



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KAR
NYERSANYAGELŐKÉSZÍTÉSI ÉS KÖRNYEZETI
ELJÁRÁSTECHNIKAI INTÉZET



MÉSZKŐ ULTRAFINOM ŐRLÉSE KEVERŐMALOMBAN

TDK dolgozat

Készítette:

Molnár Zoltán

Másodéves MSc Előkészítés-technikai mérnök hallgató

Konzulensek:

Prof. Dr. habil. Csőke Barnabás egyetemi tanár

Dr. Mucsi Gábor egyetemi adjunktus

MISKOLC, 2011

Tartalom

1. Bevezetés	3
2. Szakirodalmi áttekintés.....	4
Keverőmalmai nanoőrlés tapasztalatai	4
3. A mintaanyag tulajdonságai	7
4. A berendezések bemutatása	8
4.1. Netzsch Mini Series (Mini Cer).....	8
4.2. Horiba LA-950 V2 típusú lézeres szemcse nagyság-elemző	9
5. A mérés leírása.....	9
5.1 A mérés végrehajtásának módja	9
5.2 Kísérleti vizsgálatok.....	14
6. Kísérleti eredmények és kiértékelésük	19
6.1. Őrlési finomság változása az őrlési idő függvényében	19
6.2. Fajlagos energiák változása az őrlések során	28
7. Konklúziók.....	38
8. Összefoglalás.....	39
9. Köszönetnyilvánítás	40
10. Szakirodalmi jegyzék.....	40

1. Bevezetés

A modern technika fejlődésével a tudományos kutatások egyre inkább a mikro, sőt nano méretekben megvalósuló anyagátalakítási folyamatok vizsgálatára irányulnak, mivel minél kisebb méreteknél avatkozunk be a gyártásba annál inkább az általunk elvárt tulajdonságú lesz a végtermék. A cél tehát az ipari hatékonyság növelése, ami magában hordozza a nagyobb nyereség reményét. A hagyományos nyersanyagelőkészítés alapját az aprítás/örlés adja, hiszen ennek segítségével tudjuk kezelhető méretűvé és hasznosíthatóvá tenni a kibányászott nyersanyagot. Azonban a szemcseméret csökkentése energiát vesz igénybe, ami először egyenesen arányos az aprítás mértékével, majd egy bizonyos határ szemcsemérettől exponenciálisan növekszik, így az egyre finomabb szemek előállítási energiaigénye is mindinkább nő. A kérdés az, hogy mennyire éri meg a megnövekedett reakcióképességgel, de még inkább egy speciális viselkedésű és speciális tulajdonságokkal rendelkező anyag gyártásával járó többletköltség? Természetesen nagyon megéri nano méretekben gondolkodni, hiszen manapság egyre szélesebb körű ipari alkalmazások igénylik a minél kisebb szemcseméretet úgy, mint a vegyipari, kerámiai-, festék- és gyógyszeripari, valamint az élelmiszeripari termelési folyamatok.

Az előkészítéstechnika tudományának segítségével, azt kutatjuk, hogyan mi módon állítsuk elő ezeket az extra finomőrleményeket, miközben az előállításhoz szükséges fajlagos munkaszükséglet a lehető legalacsonyabb legyen. Ezen finom szemcseméretetek előállításának lehetséges hatékony eszközei a keverőmalmok.

A keverő golyósmalmok különleges, finomörlésre megfelelő örlőberendezések. Alkalmazásuk viszonylag egyszerű felépítésük és kedvező energiafelhasználásuk folytán került az utóbbi években előtérbe. Az örlőtestek és a keverőszerkezet egyidejűleg történő működése megnöveli az aprítási eredményt, és megrövidíti a szükséges örlési időt. Keverő golyósmalmokkal, a nagyobb energiasűrűség következtében, lényegesen finomabb szemcseméret-eloszlásokat érhetünk el, mint hagyományos golyósmalmokban.

A TDK dolgozatomban végzett laboratóriumi kísérletek célja szubmikronos, ill. nanoszemcsék előállítása volt stabilizálószer hozzáadása nélkül, ill az örlési paraméterek változtatásának (koncentráció, feladási térfogat) örlési finomságra és energiafelhasználási viszonyokra kifejtett hatása. A Dolgozat elkészítése során szakirodalmi kutatást végeztem, melynek középpontjában a keverőmalmok a nanotechnológia és a keverőmalmokkal már végrehajtott örlések tapasztalatai álltak, majd laboratóriumi kísérleteket végeztem a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében egy nedves

üzemű Netzsch MiniCer típusú keverőmalom segítségével. Ennek során vizsgáltam (OMYA-ból származó $X_{80}=82,56 \mu\text{m}$) mészkő őrlemény szemcseméret csökkenését, a fajlagos felület növekedését és a felhasznált energiát az őrlési idő függvényében különböző keverőtárcsa kerületi sebességek, feladási koncentrációk, feladási térfogatok és őrlőközegek esetén, ill. reprodukálhatósági kísérleteket is folytattam. Kísérleteimhez 1 mm-es átmérőjű ZrO őrlőgolyókat használtam.

2. Szakirodalmi áttekintés

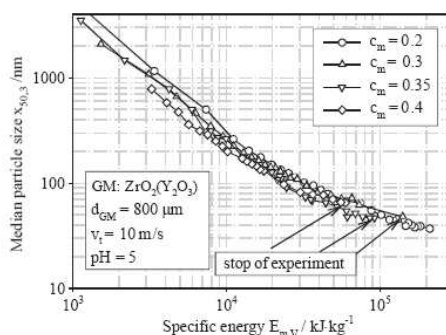
Keverőmalmi nanoőrlés tapasztalatai

A keverő őrlés fő műszaki paramétereit számos eljárástechnikai körülmény, jellemző befolyásolja úgy, mint a

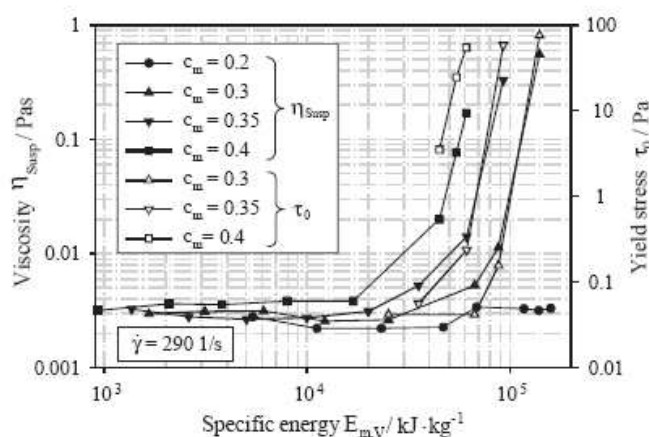
- geometriai jellemzők: az őrlőtér, az őrlőtestek és a keverő geometriája, az őrlőtér falának kialakítása;
- üzemi jellemzők: a feladás tömegárama, a keverőtárcsa kerületi sebessége, a mozgatus módja, a szilárdanyag-tömegkoncentráció (nedvesőrlés) és az őrlőtestek töltési foka;
- anyagjellemzők: a keverő, az őrlemény és az őrlőtestek anyagtulajdonságai [1].

Wolfgang Peukert és Arno Kwade „Keverőmalmokban történő nano-őrlés lehetőségei és korlátai” c. munkájukban beszámolnak a nano-őrlés területén végzett legújabb eredményeikről. Többek között arról, hogy a korábban $0,1 \dots 1 \mu\text{m}$ -es őrlési alsó határt sikerült felülmúlni keverőmalmi aprítással; elérték a 10 nm-es részecskeméretet. Egy hatékony és gazdaságos őrléshez azonban számos feltételnek teljesülnie kell (üzemi paraméterek, $<50 \dots 100 \mu\text{m}$ őrlőtestek alkalmazhatósága, a szuszpenzió agglomerációval szembeni stabilitása, őrlőtest kopás, szennyeződés, őrlemény-őrlőgolyók szeparálása). [2]

Wolfgang Peukert és szerzőtársai Nanoőrlés keverőmalmokban [3] című cikkükben részletesen ismertetik nagy tisztaságú $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$ mintaanyag ZrO₂ őrlőgolyókkal történő őrlését.

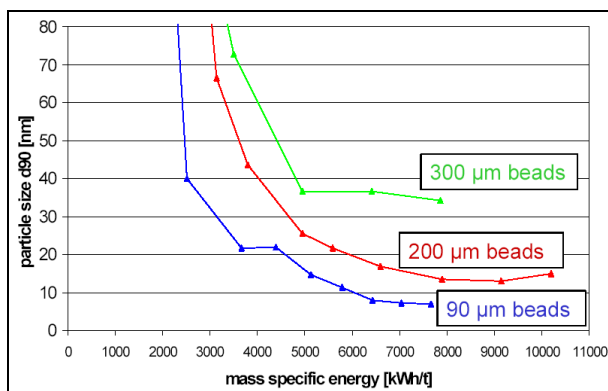


1. ábra A szilárd anyag koncentrációjának hatása az őrlési energiára [3]



2. ábra A szilárd anyag koncentrációjának hatása a feladás viszkozitására [3]

Kísérleti eredményeik alapján (1-2. ábra) megállapítható, hogy nagyobb koncentrációjú feladás azonos őrlési energiájához kisebb elérhető szemcseméret tartozik, azaz ugyanazon energia befektetésével finomabb eloszlást kapunk, azonban a nagyobb koncentráció az anyag őrlés során bekövetkező viszkozitásának növekedését is eredményezi, ezért hamarabb le kell állítani a folyamatot. Feltételezik, hogy a szilárd anyag koncentrációjának emelésével több szemcse kerül az aktív őrlési zónába az őrlőgolyók közé, ezért javul az őrlés hatékonysága.



3. ábra Őrlőtestek átmérőjének termék finomságára gyakorolt hatása a fajlagos energia függvényében szintetizált ZrO₂ őrlése esetében ($C_m=40\%$, stabilizálás: monokarboxil sav) [4]

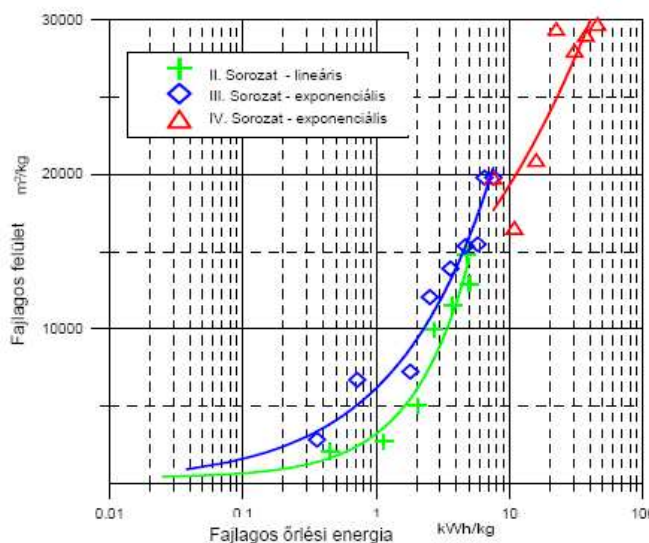
A 3. ábra alapján világosan látszik, hogy az őrlőgolyók méretének csökkentésével ugyanazt a szemcseméretet kisebb energia befektetés árán érhetjük el.

Egy stabil 35 nm-es 90 %-os szemcseméretű őrlemény előállításához hozzávetőlegesen feleannyi fajlagos munkára van szükség, ha 90 μm-es őrlőgolyókat használunk szemben a 300 μm-es őrlőtestekkel [4]. Az alkalmazott őrlőgolyók mérete természetesen függ a feladás szemcseméretétől is. Gao és társai [5] számos laboratóriumi és üzemi kísérlet után

megállapítottak egy ökölszabályt, amelynek lényege, hogy az őrlőtestek átmérőjének 20...30 - szorosának kell lennie a feladott anyag 80 %-os szemcseméretének. A megfelelő őrlőgolyó méret kiválasztása a legfontosabb feladat a keverőmalmi őrlés tervezésekor, amelynek hatása lehet az őrlés hatékonyságára és energia fogyasztására [4].

2010. évi TDK dolgozatomhoz végrehajtott kísérletek során sikeresen állítottam elő nano szemcseméretű mészkő részecskéket egy kétlépcsős őrlési folyamat eredményeként. Az első őrlési lépcsőben 10 m/m %-os mészkő-víz szuszpenziót adtam fel (feladás: $x_{50}=9,04\ \mu\text{m}$; $x_{80}=13,99\ \mu\text{m}$; $S_m=313,37\ \text{m}^2/\text{kg}$) 4 órás őrlésre 1 mm-es őrlőgolyókkal, $v=10,8123\ \text{m/s}$ keverőtárcsa kerületi sebesség mellett. (4 órás őrlemény: $x_{50}=139,4\ \text{nm}$, $x_{80}=169,5\ \text{nm}$ $S_m=19780\ \text{m}^2/\text{kg}$). Ezt a malomból történő kivétel során 2,42 m/m %-osra hígult terméket 0,2 mm-es őrlőgolyókkal 150 percig őrltem ugyancsak 10,8123 m/s-os keverőtárcsa kerületi sebesség mellett, melynek eredményeként az alábbi jellemzőkkel bíró őrleményt kaptam: $x_{50}=75,9\ \text{nm}$; $F(x<100\text{nm})=94,157\ \%$; $S_m=29745,2\ \text{m}^2/\text{kg}$.

Mértük az őrlési folyamatokban felvett energiát, így ábrázolni tudtuk a fajlagos felület növekedését az őrlési energia függvényében (4. ábra).



4. ábra A fajlagos felület növekedése a fajlagos őrlési energia függvényében [7]

Megállapítottuk hogy 15 tömegszázalék koncentráció esetén (II. sorozat) a fajlagos felület növekedéséhez szükséges energianövekedés jó közelítéssel lineáris, azaz a két mennyiség változása egymással egyenesen arányos. A 10 tömegszázalékú feladás esetén ez az összefüggés exponenciálisnak tekinthető (III. sorozat, a nanoméretű részecskék előállításának első lépcsője). A IV. (az őrlés második lépcsője 0,2 mm-es őrlőgolyókkal) sorozatban ugyancsak exponenciálisan növekszik a felhasznált energia az elért fajlagos felülettel, a

folyamat végére a felhasznált energia nélkül nő, hogy lényeges felületnövekedést érjünk el. Ennek oka a megnövekedett felületi erőknek tulajdonítható, amelyek a szemcsék összetapadását (aggregációját) idézik elő és a további befektetett munka már feltehetően az elért felület megtartására és kristályszerkezeti változásokra fordítódott. Azaz $29500 \text{ m}^2/\text{kg}$ -nál elértük az adott őrlőgolyókkal, stabilizálószer hozzáadása nélküli őrlés fizikai határát.

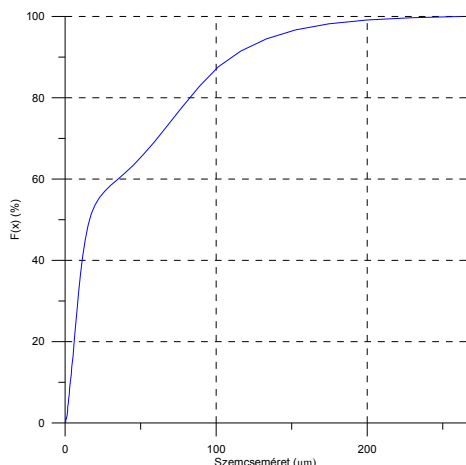
Ha el szeretnénk érni a kívánt finomságot stabilizálószer adagolására lehet szükség. A stabilizálás történhet elektrosztatikusan, alaki stabilizálással és elektroszterikusan is. Kísérleteim során nem adtam semmilyen stabilizálószer az őrlési folyamatba.

3. A mintaanyag tulajdonságai

Laboratóriumi kísérleteim mintaanyagának az egri OMYA előkészítőműből származó mészkövet használtam. Oxidos összetételét az 1. táblázatban ismertetem.

1. táblázat A mintaanyag oxidos összetétele

Oxid	Tömegszázalék (%)
SiO_2	1,61
P_2O_5	0,41
CaCO_3	97,1
Fe_2O_3	0,82
SrO	0,06



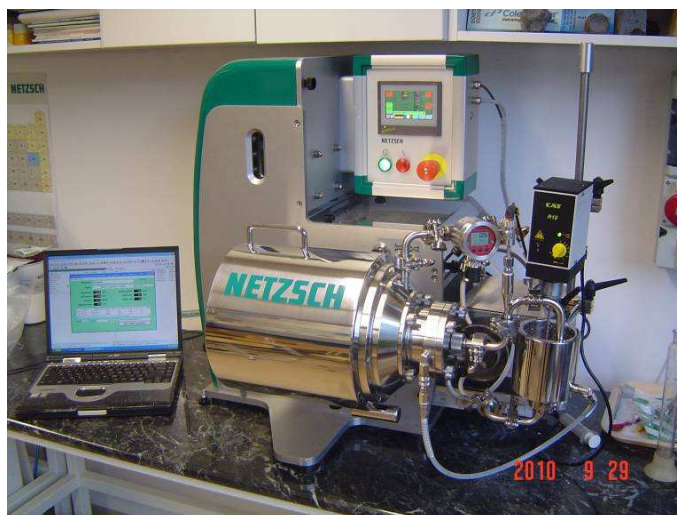
5. ábra A mintaanyag szemcseméret eloszlása

Az 5. ábra alapján megállapíthatóak a feladás jellegzetes szemcseméretei; $x_{50}=16,2482 \text{ µm}$, $x_{80}=82,56 \text{ µm}$. Az eloszlás adataiból a szemcseméret elemző berendezés fajlagos felületet is számol, melynek értéke; $S_m=326,5333 \text{ m}^2/\text{kg}$, ha az alaktényező $\varphi=1$.

4. A berendezések bemutatása

4.1. Netzsch Mini Series (Mini Cer)

A Netzsch Mini Series keverőmalmokat kifejezetten a laboratóriumi körülmények közötti mikro- és nanométeres tartományban megvalósuló őrlések kivitelezésére hozták létre. Az őrlőterek anyaga igénytől függően három féle lehet; a Mini- és Micro-Cer a fémektől mentes oldószerben végrehajtott finomőrlésekre szolgálnak, amely esetében a kamra ZrO-ból, vagy SiC/Si₃N₄-ből készült. A szintén fémtől mentes vízalapú finomőrlemények előállítására a poliuretán anyagú kamra a legalkalmasabb (Micro Pur, Mini Pur), míg a fémes anyagok őrlésére a rozsdamentes acélból készült kamra a legjobb választás (MicroFer és MiniFer). A laboratóriumi kísérleteim során a Mini Cer kerámia őrlőterű változatot használtam (6. ábra).



6. ábra A tanszéki Mini-Cer malom üzem közben

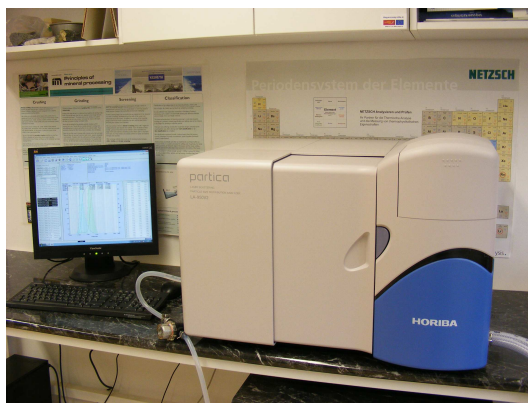
A berendezés (Mini Series) alkalmas szerves és szervetlen pigmentek, tintasugaras nyomtatók festékpátron festékének gyártására, ill. kitűnően alkalmazható technikai és elektronikai kerámiák, LCD képernyők és többretegű kerámia kondenzátorok alapanyagának előállítására. A készülékre jellemző technikai adatokat a 2. táblázatban tüntettem fel.

2. táblázat A Mini Cer keverőmalom legfontosabb műszaki adatai

A keverőmalom technikai adatai	
Hajtómotor teljesítménye (kW)	1,5
Fordulatszám tartomány (ford./perc)	1000-4200
Őrlőközeg átmérője (mm)	0,05-2,00
Őrlőközeg minimális térfogata (ml)	140
Folyamatos üzem feladási térfogata (ml)	250-500
Szakaszos üzem feladási térfogata (ml)	135-140

4.2. Horiba LA-950 V2 típusú lézeres szemcsenagyság-elemző

Az alkalmazott szilárd anyagok szemcseméret eloszlását ezzel a készülékkel határoztuk meg, ami egy lézersugár elhajláson alapuló spektrométer (7. ábra).



7. ábra A tanszéki Horiba LA-950 V2 típusú lézeres szemcsenagyság elemző berendezés

A szemcsét érő lézersugár a szemcsével történő találkozása során elhajlik. Az elhajlási szögből következtethetünk a szemcseméretre, ugyanis az elhajlási szög és a szemcseméret között fordított arányosság áll fenn. A fény intenzitása, pedig a szemcsék gyakoriságával van összefüggésben. A mérés során 31 különböző sugarú koncentrikus félkör mentén elhelyezett érzékelő fogja fel a lézersugarakat, majd a jelet továbbítja a számítógépbe. A számítógép mátrix inverzióval kiértékeli a jeleket, aminek eredményeképpen kapjuk az eloszlásfüggvényt. Mind száraz, mind nedves üzemen is képes mérni a készülék, ugyanis száraz közegeű diszpergáló egysége is van, azonban folyadék (pl. desztillált víz) használatával, a szemcsék jobban diszpergálódnak. Ha a szemcsék vízben oldódnak denaturált szeszt, vagy nagy tisztaságú alkoholt is alkalmazhatunk. A készülék mérőtartománya 10 nm és 3 mm közé esik. A berendezés szemcseméret eloszláson kívül darabeloszlást és fajlagos felületet is képes mérni

5. A mérés leírása

5.1 A mérés végrehajtásának módja

A malommal végrehajtott kísérleteimet az alábbi módon végzem. Először a malmot függőleges helyzetbe hozom úgy, hogy kihúzom a horizontális - vertikális állítógombot, ezáltal az mozgatható lesz, majd addig forgatom a rögzítési tengelye körül, amíg a dob függőleges helyzetében vissza nem kattan a gomb. Ezáltal stabilan rögzíthető a vertikális pozíció (8. ábra). Célszerű az állítógombot kézzel tartani, hogy visszaugrásakor kisebb legyen az ütközés, ezáltal akadályozva meg az egyes alkatrészek idő előtti kopását. Habár a

malomban még nincs semmi, mégis érdemes még az elforgatás előtt behelyezni egy műanyag tömítő rudat az őrlőkör malomba befolyó csőszakaszába, ezzel előzve meg a később behelyezendő őrlőgolyók csőszakaszba, később pedig őrlőkörbe történő kerülését (amit mindenképpen meg kell akadályozni).



8. ábra A malom töltési, ill. karbantartási pozíciója



9. ábra A malom működési helyzetben



10. ábra A malom ürítési pozíciója

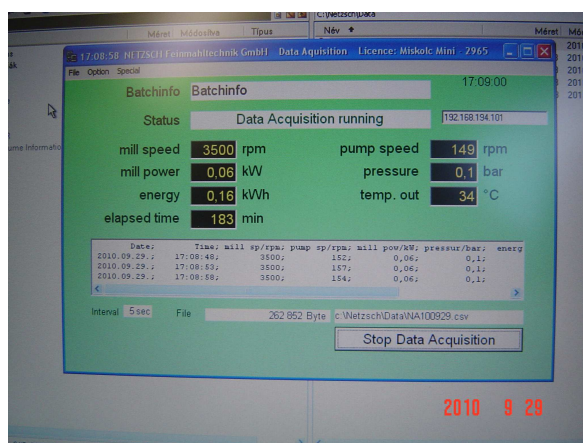
Ezt követi az őrlőtér alkatrészeinek összeszerelése, ill. az őrlőgolyók behelyezése. A kerámia anyagú őrlőtárcsát csavarral rögzítem az őrlőtérbe, ügyelve a csavar megfelelő meghúzására, de a kerámia alkatrész esetleges megrepedésének elkerülésére is. A tárcsa és a forgatási tengely között műanyag tömítőgyűrű található, amelynek megfelelő pozícióját még a tárcsa felhelyezése előtt ellenőrizni kell. Ezt követi az előzetesen kiválasztott átmérőjű és kimért tömegű őrlőgolyók behelyezése, ügyelve a golyók veszteségének minimalizálására (ugyanis azok könnyen elgurulnak). A behelyezés után a malom fedőelemével zárom az őrlőteret, melyre előzetesen csavarral rögzítettem egy szitát. Ez a szita cserélhető az őrlőgolyók átmérőjének függvényében (az 1000 μm -es őrlőgolyókhoz 300 μm -est használok, míg 200 μm -es őrlőgolyókhoz 100 μm -est) és megakadályozza a golyók őrlőtérből történő kihordását. A fedőelem és az őrlőtér között műanyaggal bevont műanyag tömítőgyűrűt helyezek a malom szivárgásának elkerülésére. Itt is ügyelni kell a gyűrű megfelelő pozíciójára, ugyanis az könnyen deformálódik, így elvesztheti funkcióját. A fedőelemet négy csavarral rögzítem a csavarok átló mentén történő meghúzásával.

Ezek után ismét kihúzom a horizontális – vertikális állítógombot és üzemi (vízszintes) helyzetbe állítom a malmot (9. ábra). Most már eltávolítható a műanyag tömítő rúd. Ezt követően kialakítom az őrlőkört úgy, hogy a feladótartály kiömlő részéhez előzetesen megfelelően összeszerelt csőszakaszt rögzítek műanyag tömítőgyűrű és rögzítő bilincs segítségével. Ezután a fém csőszakaszhoz egy műanyag csövet csatlakoztatok ugyancsak tömítőgyűrű és rögzítő bilincsel. A műanyag csövet rárakom a perisztaltikus szivattyúra, majd egy félkör alakú műanyag szorítóelemmel és rögzítő csappal akadályozom meg annak

Az őrlőkör összeszerelését követően jöhet a hűtőkör kialakítása, amely három cső malomköpenyhez, keverőtartályhoz és a kettő közötti kapcsolatot megvalósító rugós csatlakozású műanyag cső segítségével történik. A hűtővíz hagyományos fürdőszobai csapból jön, majd amint körbeért a hűtőkörön, a mosdókagylón keresztül távozik. Érdekes még a feladás megkezdése előtt kinyitni a csapot, nehogy véletlenül hűtés nélkül maradjon a rendszer az őrlés kezdetekor. A malom megfelelő hűtését az őrlőtérből kilépő zagy hőmérsékletének mérésével ellenőrzik. Mind a hőmérsékletmérő eszköz, mind a nyomásmérő berendezés elektronikus kimenettel rendelkezik, amelyeket speciális csatlakozással ellátott vezetékek segítségével csatlakoztatunk a kezelőpanelhez. Fontos a megfelelő csatlakozás, mivel a mérési adatok hiányában az őrlési folyamat nem kezdhető meg (a malom biztonsági automatikája megakadályozza az indítást).



Összeszereltük a malmot, most már be lehet kapcsolni a kezelőpanelt. A mérési adatok rögzítése lappal történik (ugyanis a malom és a számítógép közötti adatátvitel szabványos internetkábel segítségével megvalósítható). Ezt követi az előzetesen kimért tömegű száraz őrlendő anyag elkeverése vízben (vagy más oldószerben). A folyadék egy részét azonnal a keverőtartályba töltöttem, majd bekapcsoltam a szivattyút (pump on), így ellenőrizve az esetleges szivárgásokat, ugyanis ha bármi probléma lépne fel, most még könnyen szét lehet szerelni a rendszert és korrigálni a hibát. Ha mindent rendben találtam, jöhet a folyadék – őrlendő anyag keverékének feladása a keverőtartályba. A feladás közben már forog a keverőszerkezet keverő lapátja (mixer on), ezt követően pedig bekapcsolom a szivattyút. Ha megfelelően működik a szivattyú (nem lép fel szokatlan hanghatás, nem törik a cső, nem rakódik le a csőben szilárd anyag és megfelelően csorog vissza a feladás a keverőtartályba), akkor bekapcsolom a malmot (mill on). Ez előtt közvetlenül megkezdem a számítógépes adatgyűjtést a malom fordulatszám, eltelt idő, energia felvétel, nyomás, kilépő anyag hőmérsékletének és a szivattyú fordulatszámának rögzítése céljából.



12. ábra Számítógépes adatgyűjtés

A malom 1000 fordulat/perc fordulatszámáról indul és a kezelőpanel segítségével tovább növelem azt (mill +). A szemcseméret eloszlás őrlési idő függvényében bekövetkezett változásának (azaz a finomodásnak) nyomon követése érdekében kanál segítségével mintákat vettem. A mintákat lézeres szemcseméret elemző berendezés segítségével vizsgáltuk.

Az őrlés befejeztével 1000 fordulat/percre csökkentem a fordulatszámot (mill -) majd kikapcsolom a malmot (mill off), a keverőt (mixer off) és a szivattyút (pump off), de a hűtés továbbra is bekapcsolva hagyom. Megszüntetem a további számítógépes adatfelvételt (stop data acquisition). Ezt követően elkezdem a malom tisztítását, amelyhez fecskendő, műanyag lavórt és vízzel teli spriccflasskát használlok. Visszakapcsolom a keverőt a szivattyút és a

malmot (alap fordulatszám), majd a fecskendő (és kanál) segítségével kinyerem az őrlött anyag és víz keverékét, amit egy zárható műanyag mintatartó edénybe teszek. Ügyelek arra, hogy mindig legyen folyadék a körfolyamatban, ezért természetesen hígul az elrakott őrlemény koncentrációja a vízben. Ezután megint leállítom a malmot, szivattyút és keverőt. Elfordítom a keverőtartályba az anyagot visszaszállító csövet úgy, hogy az a műanyag lavórba ürüljön. Visszakapcsolom a teljes rendszert és spriccflaskával addig táplálom vízzel, míg teljesen tiszta folyadék nem jön ki az őrlőkörből. Ezt követően leállítom a rendszert, áramtalanítom és megkezdem az őrlőkör szétszerelését. Az alkatrészeket tálcára rakom és később megtisztítom azokat. Most már leállítható a hűtés is. Azért volt szükséges mindeddig fenntartani a hűtő körfolyamatot, mert habár nem működött már a malom, de a súrlódás által termelt hőt még nem teljesen vezettük el.



13. ábra A malom működés utáni helyzetben

Eltávolítom a hűtőkör műanyag csöveit, bedugom a műanyag tömítő rudat az őrlőkör bemeneti csomkjába, majd ismét függőleges helyzetbe hozom a malmot. Meglazítom az őrlőtér fedőelemének csavarjait átlósan és leemelem a szitával együtt. Ismét veszek egy műanyag lavórt, hozzá pedig egy olyan lyukméretű szitát, amelyen biztos nem esnek át az őrlőgolyók, továbbá egy vízzel teli spriccflaskát is. A vertikális állítógommbal ürítési pozícióba hozom a malmot (10. ábra) és beleengedem az őrlőgolyókat a szitába. Az őrlőkör bemeneti csomkján keresztül vízzel segítem elő az őrlőtérből az őrlőgolyók eltávolítását. A tisztítás után a 13. ábrán látható pozícióban hagyom kiszáradni a berendezést.

5.2 Kísérleti vizsgálatok

Laboratóriumi kísérleteim során öt mérési sorozatot végeztem el, amelyek esetében a változó üzemi és gépi paraméterek az alábbiak voltak:

- a keverőtárcsa kerületi sebessége,
- a feladott mészkő-víz szuszpenzió tömegkoncentrációja,
- a feladás térfogata,
- és az őrlőközeg (csapvíz, desztillált víz).

4. mérési sorozatként az őrlések reprodukálhatóságát vizsgáltam. A jobb áttekinthetőség és összehasonlíthatóság kedvéért a 3. táblázatban tüntettem fel összefoglaló jelleggel a legfontosabb üzemi paramétereket.

A mintavételezés minden esetben a meghatározott malom fordulatszám (kerületi sebesség) elérése utáni 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, és 240 percek elteltével történt, majd ezen őrleményeket a kísérleti berendezéseknél bemutatott Horiba LA 950 V2 típusú lézeres szemcseméret elemző berendezés segítségével vizsgáltam. Diszpergálószerként minden vizsgálatnál 0,5 ml térfogatú 50 g/l-es koncentrációjú Na-pirofoszfát oldatot adagoltam, majd 1 percen keresztül végeztem ultrahangos diszpergálást. Minden egyes mintának legalább háromszor mértem meg a szemcseméret eloszlását, kétszer rögtön a mérés képes állapot elérése (ultrahangos diszpergálás) után, majd egyszer kb. 3-5 perc elteltével. Ha mindegyik szemeloszlása megegyezett a legkisebb hibával terhelt adatsort fogadtam el, ha nem, újabb méréseket végeztem.

Az **első (I.) sorozatban** a malom fordulatszámának, azaz a keverőtárcsa kerületi sebességének őrlési folyamatra gyakorolt hatását vizsgáltam. A fordulatszámok 2000, 2500, 3000, 3500, és 3800 1/min voltak, amelyekből a kerületi sebességeket a

$$v_k = r \cdot \omega; \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi \cdot n \quad (2)$$

képletek segítségével számoltam, ahol v_k a tárcsa kerületi sebessége [m/s], r a forgótárcsa sugara [m] és ω a fordulatszám (n ; [1/s]) alapján számított szögsebesség [1/s]. Ismert a tárcsa átmérője $D=59$ mm ($r=0,0295$ m), így a kerületi sebességek rendre; $v_1=6,2$ m/s; $v_2=7,7$ m/s; $v_3=9,3$ m/s; $v_4=10,8$ m/s; $v_5=11,7$ m/s. Az alkalmazott őrlőgolyók minden esetben 1mm

átmérőjű 500 g tömegű ZrO őrlőgolyók voltak, a feladási szuszpenziót pedig 27,78 g mészkő és 250 ml víz alkotta, így a feladási szuszpenzió térfogata és tömegkoncentrációja is ugyanaz volt $V_{\text{feladás}}=260,3 \text{ cm}^3$ ($\rho_{\text{sz}}=2,7 \text{ g/cm}^3$ szemcsesűrűséggel számolva) és $C_m=10 \text{ m/m } \%$. Az őrlési időt mind az öt kísérletnél 4 órára (240 perc) választottam.

Megfigyeltem, hogy az őrlési idő előrehaladtával az őrlőkörben keringő szuszpenzió viszkozitása nőtt, ez a növekedés pedig annál hamarabb következett be, minél nagyobb volt a keverőtárcsa kerületi sebessége. Az is megállapítható, hogy mind a rendszerben (őrlőkörben) uralkodó nyomás, mind a hőmérséklet és felhasznált energia növekvő tendenciát mutat a kerületi sebesség növekedésének függvényében az egyes őrlési kísérleteknél, a szivattyú fordulatszámát pedig kb. azonos értéken tartottam, hogy a szuszpenzió keringési sebessége jó közelítéssel azonos legyen.

3. táblázat Órlési kísérletek összefoglaló táblázata

Sorozatok száma	malom fordulatszáma (1/min)	feladási koncentráció (m/m%)	feladási térfogat (cm ³)	alkalmazott őrlőgolyó átmérő (mm)	szivattyú átlagos fordulatszáma a kísérletek alatt (1/min)	átlagos hőmérséklet (°C)	átlagos nyomás a kísérletek alatt (bar)	felhasznált energia (kWh)	őrlési idő (min)	alkalmazott közeg
I.	2000	10	260,3	1	106,04	28,34	0,1	0,09	240	csapvíz
	2500				106,07	33,43	0,26	0,27		
	3000				104,02	36,48	0,30	0,31		
	3500				103,29	32,21	0,40	0,21		
	3800				100,81	38,83	0,49	0,62		
II.	3500	7,5	257,5		98,84	40,30	0,40	0,49		
		10	260,3		103,29	32,21	0,40	0,21		
		12,5	263,2		119,27	43,12	0,52	0,48		
		15	266,3		105,36	40,11	0,49	0,53		
		20	273,2		103,11	41,83	0,53	0,17		
III.		10	310,3		106,23	40,43	0,45	0,25	240	
			360,3		103,58	34,33	0,39	0,26		
			410,3		103,27	41,58	0,47	0,52		
IV.	3000	10	260,3		104,02	36,48	0,30	0,31		
					103,86	40,03	0,32	0,26		
V.				101,86	35,98	0,29	0,24			
				101,96	36,09	0,29	0,28			
										desztillált víz

(A malom fordulatszámok az alábbi keverőárcsa kertületi sebességeknél felelnek meg: 2000 1/min → v=6,2 m/s; 2500 1/min → v=7,7 m/s; 3000 1/min → v=9,3 m/s; 3500 1/min → v=10,8 m/s; 3800 1/min → 11,7 m/s)

A **második (II.) sorozatban** a feladási szuszpenzió koncentrációját változtattam azáltal, hogy növeltem a szilárd anyag (mészkő) tömegét. A feladást az egyes koncentrációknál 20,27 g ($C_m=7,5$ m/m %); 27,78 g ($C_m=10$ m/m %); 35,71 g ($C_m=12,5$ m/m %); 44,12 g ($C_m=15$ m/m %); és 62,5 g ($C_m=20$ m/m %) mészkő, ill. 250 ml víz alkotta, így a feladási térfogat is kissé változó volt (a legnagyobb és legkisebb közti különbség kb. 6%). Az alkalmazott őrlőgolyók átmérője és tömege megegyezett az első sorozatban használtakéval, a malom fordulatszámát 3500 1/min-ra választottam. Az őrlés előrehaladtával itt is viszkozitásnövekedést tapasztaltam, melynek mértéke a koncentráció növekedésével erősödött, ezért a 12,5 %-os tömegkoncentrációjú őrlést 210 percnél, míg a 20 tömegszázalékost 67 percnél le kellett állítanom. A viszkozitás növekedését jól szemlélteti a következő (14.) ábra, ahol 3 különböző ($C_m=7,5$ m/m %; $C_m=15$ m/m %; $C_m=20$ m/m %) koncentrációjú őrlések termékeit láthatjuk.



14. ábra A 7,5; 15 és 20 m/m %-os feladású kísérletek termékeinek összehasonlítása

Megállapítható, hogy a 7,5 m/m %-os teljesen szétterül, jól nedvesíti a felületet, azonban a 15 és 20 m/m %-os termékek krémszerűek, alig nedvesítik a felületet, viszkozitásuk jelentős. A keringető szivattyú fordulatszámát a 12,5 m/m %-os kísérletnél növeltem (96 percnél 130 1/min-ra, 153 percnél 137 1/min-ra), hogy a kísérletet tovább tudjam folytatni, azonban 210 percnél már szinte állt az anyag az őrlőkörben, szürcsölést tapasztaltam, leállítottam a folyamatot.

A **harmadik (III.) sorozatban** a változó paramétert a feladási térfogat jelentette. Az eredeti térfogatot növeltem 50, 100 és 150 cm³-el úgy, hogy a koncentráció ugyanaz maradt ($C_m=10$ m/m %). Az első esetben 33,12 g mészkő örleményt és 298,03 g vizet adtam fel a rendszerre

(12,3 cm³ mészkő és 298,03 cm³ víz együtt 310,3 cm³, azaz 50 cm³-rel több, mint 260,3 cm³-es eredeti feladás). A második, ill. harmadik kísérletnél 38,45g mészkő és 346,05 g víz (+100 cm³), ill. 43,79 g mészkő és 394,08 g víz (+150 cm³) képezte a szuszpenziót. Az őrlőgolyók átmérője és tömege megegyezett az előző sorozatokban használtakkal, azaz az őrlőgolyó töltési foka itt is 53,65 % volt (mivel az őrlőgolyók térfogata 125 cm³, a malom szabad térfogata pedig 233 cm³, így ezek hányadosaként kapjuk az 53,65 %-ot). Az őrlési idő minden kísérletnél 4 óra volt, a malom fordulatszáma pedig 3500 1/min. Az őrlések során felhasznált energia a térfogat növekedésével nőtt, a nyomás, ill. a szivattyú fordulatszáma hasonló volt minden esetben, azonban a 360,3 cm³-es kísérletnél a nyomás és hőmérséklet alatta maradt a másik kettőénél. A viszkozitás növekedését az idő előrehaladtával ebben a sorozatban is tapasztaltam.

A **IV. sorozatot** annak érdekében végeztem, hogy megállapítsam a kísérletek reprodukálhatóságát, azaz mindhárom kísérletnél ugyanazokat a paramétereket alkalmaztam (3000 1/min-os malom fordulatszámot, 10 m/m %-os koncentrációt, ill. 260,3 cm³-es feladási térfogatot, 500 g tömegű 1 mm-es ZrO őrlőgolyókat, 4 órás őrlési időt). Mind a nyomás, mind a hőmérséklet ill. felhasznált energia tekintetében nem tudok megállapítani tendenciát, azok változó értéket mutattak, azonban egymástól nem sokkal tértek el. A szivattyú átlagos fordulatszámát jó közelítéssel azonosnak vehetjük.

Az **V. sorozatban** desztillált vizes közegben végeztem el a mérést 10 m/m %-os feladási koncentráció, 9,3 m/s keverőtárcsa kerületi sebesség, 260,3 cm³-es feladási térfogat, 4 órás őrlési idő és az előző 4 sorozattal megegyező tömegű és átmérőjű őrlőgolyókkal, azaz töltési fok mellett.

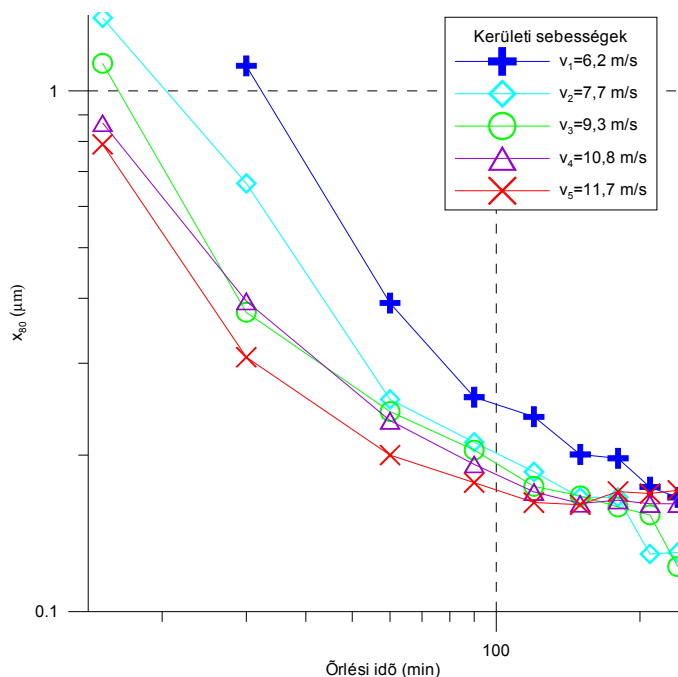
6. Kísérleti eredmények és kiértékelésük

6.1. Őrlési finomság változása az őrlési idő függvényében

Őrlési finomság alatt a szemcseméret eloszlást és fajlagos felületet értem, ezek változását kívánom bemutatni az egyes őrlési sorozatok esetében.

I. sorozat

Igen nagy számú eloszlásfüggvényt kaptam a mérések során, azok ábrázolása áttekinthetatlenné tenné az eredményeket, ezért a mértékadó szemcseméretet (x_{80}) változását ábrázoltam az őrlési idő függvényében (15. ábra).



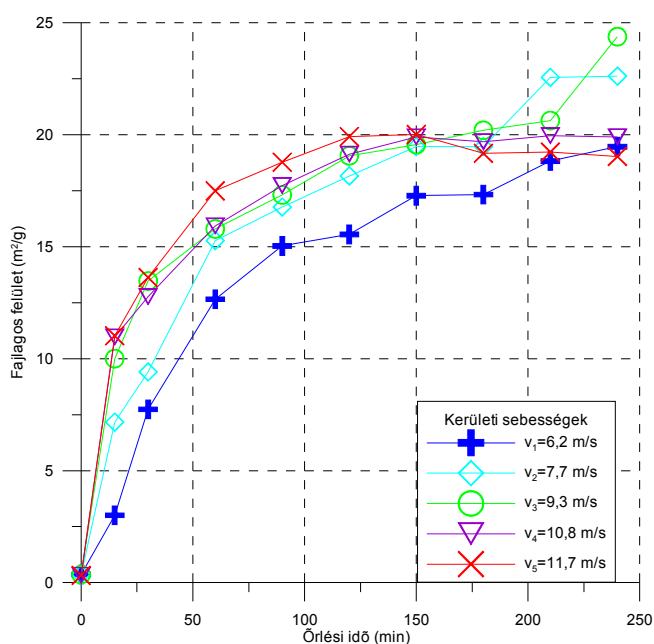
15. ábra Őrlemények mértékadó szemcseméretének (x_{80}) változása az őrlési idő függvényében különböző keverőtárcsa kerületi sebességek esetén

Megfigyelhető, hogy az őrlési idő növekedésével az x_{80} csökken minden esetben, azonban különböző kerületi sebességeknél másképp. Az őrlési folyamat elején még gyorsabb a csökkenés mértéke, míg az őrlés végére eljünk az adott körülmények közötti őrlőhatóság maximumát, további őrlés nem eredményez lényeges szemcseméret csökkenést, az x_{80} kezd beállni egy állandó értékre.

Minél nagyobb a malom fordulatszáma, azaz a keverőtárcsa kerületi sebessége annál rövidebb idő alatt érjük el ugyanazt a szemcseméretet, vagyis a finomodás gyorsabb, ez a megállapítás

kb. 150 percig fennáll, azonban ezt követően itt is változásokat tapasztaltam. Habár a v_1 -nél mért értékek (a 240 perces x_{80} kivételével) végig megfelelnek az előbbieknél, vagyis itt a leglassabb a szemcseméret csökkenés mértéke, addig az őrlési folyamat végére a v_2 , v_3 , és v_4 pontjait összekötő görbék a v_5 alá futnak, azaz hiába növelem tovább a malom fordulatszámát már nem kapok olyan finom végterméket, viszont, rövidebb idő alatt juthatok el egy kevésbé finom termékhez, mint a többi esetben, igaz jóval nagyobb energia árán, amint azt majd a későbbiekben látni fogjuk. Legkisebb x_{80} -at a v_3 esetén értem el ($x_{80}=0,1221 \mu\text{m}$, 240 percnél), ezt követte a v_2 ($x_{80}=0,1292 \mu\text{m}$, 210 percnél), majd a v_4 ($x_{80}=0,1612 \mu\text{m}$, 240 percnél), a v_5 ($x_{80}=0,1605 \mu\text{m}$, 150 percnél) és végül a v_1 ($x_{80}=0,1658 \mu\text{m}$, 240 percnél).

Másik fontos paraméter, ami jellemzi az őrlés finomságát a fajlagos felület. A fajlagos felület az egységnyi tömegű anyag felületét jelenti (esetünkben m^2/g mértékegységgel szerepel). Számítását a lézeres szemcseméret elemző berendezés végzi matematikai úton a mért szemcseméret eloszlások adataiból. Jobban jellemzi az őrlés finomságát, mint a mértékadó szemcseméret, ugyanis az egész szemcsehalmazra vonatkozik. Például előfordulhat, hogy kisebb a minimális szemcseméret egy őrlemény esetén összehasonlítva egy másikkal, azonban a kis méretű szemek aránya kevesebb, így fajlagos felülete is kisebb lesz, mint a durvább minimális szemcseméretű, de kis szemeket nagyobb arányban tartalmazóé, tehát értéke az egész őrleményt reprezentálja. Meghatározása fontos, mivel az anyag reakcióképességének egyik mértéke, így későbbi felhasználhatóságát alapvetően meg fogja határozni.



16. ábra Őrlemények fajlagos felületének változása az őrlési idő függvényében különböző keverőtárcsa kerületi sebességei esetén

A 16. ábrán az őrlmények fajlagos felületének növekedését követhetjük nyomon az őrlési idő függvényében. Megállapítható, hogy szoros összefüggésben áll a szemcseméretnél tárgyaltakkal (fordított arányosság áll fenn), ugyanis minél finomabb a szemcseméret eloszlás, annál nagyobb lesz a fajlagos felület. A kezdeti gyors emelkedés után elérünk egy maximumot, amit követően lényeges változás már nem következik be, elértük az adott körülmények közötti őrlhetőség maximumát (legtöbb esetben 210, 240 perc őrlés után).

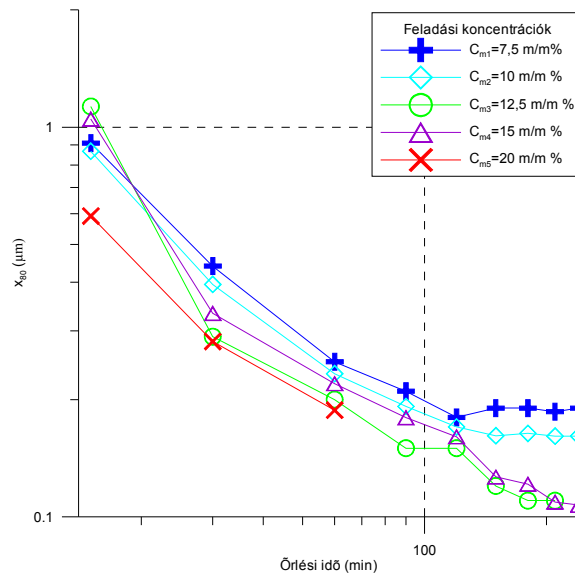
A kerületi sebesség növekményével adott idő alatt nagyobb fajlagos felületet érünk el egészen 150 percig. 150 perc után mind a v_2 , v_3 , v_4 pontjai a v_5 fölé emelkednek, sőt a 240 perchez tartozó v_1 -es fajlagos felület ($19,4648 \text{ m}^2/\text{g}$) is nagyobb, mint a v_5 -é ($19,0274 \text{ m}^2/\text{g}$). Legnagyobb fajlagos felülete a v_3 kerületi sebesség 240 perces őrlményének van ($24,379 \text{ m}^2/\text{g}$), ezt követi a v_2 240 perces terméke ($22,6144 \text{ m}^2/\text{g}$), a v_5 ($20,0089 \text{ m}^2/\text{g}$ 150 percnél), majd a v_4 $19,9522 \text{ m}^2/\text{g}$ értéke 210 percnél és végül a v_1 ($19,4648 \text{ m}^2/\text{g}$ 240 percnél).

II. sorozat

A II. sorozatban a feladási koncentráció őrlési finomságra gyakorolt hatását vizsgáltam. Megállapítható, hogy az őrlési idő előrehaladtával csökken a szemcseméret, azonban nem lineárisan (17. ábra). Legtöbb esetben 210-240 perc őrlést követően ($C_m=7,5 \text{ m/m } \%$ -os estében 120 percnél) elérjük a minimális szemcseméretet, további őrléssel már nem vagy csak nagyon nehezen érünk el x_{80} csökkenést, beáll a rendszer.

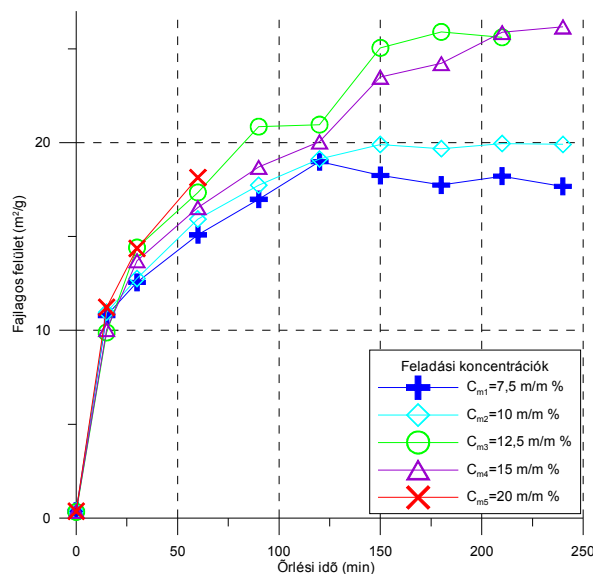
Jól látható, hogy a koncentráció növekedése javítja az őrlhetőséget, azaz hamarabb érünk el azonos finomságot nagyobb koncentrációk esetén, mint kisebb szilárdanyag tartalmú feladással, viszont a viszkozitás is növekszik a koncentrációval, mint ahogy azt már a kísérleti vizsgálatoknál bemutattam (a $C_m=12,5 \text{ m/m } \%$ -os és $C_m=20 \text{ m/m } \%$ -os feladású őrléseket 210 és 60 perc után le is kellett állítanom).

Legkisebb x_{80} -al a $15 \text{ m/m } \%$ -os kísérlet 240 perces őrlménye jellemezhető ($0,10715 \mu\text{m}$), azonban érdekes megfigyelni, hogy végig a második legfinomabb végtermékkel rendelkező $12,5 \text{ m/m } \%$ -os ($x_{80}=0,11 \mu\text{m}$ 210 percnél) kísérlet görbéje a $15 \text{ m/m } \%$ -os alatt fut, vagyis, ha 210 perc után nem kell leállítani valószínűleg finomabb terméket is kaphattunk volna.



17. ábra x_{80} változása az őrlési idő függvényében különböző feladási koncentrációk esetén

Érdekes továbbá az is, hogy a magasabb koncentrációjú (15 m/m %) őrlést 4 órán keresztül tudtam végezni, ellenben a 2,5 %-al kisebb koncentrációjú kísérlettel, melynek háttérében a magas hőmérséklet állhat (43 °C), szemben a 15 m/m %-osnál mért 40 °C-al (a 15 m/m %-os is jelentősen besűrűsödött, de még folyamatos maradt az őrlőkörfolyamat). A 12,5 m/m %-ost követi a 10 tömegszázalékos 0,1612 μm x_{80} -al 210 percnél, a 0,1765 μm x_{80} -ú 7,5 m/m %-os 120 percet követően, végül pedig a 20 m/m %-os 0,1878 μm -es x_{80} -al 60 perc után. Érdekes azonban megjegyezni, hogy egyik esetben sem volt tapasztalható olyan finom termék 60 perc őrlést követően, mint a 20 m/m %-os esetben, mint ahogy a 17. ábrán is látszik, görbéje az összes többi alatt fut.



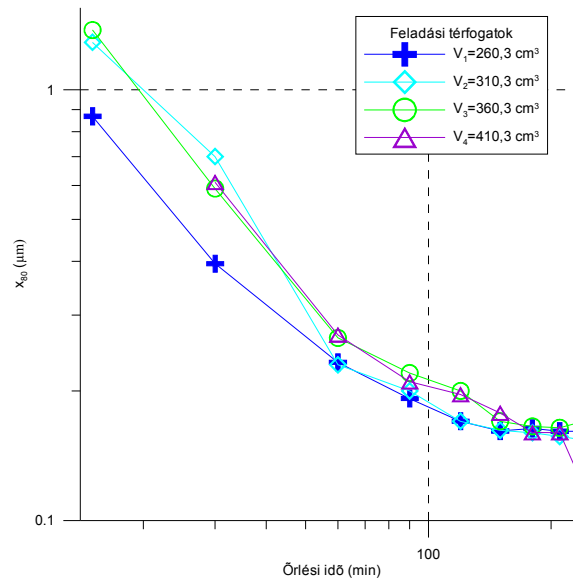
18. ábra fajlagos felület változása az őrlési idő függvényében különböző feladási koncentrációk esetén

Az 18. ábrán a fajlagos felület növekedését figyelhetjük meg, mely fordított arányosságot mutat az előbbi szemcsemérettel. Látható a görbék kezdeti gyors emelkedése, majd adott őrlési idő után a mérési pontok közel állandó értékre való beállása. A koncentráció növekedése az adott őrlési időhöz tartozó fajlagos felület növekedésével jár, azonban a 12,5 m/m %-os és 15 m/m %-os görbéknél itt is észrevehetjük azok várttal ellentétes lefutását, azaz a kisebb koncentráció nagyobb fajlagos felületet eredményezett ugyanazoknál az őrlési időknél, igaz előbbit 210 perc után leállítottam, így legnagyobb értéknek a 15 tömegszázalékos 240 perces őrlménye adódott ($26,16741 \text{ m}^2/\text{g}$), amitől nem sokkal marad el a 12,5 m/m %-os 180 perces terméke ($25,89815 \text{ m}^2/\text{g}$). Ezt követi a 10 m/m %-os 210 perces őrlménye ($19,9522 \text{ m}^2/\text{g}$), majd a 7,5 m/m %-os 120 perchez tartozó értéke ($18,9837 \text{ m}^2/\text{g}$), végül pedig a 20 m/m %-os 60 perces termék ($18,13519 \text{ m}^2/\text{g}$). Érdekes megfigyelni, hogy kb. hasonló fajlagos felületet (kb. $18\text{-}19 \text{ m}^2/\text{g}$) feleannyi idő alatt értünk el a legnagyobb koncentrációjú feladással, mint a legkisebbel.

III. sorozat

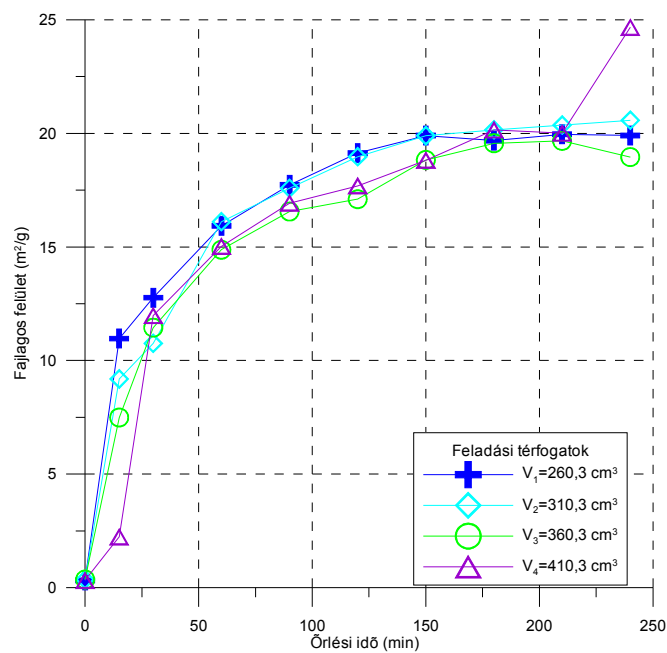
A feladási térfogat őrlési finomságra kifejtett hatásának vizsgálata érdekében azonos koncentrációjú, emelt térfogatú kísérleteket végeztem (megemelve az eredeti térfogatot 50, 100, ill. 150 cm^3 -rel). Itt is megállapítható, mint a másik két sorozatnál, hogy az idő előrehaladtával csökken a szemcseméret, melynek tendenciája lineáristól eltérő (19. ábra). 210, 240 perc őrlés után lényeges x_{80} változás nem tapasztalható, ha a pontokat összekötjük, közel egyenest kapunk a legvégső szakaszon.

150 percig a legkisebb térfogat esetén csökken leginkább az ugyanazon idő alatt elérhető x_{80} értéke, vagyis a vártak megfelelően alakulnak a görbék, hiszen ugyanazon anyag nagyobb mennyiségben történő őrléséhez több időre van szükség, lassabb a szemcseméret csökkenés mértéke.



19. ábra x_{80} változása az őrlési idő függvényében különböző feladási térfogatok esetén

180 percnél a szemcseméreték közel azonosak, 210 percnél legfinomabbnak a V_2 adódott, míg érdekes módon 240 perc őrlés után a legnagyobb térfogatú feladás (V_4) eredményezte a legfinomabb terméket ($x_{80}=0,12 \text{ μm}$), megelőzve ezzel az összes feladás legfinomabb őrleményét. Második legfinomabb a V_2 240 perces terméke volt ($x_{80}=0,154 \text{ μm}$), amit az eredeti feladási térfogat (V_1) 210 perchez tartozó értéke ($x_{80}=0,1612 \text{ μm}$) követett, majd végül a V_3 210 perces őrleménye ($x_{80}=0,1642 \text{ μm}$).



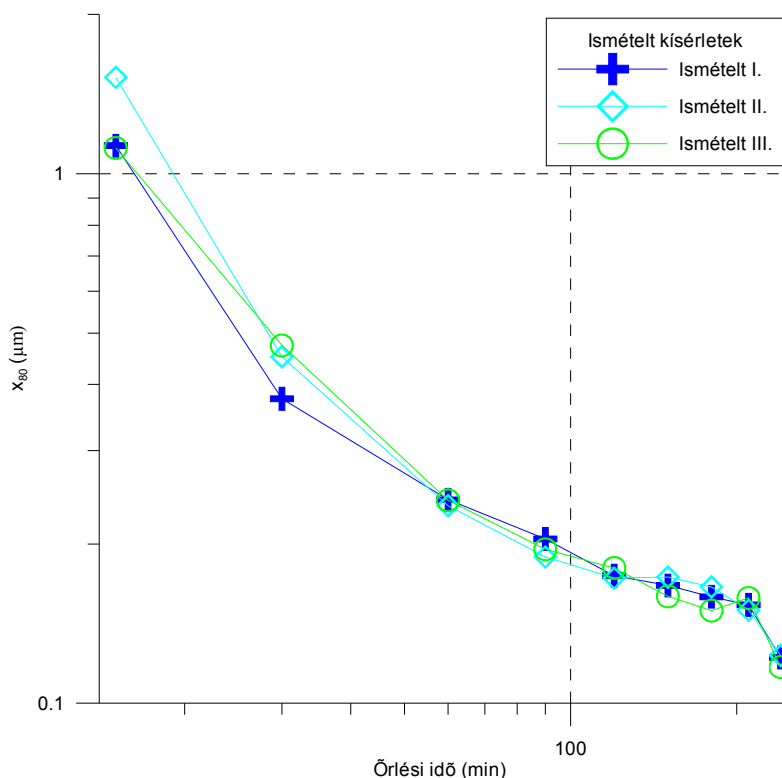
20. ábra Fajlagos felület változása az őrlési idő függvényében különböző feladási térfogatok esetén

Ahogy azt már az előző két sorozat fajlagos felületeinek elemzésénél láthattuk, itt is növekedés volt tapasztalható, melynek mértéke csökkent az őrlési folyamat során, elértünk egy közel állandó értéket (20. ábra).

A mértékadó szemcseméret változásával összefüggésben az eredeti térfogatú feladás nagyobb fajlagos felületet eredményezett azonos idő alatt, mint az emelt térfogatúak kb. 150 percig, ezt követően a V_2 , V_4 pontjai a V_1 fölé kerülnek. Legnagyobb fajlagos felülete összhangban a legkisebb x_{80} -al a V_4 feladás 240 perces őrleményének lett ($24,66444 \text{ m}^2/\text{g}$), amit a V_2 240 percig őrlött terméke követ ($20,57444 \text{ m}^2/\text{g}$), majd a V_1 (210 percnél, $19,9522 \text{ m}^2/\text{g}$), végül a V_3 (210 percnél $19,66704 \text{ m}^2/\text{g}$).

(Látszólag a V_4 görbénél további emelkedés következne, a pontokat összekötve közel sem vízszintes a 210 és 240 perc közötti szakasz, ezért tovább folytattam az őrlést. 270 percnél lényeges visszaesést tapasztaltam a $20,22519 \text{ m}^2/\text{g}$ -os értékkel, 300 percnél az előzőhöz hasonló fajlagos felületet kaptam $20,61852 \text{ m}^2/\text{g}$, 330 percnél $20,38037 \text{ m}^2/\text{g}$, majd 360 percnél $20,27444 \text{ m}^2/\text{g}$ -ot. Egyértelműen látszik, hogy 270 percnél beállt a fajlagos felület közel állandó értékre.)

IV. sorozat



21. ábra x_{80} változása az őrlési idő függvényében az ismételt kísérletek esetén

Ezt a sorozatot azért végeztem, hogy megállapítsam a kísérletek reprodukálhatóságát. A 21. és 25. ábrák görbéi alapján megállapítható, hogy lefutásuk közel azonos, jól illeszkednek egymásra. Különbségek főként a folyamat elején figyelhetők meg, 30 percnél közelítenek egymáshoz a pontok, 60 percnél szinte egybe esnek, 90 és 120 percnél kicsit távolodnak egymástól, de itt sem nagy a különbség, 150 és 180 percnél lesz legnagyobb a differencia, majd 210 és 240 perc után visszaáll a 120 percnél tapasztalt különbséghez hasonlóra.

4. táblázat x_{50} relatív szórásainak értéke különböző őrlési időknél

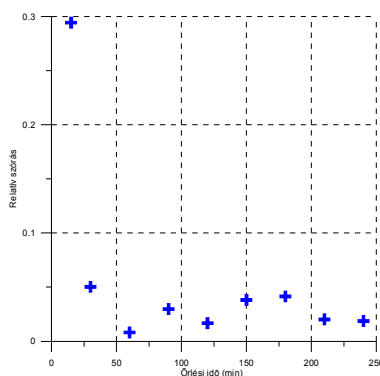
Őrlési idő (min)	Relatív szórás
15	0,294298477
30	0,050269755
60	0,008099268
90	0,029809736
120	0,016653912
150	0,038162873
180	0,041407456
210	0,020174594
240	0,018696969

5. táblázat x_{80} relatív szórásainak értéke különböző őrlési időknél

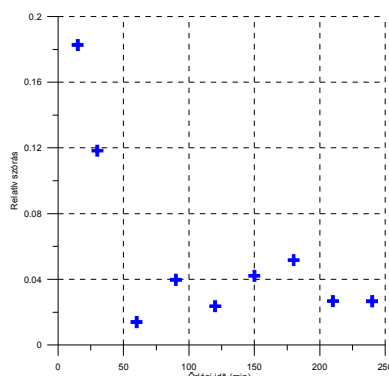
Őrlési idő (min)	Relatív szórás
15	0,182684918
30	0,118312003
60	0,013998791
90	0,03969977
120	0,023587832
150	0,042128922
180	0,05170953
210	0,026718202
240	0,02661786

6. táblázat Fajlagos felületek relatív szórásainak értéke különböző őrlési időknél

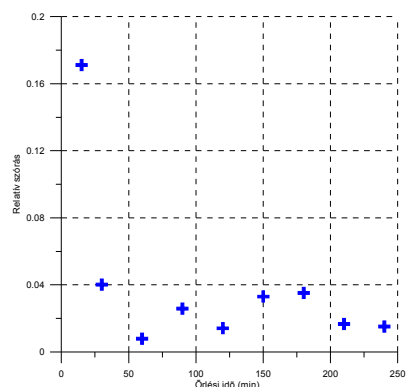
Őrlési idő (min)	Relatív szórás
15	0,171071475
30	0,040084671
60	0,007859107
90	0,025850746
120	0,014127825
150	0,033040273
180	0,035273482
210	0,016712781
240	0,015127972



22. ábra x_{50} relatív szórásai különböző őrlési időknél



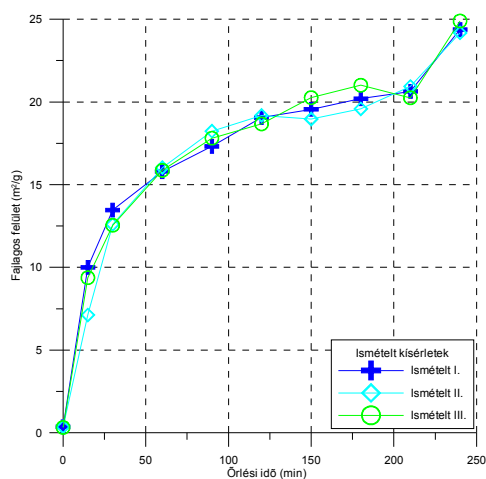
23. ábra x_{80} relatív szórásai különböző őrlési időknél



24. ábra Fajlagos felületek relatív szórásai különböző őrlési időknél

Hasonló állapítható meg 4-6. táblázatok és 22-24.- ábrák alapján. Legnagyobb szórást a 15 perces őrlmények szemcseméretei és fajlagos felületei mutatnak. A 30 perces őrlmények

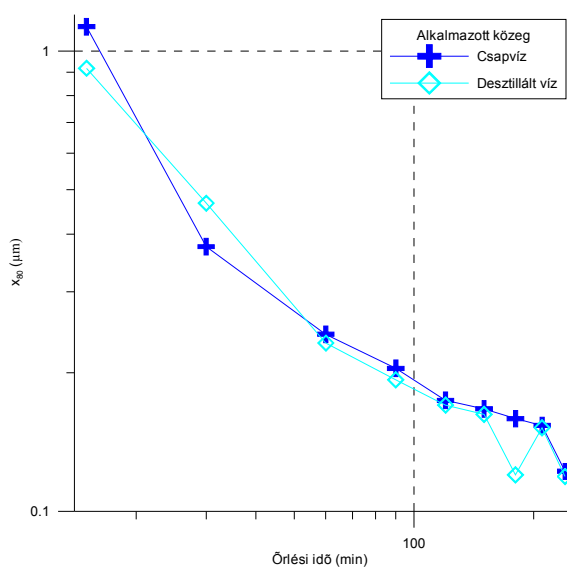
szemcseméreteinek szórásai még szintén nagyok, majd a 60 perces szórások rendkívül kicsik (mindháromnál itt a legkisebb, ezek közül is leginkább a fajlagos felületnél), ezt követően 90-150 percig változó tendenciát mutatnak (hol nőnek, hol csökkennek) végül kb. állandó értékre állnak be. Egymástól legnagyobb eltérést az x_{80} értékei között figyelhetünk meg, ezt követik az x_{50} , majd a fajlagos felületek értékeinek eltérése.



25. ábra Fajlagos felület változása az őrlési idő függvényében az ismételt kísérletek esetén

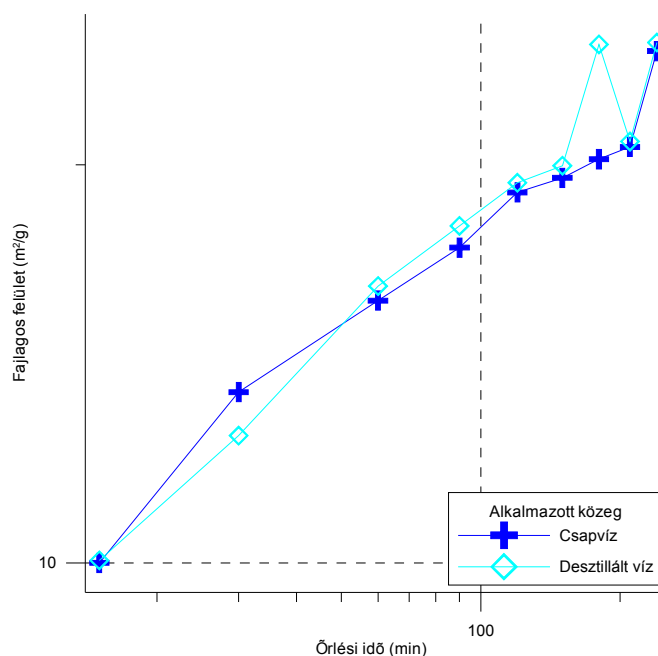
V. sorozat

Ebben a sorozatban figyeltem meg az őrlőközeg változtatásának őrlési finomságra gyakorolt hatását.



26. ábra x_{80} változása az őrlési idő függvényében csapvíz és desztillált víz őrlőközeg esetén

A 26. ábra alapján az állapítható meg, hogy jelentős szemcseméretbeli különbség nem tapasztalható, ha desztillált vizet alkalmazok. Kicsit a desztillált vízzel végrehajtott kísérlet finomabb terméket eredményezett ($x_{80}=0,11897 \mu\text{m}$ 240 perc után), mint a csapvizes ($x_{80}=0,1221 \mu\text{m}$, 240 perces őrlemény).



27. ábra Fajlagos felület változása az őrlési idő függvényében csapvíz és desztillált víz őrlőközeg esetén

A 27. ábra alapján is hasonló megállapításokat tehetek. Jelentős különbségek a fajlagos felületeknél sem figyelhetők meg (csak, akkor láthatjuk jobban az eltéréseket, ha log-log skálán ábrázoljuk a pontokat és az őket összekötő egyeneseket) az egyes őrlési közegeknél, a desztillált vízzel végrehajtott kísérletben kicsit nagyobb felületet kaptam ($24,7463 \text{ m}^2/\text{g}$, 240 perc őrlést követően), mint csapvízben ($24,379 \text{ m}^2/\text{g}$ a 240 perces őrleménynél).

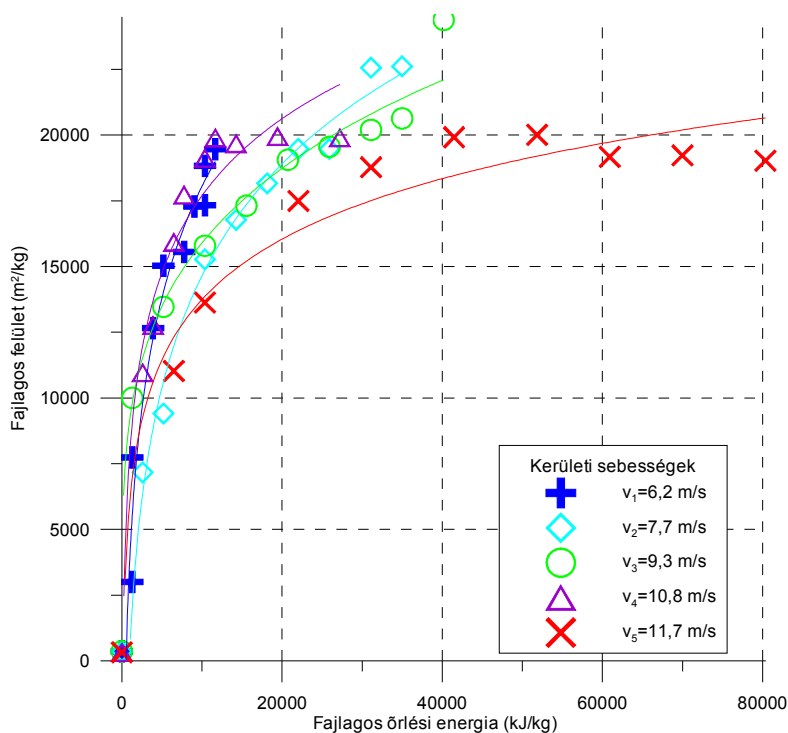
6.2. Fajlagos energiák változása az őrlések során

Gazdaságossági szempontból az őrlési energia az a jellemző, amit leginkább figyelembe kell venni egy őrlési folyamat költségeinek számítása során. Esetünkben az egységnyi fajlagos felület előállításához szükséges energiát jelenti (m^2/kJ).

Amint a Netzsch Mini Cer malom használatának leírásánál már említettem, a kezelőpanelen folyamatosan nyomon lehet követni az egyes malomjellemzők változását, köztük az energia felvételt, a számítógépes adatátvitelnek köszönhetően pedig rögzíthetjük is azokat. A 28., 30., 32., 34. ábra elkészítéséhez szükséges adatsort úgy kaptam, hogy a felvett energiaadatokat

átváltottam kJ/kg-ra egy egyszerű aránypár segítségével. Például, ha az I. sorozatban 27,78 g anyag 15 percen át történő őrléséhez felhasznált energia 0,01 kWh volt, akkor 1000 g (1 kg) őrléséhez 0,3599712 kWh/kg energia szükséges, ezt megszorozva 3600-al megkapjuk kJ/kg-ban (1296 kJ/kg). Így meg is van a 28. ábra egyik pontja.

I. sorozat



28. ábra A fajlagos felület növekedése a fajlagos őrlési energia függvényében különböző keverőtárcsa kerületi sebességek esetén

Az 28. ábra alapján megállapítható, hogy az őrlés során befektetett energia növekedésével egyre nagyobb fajlagos felületeket érünk el, a folyamat elején még kisebb energianövekmény árán, azonban elérve az őrlhetőség maximumát az adott körülmények között további (sokkal kisebb) növekedést csak jelentős energia befektetéssel nyerünk vagy, ahogy a v_5 esetén látszik még ennek ellenére sem, vagyis a görbék nem lineárisak, hanem logaritmikus, ill. hatványfüggvény szerint változnak (7. táblázat). Látható, hogy a kerületi sebesség növekedésével egyre több energiával érjük el ugyanazt a fajlagos felületet, igaz sokkal gyorsabban, mint ahogy már az előző fejezetben tárgyaltam.

Legnagyobb fajlagos felületet a v_3 esetén értünk el ($24379 \text{ m}^2/\text{kg}$) 40176 kJ/kg energia befektetéssel, amit a v_2 $22614,4 \text{ m}^2/\text{kg}$ fajlagos felülete követ 34992 kJ/kg őrlési energiával, v_5 $20008,9 \text{ m}^2/\text{kg}$ fajlagos felület 51840 kJ/kg őrlési energiával, majd a v_4 -nél $19952 \text{ m}^2/\text{kg}$ -ot

19440 kJ/kg energiával, végül a v_1 19464,8 m²/kg-ot 11664 kJ/kg-al. Ezek után, ha a két értéket elosztom egymással (csökkentve 362,5 m²/kg kiindulási fajlagos felülettel a fajlagos felületeket) megkapom, mennyi energia árán kapok 1 m² növekedést a fajlagos felület értékében ezekben az esetekben. Legnagyobb felületet egységnyi energia befektetéssel a v_1 fordulatszámú őrléssel kapok (1,6377 m²/kJ), amit a v_4 követ (1,0096 m²/kJ), majd v_2 (0,6359 m²/kJ) és v_3 (0,5978 m²/kJ), végül pedig a v_5 (0,3797 m²/kJ). Azonban ez is csalóka megközelítés, hiszen az őrlési kísérlet csak egy pontját mutatja, a folyamatok elején még 7,4363 m²/kJ értékkel is találkozhatunk (v_3 -nál), ill. nem az egységnyi energianövekedés hatására bekövetkező fajlagos felület növekedését mutatja (hiszen a folyamatok vége fele lesz ahol negatív lesz, mivel további őrlés hatására is csökkent a felület). Éppen ezért minden kísérletnél vettem az egymást követő fajlagos felületek ($S_{m(n+1)}-S_{m(n)}$) és ezekhez tartozó energiák ($E_{(n+1)}-E_{(n)}$) különbségét, majd elosztottam őket egymással, az alábbi képlet szerint.

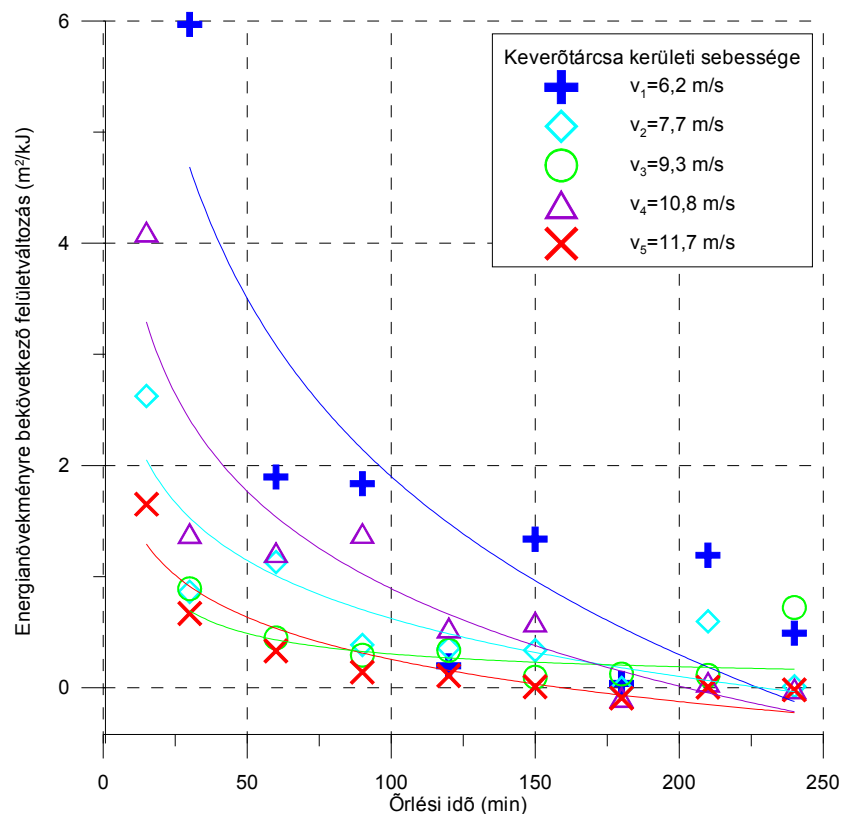
$$\text{Energianövekményre bekövetkező felületnövekedés} = \frac{S_{m(n+1)} - S_{m(n)}}{E_{(n+1)} - E_{(n)}} \quad (3)$$

Az így kapott adatsornak vettem az átlagértékét, így legkisebb energia befektetéssel járó fajlagos felület növekedést a v_1 -nél kaptam (1,6667 m²/kJ), amit v_3 követ (1,1623 m²/kJ), utána v_4 (1,0222 m²/kJ), v_2 (0,7011 m²/kJ) és végül v_5 (0,3118 m²/kJ).

7. táblázat A 28. ábra pontjaira illesztett görbék egyenlete és az eltérés nagysága

Kerületi sebesség (m/s)	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
$v_1=6,2$	$Y = 6120.751828 * \ln(X) - 38324.27159$	0.938448
$v_2=7,7$	$Y = 6146.594223 * \ln(X) - 41967.88618$	0.981409
$v_3=9,3$	$\ln(Y) = 0.2372227602 * \ln(X) + 7.48869471$	0.976538
$v_4=10,8$	$Y = 4231.174277 * \ln(X) - 21281.15023$	0.872021
$v_5=11,7$	$Y = 3316.524696 * \ln(X) - 16804.40824$	0.857023

A 7. táblázatban tüntettem fel a 28. ábra pontjaira illesztett egyenesek egyenleteit az R-négyzet értékeivel együtt. Látható, hogy legkisebb hibával a logaritmikus görbék illeszkednek (kivételez az alól a v_3 , amelynek pontjaira hatványfüggvény illeszkedik leginkább), legnagyobb hibával a v_5 esetén, ugyanis itt tér el leginkább R-négyzet értéke 1-től.



29. ábra Energianövekményre bekövetkező felületváltozás nagysága az örlési idő függvényében különböző kerületi sebességek esetén

A 29. ábrán az előbb említett egységnyi fajlagos energia növekményre bekövetkező fajlagos felület változását ábrázoltam az örlési idő függvényében. Látható, hogy a görbék lefutása a 28. ábrán látott görbék deriváltjának felel meg $\left(\frac{dS_m}{dE}\right)_t$. Az idő előrehaladtával egyre kisebb lesz az egységnyi energia befektetéssel nyerhető fajlagos felület, az anyag örölhetősége csökken. A görbék alapján megállapítható sorrend annyiban változott az ábra alapját képező adatsor átlagolt értékeihez képest, hogy a v_3 alá került a v_4 -nek és v_2 -nek, azaz a módosított sorrend v_1, v_4, v_2, v_3, v_5 .

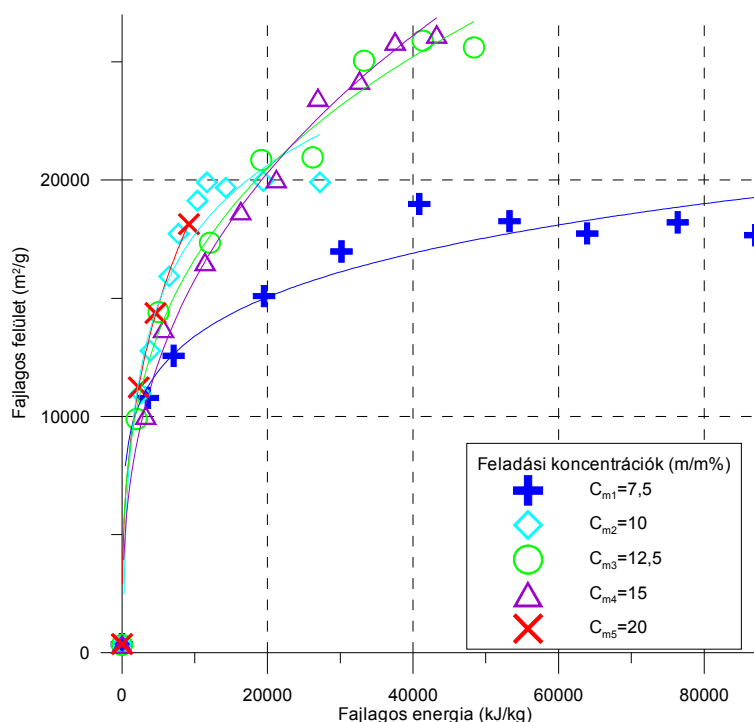
8. táblázat A 29. ábra pontjaira illesztett görbék egyenletei és az eltérések nagysága

Kerületi sebesség (m/s)	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
$v_1=6,2$	$Y = -2.312667825 * \ln(X) + 12.55179185$	0.737948
$v_2=7,7$	$Y = -0.7531712754 * \ln(X) + 4.09226937$	0.766556
$v_3=9,3$	$\ln(Y) = -1.164706721 * \ln(X) + 4.336023775$	0.653377
$v_4=10,8$	$Y = -1.264696276 * \ln(X) + 6.716455275$	0.842648
$v_5=11,7$	$Y = -0.5471202953 * \ln(X) + 2.775237347$	0.865941

A 8. táblázatban tüntettem fel a 29. ábra pontjaira illesztett egyenesek egyenleteit az R-négyzet értékeivel együtt. Látható, hogy legkisebb hibával a logaritmikus görbék illeszkednek (kivétel ez alól a v_3 , amelynek pontjaira hatványfüggvény illeszkedik leginkább), legnagyobb hibával a v_3 esetén, ugyanis itt tér el leginkább R-négyzet értéke 1-től.

II. sorozat

A 30. ábra alapján megállapítható, hogy az őrlés során befektetett energia növekedésével egyre nagyobb fajlagos felületeket kapunk. A folyamat elején még kisebb energia árán, azonban elérve az őrlhetőség maximumát az adott körülmények között további (sokkal kisebb) növekedést csak jelentős energia befektetéssel nyerünk vagy, ahogy a C_{m1} esetén látszik még ennek ellenére sem, vagyis a görbék nem lineárisak, hanem hatványfüggvény szerint, ill. logaritmikusan változnak (9. táblázat).



30. ábra A fajlagos felület növekedése a fajlagos őrlési energia függvényében különböző feladási koncentrációk esetén

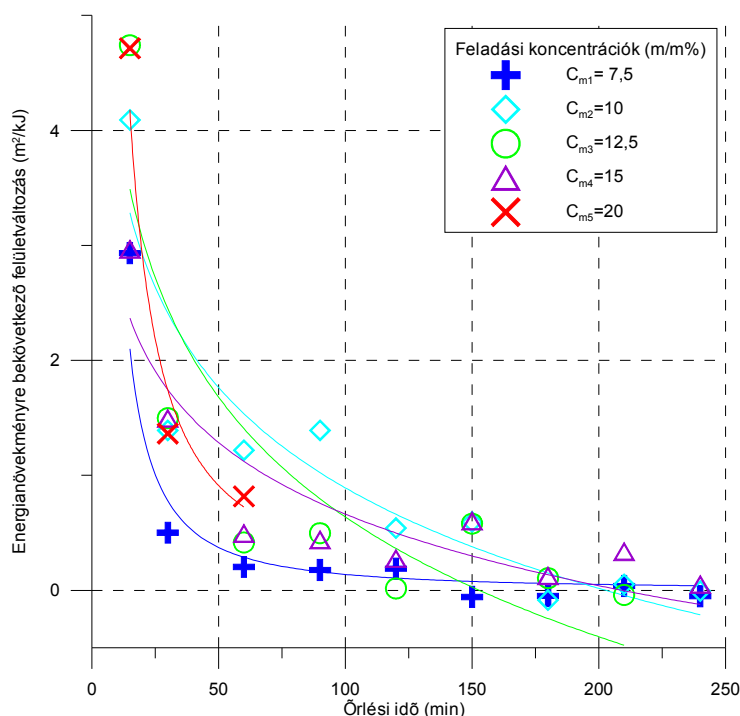
A koncentráció növekedése pozitívan befolyásolja az őrlési folyamatot, azaz nem csak finomabb terméket nyerünk rövidebb idő alatt, de az ehhez szükséges energia is kevesebb lesz. (Nyilván ez betudható annak is, hogy a növekvő koncentrációk nagyobb szilárd anyag

menyiséget is jelentenek, így ugyanazon körülmények között végzett őrlések esetén ugyanaz az energia nagyobb tömegben oszlik meg.) Azt kell megállapítani, hogy melyik az a koncentráció, amely elegendően nagy ahhoz, hogy legkevesebb energiával a legfinomabb szemeket állítsuk elő a viszkozitás túlzott növekedése nélkül (lásd. 20 m/m %-os kísérlet).

9. táblázat A 30. ábra pontjaira illesztett görbék egyenletei és az eltérések mértéke

Feladási koncentráció (m/m%)	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
$C_{m1}=7,5$	$\ln(Y) = 0.1683272388 * \ln(X) + 7.951615643$	0.909456
$C_{m2}=10$	$Y = 4231.174277 * \ln(X) - 21281.15023$	0.872021
$C_{m3}=12,5$	$\ln(Y) = 0.2998277182 * \ln(X) + 6.958261517$	0.981814
$C_{m4}=15$	$\ln(Y) = 0.3635100872 * \ln(X) + 6.318188081$	0.988619
$C_{m5}=20$	$\ln(Y) = 0.3460259979 * \ln(X) + 6.649170218$	0.999718

A 31. ábrán az egységnyi fajlagos energia növekményre bekövetkező fajlagos felület változását ábrázoltam az őrlési idő függvényében. Az idő előrehaladtával egyre kisebb lesz az egységnyi energia befektetéssel nyerhető fajlagos felület, az anyag őrlhetősége csökken.



31. ábra Energianövekményre bekövetkező felületváltozás nagysága az őrlési idő függvényében különböző feladási koncentrációk esetén

Megállapítható, hogy legkevesebb energia árán a 10 m/m %-os esetben érjük el ugyanazt a fajlagos felületet, ezt követik a C_{m3} és C_{m4} , igaz utóbbi görbéje C_{m3} fölé kerül 100 perc után,

majd a C_{m5} és C_{m1} . Ha átlagát veszem a görbe adatsorát képező értékeknek az egyes koncentrációk esetén ugyancsak a C_{m2} -nél lesz legnagyobb az egységnyi energianövekményhez tartozó felületnövekedés értéke ($1,0207 \text{ m}^2/\text{kJ}$). Ezt követi a C_{m3} ($0,9762 \text{ m}^2/\text{kJ}$), majd C_{m4} ($0,7549 \text{ m}^2/\text{kJ}$) és C_{m1} ($0,4314 \text{ m}^2/\text{kJ}$). A C_{m5} -nél képzett átlagérték $2,2988 \text{ m}^2/\text{kJ}$, azonban mivel az őrlést 60 perc után leállítottam nem veszem azt figyelembe, hiszen a folyamat elején még jól őrlhető az anyag, így az egységnyi energiával kapott felület is nagyobb lesz (a $12,5 \text{ m/m } \%$ -os esetben is $4,7409 \text{ m}^2/\text{kJ}$ a 15 perchez tartozó érték).

10. táblázat A 31. ábra pontjaira illesztett görbék egyenletei és az eltérések mértéke

Feladási koncentráció (m/m%)	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
$C_{m1}=7,5$	$\ln(Y) = -1.435669382 * \ln(X) + 4.630279215$	0.921198
$C_{m2}=10$	$Y = -1.261179023 * \ln(X) + 6.699075739$	0.843325
$C_{m3}=12,5$	$Y = -1.503399356 * \ln(X) + 7.56141203$	0.760469
$C_{m4}=15$	$Y = -0.898510505 * \ln(X) + 4.800409248$	0.826059
$C_{m5}=20$	$\ln(Y) = -1.263868229 * \ln(X) + 4.851892525$	0.945516

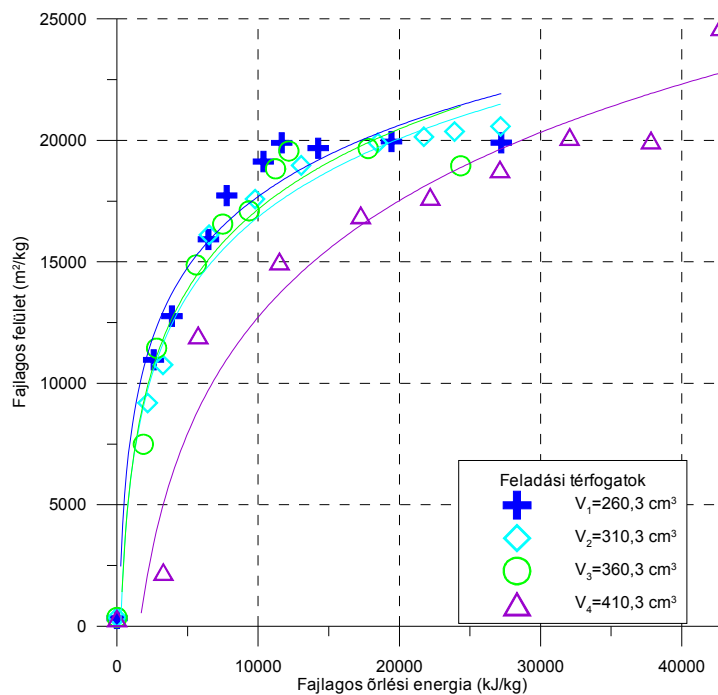
A 10. táblázatban tüntettem fel a 31. ábra pontjaira illesztett egyenesek egyenleteit az R-négyzet értékeivel együtt. Látható, hogy legkisebb hibával a logaritmikus görbék illeszkednek (kivétel ez alól a C_{m1} és C_{m5} amelynek pontjaira hatványfüggvény illeszkedik leginkább), legnagyobb hibával a C_{m3} esetén, ugyanis itt tér el leginkább R-négyzet értéke 1-től.

III. sorozat

A 32. ábra alapján itt is megállapítható, hogy az őrlés során befektetett energia növekedésével egyre nagyobb fajlagos felületeket kapunk. A folyamat elején még kisebb energia árán, azonban elérve az őrlhetőség maximumát az adott körülmények között további (sokkal kisebb) növekedést csak jelentős energia befektetéssel nyerünk, vagyis a görbék nem lineárisak, hanem logaritmikusan változnak (11. táblázat).

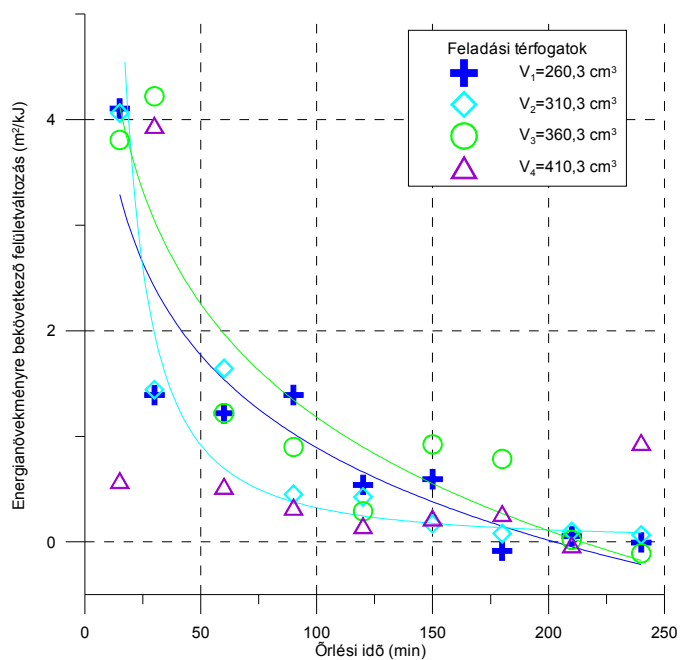
11. táblázat 32. ábra pontjaira illesztett görbék egyenletei és az illesztési hibák

Feladási térfogat (cm ³)	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
$V_1=260,3$	$Y = 4231.174277 * \ln(X) - 21281.15023$	0.872021
$V_2=310,3$	$Y = 4651.323164 * \ln(X) - 25995.99907$	0.963225
$V_3=360,3$	$Y = 4765.385108 * \ln(X) - 26727.04258$	0.904473
$V_4=410,3$	$Y = 6920.177251 * \ln(X) - 51012.90219$	0.914437



32. ábra A fajlagos felület növekedése a fajlagos őrlési energia függvényében különböző feladási térfogatok esetén

Jól látszik, hogy nagyobb feladási térfogatok esetén több energiát kell befektetnünk ugyanazon felület eléréséhez. A V_3 -nál legjobb a felületnövekedés mértéke (ha a pontokat veszem figyelembe), ezt követi V_1 , majd V_2 , végül pedig V_4 .



33. ábra Energianövekményre bekövetkező felületváltozás nagysága az őrlési idő függvényében különböző feladási térfogatok esetén

A 33. ábra alapján hasonló megállapításokat tehetünk, mint az előbb, vagyis legnagyobb fajlagos felület ugyanazon energiával a V_3 -nál kapunk ($1,3395 \text{ m}^2/\text{kJ}$), ezt követi V_1 ($1,0222 \text{ m}^2/\text{kJ}$), majd V_2 ($0,937 \text{ m}^2/\text{kJ}$) végül V_4 ($0,7736 \text{ m}^2/\text{kJ}$).

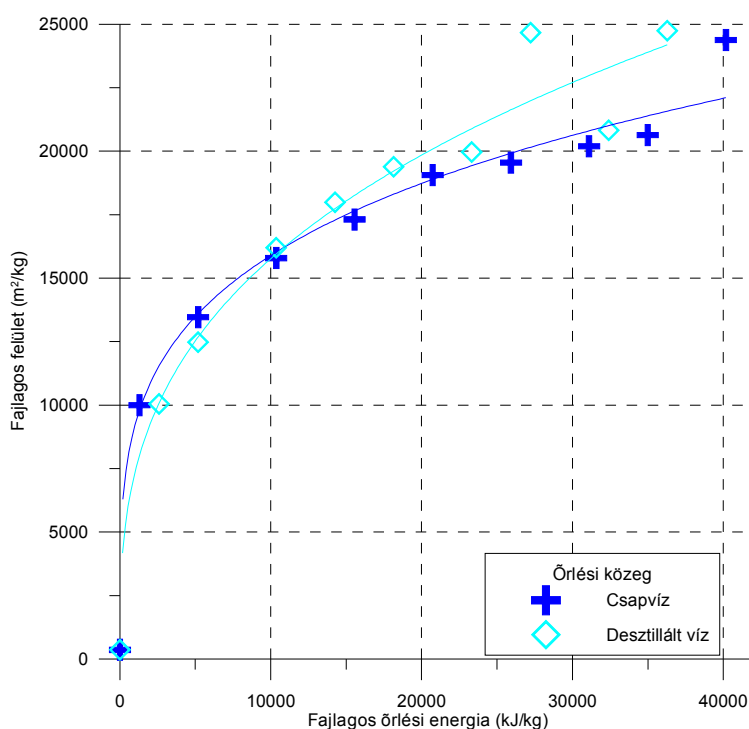
12. táblázat 33. ábra pontjaira illesztett görbék egyenletei és az eltérések mértéke

Feladási térfogat (cm^3)	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
$V_1=260,3$	$Y = -1.264696276 * \ln(X) + 6.716455275$	0.842648
$V_2=310,3$	$\ln(Y) = -1.504630851 * \ln(X) + 5.800304807$	0.906931
$V_3=360,3$	$Y = -1.54935853 * \ln(X) + 8.315467149$	0.84922
$V_4=410,3$	$Y = -0.6152969038 * \ln(X) + 3.543999513$	0.2242

A 12. táblázat alapján látszik, hogy leginkább a logaritmikus görbék illeszthetőek a 33. ábra pontjaira, kivétel V_2 -nél, ugyanis itt hatványfüggvény a legjobb választás. A V_4 görbét nem is ábrázoltam, mivel a pontok jelentősen eltérnek, de a logaritmikus görbe volt, ami legjobban illeszkedett azokra.

V. sorozat

Az őrlőközeg változásának őrlési energiára gyakorolt hatását láthatjuk a 34. ábrán.



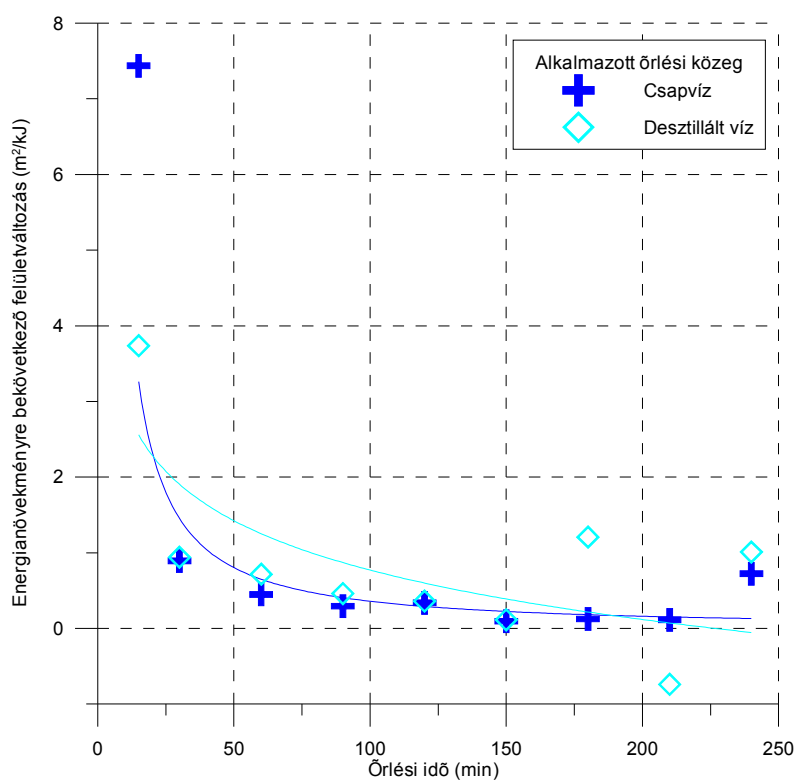
34. ábra A fajlagos felület változása a fajlagos őrlési energia függvényében csapvíz és desztillált víz esetén

Megállapítható, hogy desztillált vízben könnyebben érjük el ugyanazt a felületet a folyamat előrehaladtával (60 perc után), mint csapvízben.

13. táblázat A 34. ábra pontjaira illesztett görbék egyenletei és az eltérés mértéke

Őrlési közeg	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
Csapvíz	$\ln(Y) = 0.2372227602 * \ln(X) + 7.48869471$	0.976538
Desztillált víz	$\ln(Y) = 0.3318795735 * \ln(X) + 6.609038056$	0.959779

A 13. táblázat alapján megállapítható, hogy legjobban a hatványfüggvény görbék illeszkednek a mért pontokra, legnagyobb eltéréssel a desztillált vizes kísérlet esetén.



35. ábra Energianövekményre bekövetkező felületváltozás nagysága az őrlési idő függvényében csapvíz és desztillált víz őrlőközeg esetén

Habár a 35. ábrához használt adatsor átlagának képzése során nagyobbak a csapvízzel őrlött kísérlet értékei adódtak (1,1623 m²/kJ) (köszönhetően az első 15 perces kiugró értéknek), azonban világosan látszik, hogy a desztillált vizes kísérlet pontjai és görbéi a csapvizes fölött futnak, azaz itt hatékonyabb az őrlés.

14. táblázat A 35. ábra pontjaira illesztett görbék egyenletei és az eltérések mértéke

Örlési közeg	Illesztett görbe egyenlete	R-négyzet
Csapvíz	$\ln(Y) = -1.164706721 * \ln(X) + 4.336023775$	0.653377
Desztillált víz	$Y = -0.9423455324 * \ln(X) + 5.109558384$	0.525753

A 14. táblázatban tüntettem fel a 35. ábra pontjaira illesztett görbék egyenleteit. A csapvízben őrlött esetben legjobban a hatványfüggvény, míg a desztillált vizes kísérletnél a logaritmikus függvény illeszkedett leginkább, igaz mindkét esetben jelentős eltéréssel.

7. Konklúziók

Az öt kísérletsorozat eredményeinek kiértékelése alapján a következő megállapításokat teszem:

- A kísérletsorozatok eredményeként megállapítható, hogy sikeresen állítottam elő szubmikronos, nano mérethez közeli szemcséket (legjobb elért finomságot a $v=10,8$ m/s-os kerületi sebességgel, 1mm átmérőjű őrlőgolyókkal őrlött, 15 tömegszázalék koncentrációjú feladás 240 perces termékeként: $x_{50}=0,08543 \mu\text{m}$; $x_{80}=0,10715 \mu\text{m}$; $S_m=26,16741 \text{ m}^2/\text{g}$).
- Az őrlési folyamatban 150 percig fennáll az alábbi állítás; minél nagyobb a malom fordulatszáma, azaz a keverőtárcsa kerületi sebessége annál rövidebb idő alatt érjük el ugyanazt a finomságot, vagyis a szemcseméret csökkenés, ill. fajlagos felület növekedés mértéke gyorsabb.
- 150 percet követően a kisebb fordulatszámokkal finomabb végterméket nyerünk, legfinomabb terméket a 9,3 m/s-os kerületi sebesség eredményezett ($x_{80}=0,1221 \mu\text{m}$; $S_m=24,379 \text{ m}^2/\text{g}$ 240 perc őrlést követően), azonban energetikai hatékonyság szempontjából a legkisebb keverőtárcsa kerületi sebességű (6,2 m/s) őrléssel kapunk ugyanazon energia árán legnagyobb felületet (teljes őrlési folyamatra jellemző átlagértéke; $1,67 \text{ m}^2/\text{kJ}$), melynek nagysága az (összes) őrlési folyamat elején nagyobb, majd az idő előrehaladtával csökken, azaz csökken az őrlési hatékonyság.
- A koncentráció növekedése javítja az őrlhetőséget, azaz hamarabb érünk el azonos finomságot nagyobb koncentrációk esetén, mint kisebb szilárdanyag tartalomnál, viszont a viszkozitás is növekszik, így pl. a 20 m/m %-os esetben hamarabb (60 perc után) le kellett állítani a folyamatot. Legjobb finomságot a 15 m/m %-os feladás 240

perces őrlménye eredményezett ($x_{80}=0,10715 \text{ } \mu\text{m}$; $S_m=26,16741 \text{ m}^2/\text{g}$), míg energetikailag leghatékonyabbat a 10 m/m %-os ($1,0207 \text{ m}^2/\text{kJ}$).

- 150 percig a térfogat csökkenésével javul az ugyanazon idő alatt elérhető termék finomsága, azonban a folyamatok végére (240 percnél) a legnagyobb térfogatú feladás ($410,3 \text{ cm}^3$) végterméke lett a legfinomabb ($x_{80}=0,12 \text{ } \mu\text{m}$; $S_m=24,66444 \text{ m}^2/\text{g}$), ami energia szempontjából gazdaságtalan, hiszen itt volt a legkisebb az ugyanazon energia befektetéssel nyerhető fajlagos felület nagysága ($0,7736 \text{ m}^2/\text{kJ}$).
- Az ugyanazon körülmények között megismételt kísérletek eredményeképpen megállapítható, hogy a reprodukálhatóság az őrlés kezdeti szakaszában nem megfelelő (nagy a szórás), azonban 60 percnél és e fölött kiváló.
- Az adott energia árán elérhető fajlagos felületek pontjaira illeszthető görbék logaritmikus, ill. hatványfüggvény szerint változnak.
- További célom az őrlések során végbemenő kristályszerkezeti változások nyomon követése röntgendiffrakciós diffraktométerrel. A későbbiekben stabilizátorok alkalmazásának vizsgálatát is tervezem.

8. Összefoglalás

A mészke ultrafinom őrlése előtt szakirodalmi kutatást végeztem, melynek középpontjában keverőmalmi kísérletek rövid összefoglalása állt. A Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet Netzsch Mini Cer típusú keverőmalom használatának elsajátítása után öt kísérletsorozatot hajtottam végre, amely esetén változó paraméterek a keverő tárcsa kerületi sebessége, a feladási koncentrációk, feladási térfogatok, őrlőközeg és az őrlési idők voltak. Három azonos körülmények között végrehajtott kísérletet végeztem a mérések reprodukálhatóságának vizsgálata érdekében. A kísérletek során OMYA-ból származó mészkevet őrltem, őrléskor mintákat vettem, ezek lézeres szemcseméret elemző berendezésben kerültek vizsgálat alá. A kísérletek menetét és a kísérletek eredményeit részletesen ismerttettem, majd az ezekből levonható következtetéseket állapítottam meg, és kijelöltem a későbbi kísérletek, kutatások irányát.

9. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni konzulenseimnek; Prof. Dr. Csőke Barnabás egyetemi tanárnak és Dr. Mucsi Gábor egyetemi adjunktusnak, hogy felkeltették érdeklődésemet a téma iránt, kijelölték kutatásaim irányát, hasznos tanácsokkal láttak el és segítettek a felmerülő problémák megoldásában is. Segítségük nélkül jelen dolgozat sem készülhetett volna el. A Miskolci Egyetem tudományos diákköri tevékenységét a TÁMOP-4.2.2.B/10/1-2010-0008 számú projekt támogatta.

10. Szakirodalmi jegyzék

1. Mannheim Viktória – Keverőmalmok bemutatása és alkalmazási előnyei (Építőanyag 2006/4. 113-117. o.)
2. Singh A. Kwade, W. Peukert: Potential and constraints of nanomilling in stirred media mills. 11th European Symposium on Comminution, Budapest (2006)
3. Frank Stenger, Stefan Mende, Jörg Schwedes, Wolfgang Peukert – Nanomilling in stirred media mills (Chemical Engineering Science 60 (2005) p. 4557 – 4565)
4. Dr. Mucsi Gábor – Nano szemcseméret-tartományú őrlés keverőmalomban (kézirat, 2006)
5. M. Gao, R. Holmes, J. Pease: The latest developments in ultrafine grinding technologies. XXIII. International Mineral Processing Congress, Istanbul (2006)
6. Molnár Zoltán – Nanoméretű részecskék előállításának alapkísérletei keverőmalomban TDK dolgozat (2010)
7. Gábor Mucsi, Zoltán Molnár, Barnabás Csőke – Preliminary experiments of nano-particle production in stirred media mill (XXV. microCAD International Scientific Conference 31 March – 1 April 2011, Section: Material Science, Material Processing Technologies p: 35-40.