológiai egységbe bevitt energia felhasználásának mérési modellje került kidolgozásra. A modell kialakítása, és a mérések kiértékelése alapján meghatározható volt egy előrecsatolás irányítási rendszer, amely a folyamat legfontosabb paramétereinek ismeretében lehetővé teszi a szárításhoz feltétlenül szükséges földgázenergia nagyságának megállapítását és szabályozását.

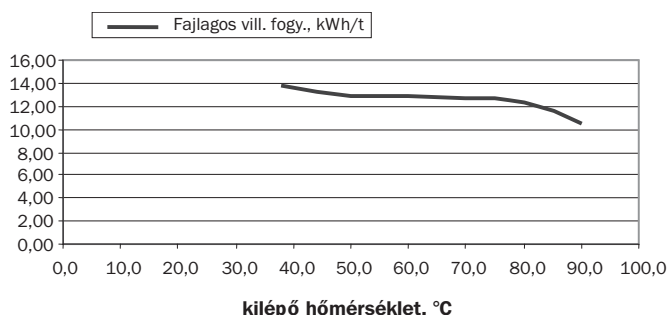
## 3. A mérési eredmények kiértékelése

### 3.1. Az őrlési tér hőmérséklete és a fajlagos energiafelhasználás

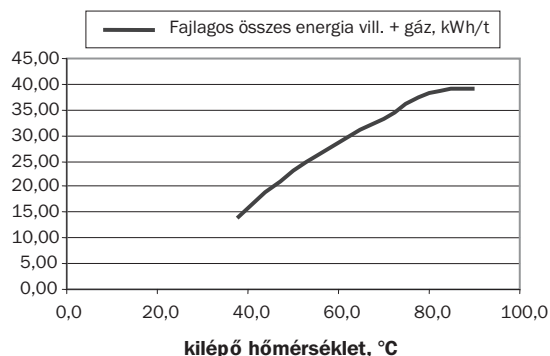
Ebben az üzemi mérési sorozatban a feldolgozott anyagáram állandó értéken tartása mellett az őrlési tér hőmérsékletét változtattuk. Az őrlési tér hőmérsékletének növekedését a malomból kilépő gáz (levegő) hőmérsékletének mérésével jellemeztem. Mértük továbbá a malommotor hatásának villamos teljesítmény-felvételét, valamint a felhasznált gáz mennyiségét. Mindezekből a fajlagos energiafelhasználások (őrlési, gázfűtési és a kettő összege) számíthatók (1. táblázat, 1. és 2. ábra).

$\Delta t$	Q	T	P	V
Időszak	Malom terhelés	Kilépő gáz hőmérséklete	Malom hajtómotor villamos teljesítmény felvétele	Gázfogyasztás
h	t/h	°C	kW	m <sup>3</sup> /h
2	50	37,8	687	0
2	50	50,0	644	56
2	50	60,0	642	84
2	50	70,0	630	112
2	50	80,0	614	139
2	50	90,0	528	153

1. táblázat Az őrlési tér hőmérséklete és az energiafelhasználás  
Table 1. Temperature of the grinding chamber and energy consumption



1. ábra Fajlagos villamos energia fogyasztás őrleskor, változó malomtér hőmérséklet mellett  
Fig. 1. Specific power consumption during grinding vs. milling chamber temperature



2. ábra Fajlagos összes energiafelhasználás  
Fig. 2. Specific total energy consumption

Megállapítható:

- a növekvő gázfelhasználás nem jár együtt fajlagos őrlési energia csökkenéssel (1. ábra): az 50–80 °C-os kilépő levegő hőmérséklet tartományban a  $W_f$  fajlagos energia alig változik (alig csökken), a csökkenés mértéke nem fedezi a gázfelhasználásból származó energia felhasználás jelentős növekedését;
- a fajlagos őrlési villamos energia stagnálása ill. csökkenése ellenére ugyanis az összes fajlagos energia, a földgáz felhasználás miatt, drasztikusan növekszik;
- a gázenergia használata (fenti mértékben) az őrlés szempontjából felesleges, indokolatlan, szerepe csak a szárításban van.

### 3.2. A gázfelhasználás csökkentésének határai

A gázfelhasználás nem csökkenthető korlátlanul. A porszűrő működését ugyanis a szűrőbe belépő gáz hőmérséklete alapvető módon befolyásolja. Ez a mérési sorozat a porszűrő megfelelő működését biztosító malomból kilépő gáz hőmérséklet magállapítását szolgálta (2. táblázat és 3. ábra). Ez a határérték tehát ahhoz szükséges, hogy a por-levegő elegyet szétválasztó porszűrőben a porbetapadás következtében fellépő nyomáskülönbség-növekedés a gyártó által megadott határértéknél kisebb legyen, s ne veszélyeztesse a technológia zavartalan működését.

Megfigyelhető, hogy 35 °C-os hőmérsékletnél éri el a nyomáskülönbség a maximumát, ami esetünkben 12,0 mbar, és ez az érték a gyártó által előírt 20 mbar érték alatt marad.

Dátum / idő	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Malomra feladott anyagáram, t/h	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0
Porszűrő nyomás, 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	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0

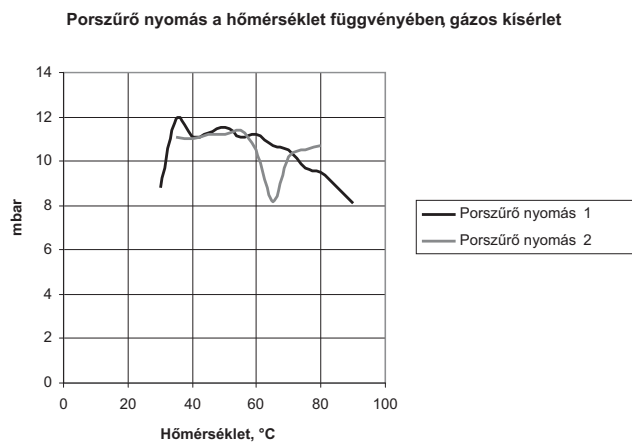
Dátum / idő	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Feladás	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0
Porszűrő nyomás, mbar	11,1	11,0	11,2	11,2	11,4	10,5	8,2	10,2	10,5	10,7
Közbenső nyomás, mbar	40,5	39,6	38,5	37,8	35,1	41,7	49,0	35,0	41,1	47,0
Hőmérséklet, °C	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0

2. táblázat Porszűrő nyomás változás a gázhőmérséklet függvényében  
Table 2. Change in dust filter pressure vs. gas temperature

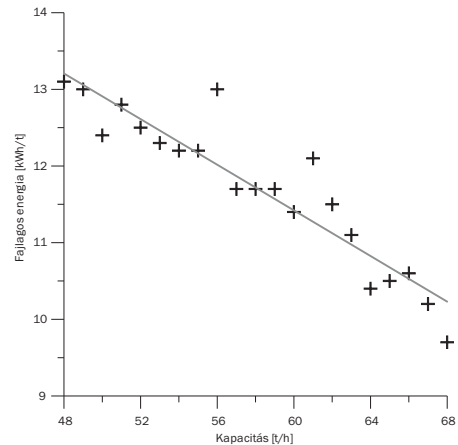
Malom-feladás tömegárama	[t/h]	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
Fajlagos villamos energia felhasználás	[kWh/t]	13,1	13,0	12,4	12,8	12,5	12,3	12,2	12,2	13,0	11,7	11,7

Malom-feladás tömegárama	[t/h]	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68
Fajlagos villamos energia felhasználás	[kWh/t]	11,7	11,4	12,1	11,5	11,1	10,4	10,5	10,6	10,2	9,7

3. táblázat Fajlagos villamos energiafelhasználás a malomterhelés függvényében  
Table 3. Specific electric power consumption vs. mill load (capacity)



3. ábra Porszűrő nyomás  
Fig. 3. Dust filter pressure



4. ábra Fajlagos villamos energiafelhasználás a malomfeladás tömegárama (kapacitás) függvényében  
Fig. 4. Specific electric power consumption vs. mass flow of feed (capacity)

### 3.3. Malom-terhelés és a fajlagos energiafelhasználás

Ismert, hogy a körfolyamatos malmokra feladott anyagáram növelése egy határig a fajlagos őrlési energia csökkenésével jár, hiszen az őrlési tér kihasználását vonja maga után (majd az optimális terhelést követően az őrlésre visszajáró dara-anyagáram lavinaszerű növekedése mellett a malom telítődik, majd lefulad). A jelen gyűrűsmalomra ez az összefüggés nem ismert, pedig ismerete a malom üzemének energia-optimalis szabályozásához elengedhetetlen. A 3. táblázat és a 4. ábra az ez irányú üzemi mérés eredményeit foglalja össze (az őrlési finomság állandó értéke mellett).

A 4. ábra szerinti függvény:

$$y = -0,149x + 20,35.$$

Őrlhetőségi vizsgálatokkal megállapítottuk, hogy a kis nedvességtartalmú, tiszta mészkő őrlhetőségét a hőmérséklet nem befolyásolja [8].

### 3.4. Üzemi mérések a szárításra fordított villamos energia mennyiségének megállapítására

Kísérletek adataiból megállapítható a bevitt villamos energiából a szárításra rendelkezésre álló energia:

$$Q_{\text{szár}} = Q_{\text{lev}} + k \cdot Q_{\text{vill.energ.}}$$

$k$  – az energia modellből meghatározott tényező, amely azt mutatja meg, hogy a bevitt villamos energia hány százaléka fordítódik szárításra.

A mért paraméterek alapján az alábbi összefüggések segítségével, matematikailag meghatározható az az energia mennyiség, amely megmutatja, hogy a pillanatnyi mérési adatok alapján mennyi energiára van szükség ahhoz, hogy a késztermék nedvesség tartalma a kívánt érték alatt maradjon. 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
2. <u>Az áthúzó légárammal bevitt energia:</u>	<u>522,53 kWh</u>
A rendszerbe bevitt összes energia:	1 207,48 kWh
1. Szilárd anyag hőtartalma	583,86 kWh
2. A kilépő levegő hőtartalma	364,50 kWh

A bevitt villamos energia megoszlása a mérési eredmények alapján.

1. Az őrlési és szárítási folyamat szempontjából veszteségként jelentkező tételek:	
a. Hajtómű veszteség	21,74 kWh
b. Hajtómű palást hő veszteség	2,42 kWh
c. <u>Malom palást hő veszteség</u>	<u>74,99 kWh</u>
Veszteségek összesen:	99,15 kWh
2. Őrlésre fordított energia:	159,97 kWh
3. Szárításra fordított energia:	425,83 kWh

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

A fenti adatokból

$$k = [583,86 - (522,53 - 364,50)] / 684,95 = 425,83 / 684,95 = 0,622$$

azaz most felírható:

$$Q_{szár} = Q_{lev} + 0,622 Q_{vill.energ}$$

k – az energia modellből meghatározott tényező, amely azt mutatja meg, hogy a bevitt villamos energia hányad része fordítódik szárításra.

### 3.5. A szabályozás stratégiája

A fentiekben felvázolt matematikai modellhez tartozóan az őrlési folyamatban a következő paraméterek mérése, adatainak 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 folyamatos mérése.
3. Az áthúzó légáram belépő és kilépő hőmérsékletének, valamint mennyiségének folyamatos mérése.
4. A malom motor energia felvételének folyamatos mérése.
5. A feladott anyag, ill. késztermék tömegének a mérése.

A fenti adatokból a szárításhoz szükséges energia:

$$Q_{aszp} = Q_1 (\text{feladott anyag hőváltozása}) + Q_2 (\text{párologtatás feladott anyag})$$

ahol  $Q_{aszp}$  – a pillanatnyi anyagparaméterek alapján meghatározott szárítási energiaszükséglet

$$Q_1 = c_a m_a \Delta t$$

$$Q_2 = c_v m_v \Delta t + \varphi_v m$$

$$Q_3 = c_1 m_1 \Delta t$$

$$Q_{szük} = c_a m_a \Delta t_a + c_v m_v \Delta t_v + \varphi_v m_v$$

$c_a$  – a feladott anyag fajhője (KJ/kg°C)

$m_a$  – a feladott anyag tömege (kg)

$\Delta t_a$  – a belépő és kilépő anyag hőmérséklet különbsége (°C)

$c_v$  – a víz fajhője (KJ/kg°C)

$m_v$  – a feladott anyagban és a késztermékben lévő víz mennyisége különbsége (kg)

$\Delta t_v$  – a belépő anyagban lévő víz és a kilépő anyagban lévő víz hőmérséklet különbsége (kg)

$\varphi_v$  – a víz fajlagos párolgási hője a malomtér hőmérsékletén (KJ/kg)

1) Abban az esetben ha

$$Q_{aszp} \geq Q_{szár}$$

akkor a rendszerbe plusz energiát kell bevinni.

A plusz energia beviteli módja az áthúzó légáram belépési hőmérsékletének földgáz elégetésével történő növelése, amely a malomtérben áthaladva elősegíti a késztermék kívánt nedvesség tartalmának a biztosítását. A külső energiatöbblet nagyság:

$$Q_{külső} = Q_{aszp} - Q_{szár}$$

2) Amennyiben

$$Q_{aszp} \leq Q_{szár}$$

akkor nem szükséges a szárításhoz külső energiaként földgázt használni, sőt a rendszerben

$$\Delta Q = Q_{szár} - Q_{aszp}$$

energiafelesleg van, amit például a malomfeladás anyagáramának  $m_t$  értékkel való növelésével köthetünk le:

$$m_t = \frac{\Delta Q}{W_{t,B}}$$

## 4. Összefoglalás

A felnémeti mészkefeldolgozó üzemben az őrlés szétosztályozóval egybeépített görgős malmokkal történik. A malomban a szárításhoz meleg levegőt vezetnek. Tehát villamos és földgázenergia segítségével történik a mészke szárító őrlése, a késztermék nedvességtartalmának előírt határértéken belüli tartása.

A mérések igazolták, hogy az őrlés összes energia-szükségletét tehát az őrlés és a szárítás kölcsönös összefüggésben határozza meg, a mindenkori energiamérleg elkészíthető. Nagyszámú kísérlet eredménye alapján kerül kidolgozásra az őrlés-osztályozás-szárítás technológiai egységbe bevitt energia felhasználásának mérési modellje, valamint energia-optimalis modell és szabályozási stratégia.

Az üzemben a folyamat-jellemzők mérésével, optimalis modell és szabályozási stratégia alapján egy előreccsatolós irányítási rendszer vezethető be, amely a folyamat legfontosabb paramétereinek ismeretében automatikusan szabályozza a szárításhoz feltétlenül szükséges földgázenergia felhasználásának a nagyságát.

### Felhasznált irodalom

- [1] Tarján, G.: *Ásványelőkészítés II.*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1969
- [2] Smekal, A.: *Zeitschr. VDI*. 81. 1321 (1937).
- [3] Beke B.: *Építőanyag* 25, 47 (1973).
- [4] Bown, R.W.: *Bull. Trans. Instn. Min. Metall. Sc. C.*, London 75. 715, 173 (1966).
- [5] Sekula, F. – Krupa, V. – Mervea, M. – Hocmanova, I.: *Bilanz der energetischen Transformation beim Drehbohren* (Vortrag) Kosice 1973.
- [6] Merva, M. – Krupa, V.: *VI. Symposium für Mechanoemission und Mechanochemie*. Berlin. Kurzfereate Nr. 33. (1977).
- [7] Tkačova, K. – Sekula, F. – Krupa, V. – Bejda, I. – Kavečanska, V.: *VI. Symp. Für Mechanoemission und Mechanochemie*, Berlin, Kurzfereate Nr. 32. (1977).
- [8] Árvai G.: *Diplomamunka* (2008)

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2010.16>

Nagy, L.: *Az őrlési folyamat energia-optimalizálása üzemi körülmények között*. Építőanyag, 62. évf. 3. szám (2010), 79–82. o.