



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI FÖLDTUDOMÁNYI KAR
NYERSANYAGELŐKÉSZÍTÉSI ÉS KÖRNYEZETI
ELJÁRÁSTECHNIKAI INTÉZET



HULLADÉKOK DUGATTYÚS PRÉSSSEL TÖRTÉNŐ KOMPAKTÁLÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Doktori (PhD) értekezés

Készítette:

Nagy Sándor

okl. előkészítéstechnikai mérnök

Tudományos témavezetők:

Prof. Dr. habil. Csőke Barnabás

egyetemi tanár

Dr. Faitli József

egyetemi docens

MIKOVINY SÁMUEL FÖLDTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

A doktori iskola vezetője: Dr. Lakatos István

egyetemi tanár, MTA levelező tagja

2012. július 9.

Tartalomjegyzék

Jelölések jegyzéke	4
1 BEVEZETÉS	7
2 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	8
2.1 Nyomással történő agglomerálás	8
2.2 Kötésmechanizmusok, kötőerők	12
2.2.1 Adhéziós erők	13
2.2.2 Kis viszkozitású nedvesítő folyadékkal történő kötés	15
2.2.3 Nagy viszkozitású folyadékokkal történő kötések	16
2.2.4 Alaki kötések	17
2.3 Kötőanyagok	17
2.4 Elméleti húzószilárdság	19
2.5 Tablettázás elméleti háttere	21
2.5.1 Kompresszibilitás	21
2.5.2 Tömöríthetőség	24
2.5.3 Tablettázás erő-elmozdulás diagramja	26
2.6 Brikettek minősítése	26
2.6.1 Nyomószilárdság vizsgálata	26
2.6.2 Húzószilárdság vizsgálata	27
2.6.3 Hajlítószilárdság vizsgálata	29
2.6.4 Ejtési vizsgálat	29
2.6.5 Morzsolódás vizsgálata	29
3 VIZSGÁLATI BERENDEZÉSEK ÉS ÉRTÉKELESI MÓDSZEREK	31
3.1 Kísérleti munka leírása	31
3.2 Kísérleti berendezés	31
3.3 A törési szilárdság meghatározására szolgáló berendezés	33
3.4 Brikettek minősítése	33
3.4.1 Tablettá sűrűség meghatározása	34
3.4.2 Közvetett húzószilárdság vizsgálat	34
4 ÁSVÁNYOS POR KÖTŐANYAGGAL TÖRTÉNŐ AGGLOMERÁLÁSA	35
4.1 Szilícium karbid	35
4.2 Szilícium karbid por minta eljárás technikai vizsgálata	36
4.3 Kötőanyagok	37
4.4 Kötőanyag kiválasztására irányuló kísérletek	38
4.5 Szilícium karbid tablettázása csemperagasztóból kinyert kötőanyaggal	40
4.5.1 Sűrűség – nyomás összefüggése	41
4.5.2 Befektetett munka	48
4.5.3 Húzószilárdság	52
4.5.4 Eredmények összefoglalása	58
5 HETEROGÉN, SZÁLAS HULLADÉKOK NYOMÁSSAL TÖRTÉNŐ AGGLOMERÁLÁSA	60
5.1 Papírhulladékok valamint papírhulladék-faforgács és papírhulladék-fűrészpor keverékek darabosíthatóságának vizsgálata	60
5.1.1 Nedvességtartalom meghatározás	60
5.1.2 Sűrűség nyomás összefüggése	60
5.1.3 Brikettálási munka	65
5.1.4 Húzószilárdság vizsgálata	66
5.2 Mechanikai biológiai hulladékkezelés technológiájából származó nagy fűtőértékű frakció	70
5.2.1 A brikettálható anyag előkészítése, eljárás technikai jellemzői	70

5.2.2	A brikettálási kísérletek	72
5.2.3	Sűrűség nyomás kapcsolata	73
5.2.4	Brikettálási munka	75
5.2.5	Húzószilárdság	77
5.2.6	Megállapítások	80
5.3	Shredderüzemi ciklonpor brikettálhatóságának vizsgálata	81
5.3.1	Minták	82
5.3.2	Préselési nyomás-tabletta sűrűség kapcsolata	82
5.3.3	Préselési nyomás befektetett munka kapcsolata	84
5.3.4	Préselési nyomás húzószilárdság kapcsolata	84
5.3.5	Értékelés	86
5.4	Brikettálási kísérletek komposztált szennyvíziszappal	87
5.4.1	Préselési nyomás sűrűség kapcsolata	87
5.4.2	Brikettálási munka vizsgálata	89
5.4.3	Húzószilárdság vizsgálata	91
6	A különböző hulladékok brikettálhatóságának összehasonlítása	94
7	ÖSSZEFOGLALÁS	96
7.1	Szilícium karbid brikettálása	96
7.2	Újságpapír brikettálása	97
7.3	MBH technológiából származó fűtőanyag brikettálása	97
7.4	Autóshredderüzemi ciklonpor brikettálása	98
7.5	Komposztált szennyvíziszap brikettálása	98
7.6	A vizsgált hulladékok brikettálhatóságának összevetése	99
8	SUMMARY	100
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	102
	IRODALOMJEGYZÉK	103

Jelölések jegyzéke

Latin szimbólumok

A	tabletta préselési irányra merőleges felülete, m^2
A_p	szemcse felület, m^2
a	szemcsék távolsága Rumpf modelljében (2.2.1 fejezet), m konstans (4.5.3 fejezet), MPa/%,
a_0	szemcsék távolsága Rumpf modelljében (2.2.1 fejezet), m
a_2	konstans (Kawakita és Ludde, 2.5.1 fejezet)
B	anyag konstans (Rieschel összefüggés, 2.5.1 fejezet), -
b	vonatkoztatási feszültség (Runge és Weissgüttel, 2.5.1 fejezet), MPa konstans (Higuchi, 2.5.2 fejezet) konstans (2.6.2 fejezet), - konstans (4.5.3 fejezet), MPa
b_2	konstans (Kawakita és Ludde, 2.5.1 fejezet)
C	anyag konstans (Rieschel összefüggés, 2.5.1 fejezet), - relatív térfogat csökkenés (Kawakita és Ludde, 2.5.1 fejezet)
c	kötőanyag tartalom, %
c_0	viszonyítási kötőanyag tartalom, %
$c_0 \dots c_3$	anyagfüggő tényezők (Skalweit modell, 2.5.1 fejezet)
c_k	kötőanyag tartalom, %
$c_{v\text{íz}}$	nedvességtartalom, %
D	tabletta átmérő, m
E_B	törési energia, J
F	erő, N
F_B	törőerő, N
F_B'	törőerő vonatkoztatási érték (2.6.2 fejezet), N
F_H	az átlagos kötőerő, N
F_K	teljes kötőerő, N
$F_{\max}$	maximális erő törés során, N
F_p	szemcsék közti kötőerő, N
F_R	nedvesítésből (adhézió) származó erő, N
f	sűrűségfüggvény, 1/mm
h	tabletta magassága, m
K	feszültség-sűrűség diagram görbületi indexe (Runge és Weissgüttel, 2.5.1 fejezet), - költség, HUF
K_C	kötőanyag költsége, HUF
K_t	teljes költség, HUF
K_W	munka költsége, HUF
k	koordinációs szám, - anyagfüggő préselési szuszceptibilitás (Leuenberger, 2.5.2 fejezet)
k_1, k_2	anyagfüggő paraméterek, -
k_3, k_4	anyagfüggő tényezők (Cooper és Eaton, 2.5.1 fejezet), -
M	anyag konstans (Rieschel összefüggés, 2.5.1 fejezet), -
$M_{B\max}$	maximális hajlító nyomaték, Nm
m	anyagfüggő tényező (Skalweit modell, 2.5.1 fejezet) Heckel modell konstansa agglomerátum/tabletta tömege, kg
m'	vonatkoztatási érték (2.6.2 fejezet), kg

m_t	tabletta tömege, kg
$m_{tört}$	összetört agglomerátumok száma, db
$m_{összes}$	összes agglomerátum száma, db
Δm_i	tömeghányad, %
n	Heckel modell konstansa
P	alkalmazott préselési nyomás, MPa maximális kompaktálási nyomás (Higuchi, 2.5.2 fejezet), MPa
P_H	törési valószínűség, -
p	préselési nyomás, MPa
p_0	alapnyomás, Pa
$p_1 \dots p_4$	anyagfüggő együtthatók (Runge és Weissgüttel, 2.5.1 fejezet)
p_k	kapilláris nyomás, Pa végső présnyomás (Skalweit modell, 2.5.1 fejezet), Pa
p_k, p_g	nagyobb, ill. kisebb pórusok bezárásának nyomása (Cooper és Eaton, 2.5.1 fejezet), Pa
p_{k0}	kezdeti nyomásérték (Skalweit modell, 2.5.1 fejezet), Pa
R	korrelációs együttható, -
R_1, R_2	folyadékfelület fő görbületi sugarai, m
s	dugattyú elmozdulás, m
T	konstans (Kuenz és Leuenberger, 2.5.2 fejezet), -
U	nedvességtartalom (2.5.1 fejezet), %
V	tabletta térfogata, m^3
V_0	brikettálandó anyag kiindulási térfogata (2.5.1 fejezet), m^3 kezdeti térfogat (Kawakita és Ludde, 2.5.1 fejezet), m^3
V_1	relatív térfogat 1 MPa-on (2.5.1 fejezet), -
V_∞	pórusmentes brikett térfogat, m^3
V_p	térfogat bármely adott nyomáson (Kawakita és Ludde, 2.5.1 fejezet), m^3
V_R	relatív térfogat, -
V_s	számított relatív szórás, %
$V_{sátl}$	számított relatív szórás átlaga, %
v	tömöríthetőség (Runge és Weissgüttel, 2.5.1 fejezet), -
W	egy tablettá elkészítéséhez szükséges munka, J
w	Walker együttható (2.5.1 fejezet), - fajlagos tablettázási munka, J/g
w_B	próbatest keresztmetszet hajlítási ellenállás, m^3
X_1, X_2	komponensek tömeghányadai, -
Δx_i	szemcseméret tartomány, mm

Görög szimbólumok

α	fél peremszög, °
α_1	konstans, $MPa \cdot g^{-1} \cdot J^{-1}$,
α_2	konstans, $MPa \cdot g \cdot J^{-1}$,
β_1	konstans, $MPa \cdot \%^{-1}$
β_2	konstans, MPa
γ_{lg}	felületi feszültség, $N \cdot m^{-1}$
ε_A	felületi porozitás, -
ε_B	törési felület kötőanyag felülete, -
ε_{BP}	szemcsefelület és kötőanyag felület határa, -

ε_p	törési felület szemcsefelülete, -
ζ	húzószilárdság és préselési munka aránya, MPa g J ⁻¹
η_v	p nyomáson a sűrűség (Rieschel összefüggés, 2.5.1 fejezet), kg m ⁻³
η_{v0}	préselés kezdetén a sűrűség (Rieschel összefüggés, 2.5.1 fejezet), kg m ⁻³
θ	peremszög, °
κ	anyagtól függő kompresszibilitási tényező, -
ρ	agglomerátum sűrűség, kg m ⁻³
ρ_0	alapsűrűség, kezdeti sűrűség, kg m ⁻³
ρ_1, ρ_2	komponensek anyagi sűrűségei (Heckel modell), kg m ⁻³
ρ_A	tabletták (agglomerátum) sűrűsége, kg m ⁻³
ρ_f	tömöttségi hányados, az anyag relatív sűrűsége a részecskék átrendeződése után -
ρ_t	a tabletták sűrűsége, kg m ⁻³
σ	normálfeszültség (Runge és Weissgüttel, 2.5.1 fejezet), MPa
	szórás, -
σ_B	kötőanyag húzószilárdsága, MPa
σ_{BP}	felületre vonatkoztatott adhéziós szilárdság szemcse és kötőanyag között, MPa
σ_h	tabletták húzószilárdsága, MPa
σ_{max}	maximális lehetséges brikett szilárdság, MPa
σ_z	agglomerátum húzószilárdsága, MPa

1 BEVEZETÉS

A darabosítás az aprítással ellentétes eljárás. Darabosításnak (agglomerálásnak) nevezzük azt a mechanikai eljárást, amikor szemcsék közötti kötőerők révén a finom szilárd diszperz anyag (porok, zagy finom részecskéi) szemcseméretét megnöveljük. Számos iparágban - ásványi nyersanyagok előkészítése, cementipar, vegyipar, élelmiszeripar, mezőgazdaság, gyógyszeripar, hulladékélfeldolgozás - előfordulnak olyan finom-diszperz anyagok, termékek amelyeket agglomerálni kell. A 1.1. táblázat foglalja össze a főbb alkalmazási területeket.

1.1. táblázat. Agglomerálás különböző iparágakban

Iparág	Felhasználás
Ércelőkészítés	- pelleték előállítása kohók számára
Mezőgazdaság	- állati eledel előállítása - műtrágyák - növényvédő szerek és gombaölő szerek
Élelmiszeripar	- instant termékek - édességek
Vegyipar	- közbülső és végtermékek előállítása (pl.: műanyag granulátumok, műtrágya)
Gyógyszeripar	- tabletták gyártása - granulátumok, dragsék gyártása
Kerámiaipar	- szinter testek - katalizátorok - porlasztott granulátumok
Hulladékkezelés	- hulladék/melléktermék porok, hamuk és pernyék előkészítése - iszapok kezelése - mezőgazdasági melléktermékek, települési hulladékok bizonyos frakcióinak pelletálása

A granulátum, agglomerátum számos előnnyel rendelkezik a porformával szemben:

- *a halmaz térfogatsúly növekszik*, ami különösen a szilárdanyagok szállításánál, tárolásánál, csomagolásánál jelent előnyt,
- *a folyási tulajdonságok megváltoznak*, így javul a szállíthatóság és adagolhatóság,
- *javul a keverhetőség*, ha a szemcsék mérete azonos (szélesebb szemcseméret eloszlás esetén a szabadon folyó anyag méret szerint szétválík, de agglomerátum formában a keverék stabil marad),
- a granulátum halmaz *átáramlási ellenállása* lényegesen kisebb, mint a porformának (nagykohó, reaktív gát),
- az anyag kezelésénél – szállítás, adagolás, töltés és ürítés - *csökken a kiporzás*, ezzel az anyagvesztés is, és elkerülhető a porok környezetszennyezése.

Az agglomerálásra alkalmazott módszerek közül jelen értekezés kizárólag a brikettálással foglalkozik, részletesen a továbbiakban csak erről írok. A kész brikettek egyik legfontosabb minőségi jellemzője a törési szilárdság, amelyet a brikett későbbi felhasználásnak megfelelően kell beállítani. Általában megfelelően szállíthatónak és

adagolhatónak kell lennie briketteknek, felhasználásuk során azonban adott igénybevételre a legtöbb esetben szét kell esniük (pl.: tüzelőanyag tüztérben, tabletták oldása, stb.).

Az előállítás során fontos paraméter az alkalmazott préselési nyomás és hőmérséklet, ezekre a berendezéseket méretezni kell. Nagyobb préselési nyomás esetén a berendezés alkatrészei nagyobb igénybevételnek vannak kitéve. A nagyobb mechanikai szilárdság és a hőálló berendezés kialakítás a beruházási költséget növeli. Az agglomerálás során befektetett fajlagos munka ismerete és a préselési hőmérséklet kiemelt fontosságú, mivel a gyártás költségeivel szoros összefüggésben áll.

A leírtaknak megfelelően az adott célra termelt brikettek gyártását úgy kell megvalósítani, hogy az igényelt brikettminőséget (szilárdság, morzsolódás, stb.) biztosítani tudjuk, legkisebb befektetett munkával, a legkisebb –brikettminőség szempontjából is megfelelő– préselési nyomáson és hőmérsékleten.

A gyártás optimalizálásához elengedhetetlen a gyártási paraméterek brikettminőségre gyakorolt hatásának pontos ismerete. Az elvégzett vizsgálatok, kutatások fő célkitűzései közé tartozott egy olyan kísérleti brikettáló berendezés, és brikett minősítési eljárás kifejlesztése, mellyel eltérő paraméterek mellett nagyszámú kísérletsorozat elvégezhető, így téve lehetővé a fő paraméterek megbízható meghatározását. A vizsgálatok elvégzésére a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében található dugattyús prés továbbfejlesztett változatát használtam, mellyel jól modellezhető a különböző anyagok brikettálhatósága. További cél olyan paraméterek, függvények bevezetése, mellyel különböző anyagi tulajdonságú hulladékok brikettálhatóságának jellemzése és összehasonlítása válik lehetővé, valamint cél a brikettálás műszaki paramétereiktől függő gazdaságossági értékelésére alkalmas módszer kidolgozása.

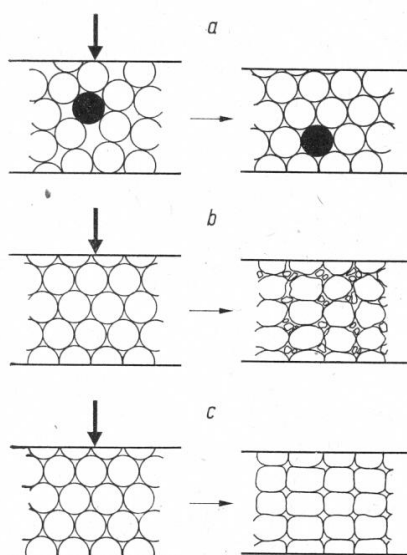
A vizsgálatokat eltérő anyagi tulajdonságú hulladékokkal és melléktermékekkel végeztem. E kérdéskör problémája, hogy a hulladékok igen sokfélék, és ezek gyakran ugyanazon halmazban fordulnak elő, vagyis a halmaz heterogén. A vizsgálatokba bevont anyagok körében található olyanok, melyek brikettálását korábban egyáltalán nem vizsgálták, más esetekben érdemi szakmai információ nem fellelhető a szakirodalomban, különösen nem az értekezésben található összefüggésben. Néhány esetben nagy segítség volt, hogy a munka ipari kutatási feladathoz, vagy projekthez kapcsolódott.

A kutató munkám során az általam kidolgozott kutatási munkaprogramba gyakran hallgatók is bekapcsolódtak, mérési eredményeikből – témavezetésem mellett – TDK vagy szakdolgozat készült [11, 14, 26, 27, 28, 29].

2 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Nyomással történő agglomerálás

A nyomással történő agglomerálás során a présberendezések az általában száraz ömlesztett anyagra olyan nagy erőt fejtenek ki, hogy a nyomás hatására a pontszerűen jelenlévő kontaktusok száma nő, és felületszerű kapcsolattá alakulnak, így a kötőerők intenzívebbek lesznek. A tömörítés kezdetén (nagy porozitásnál és kis nyomásnál) kiváltképp a szemcsék átrendeződése zajlik le, ahol a súrlódó erőket kell legyőzni. Nagyobb nyomás elérésekor, mikor a porozitás már kisebb, a szemcsék alakváltozása válik jellemzővé, anyagtól függően rugalmas változás, majd azt követő törés (rideg anyag), vagy plasztikus alakváltozás (rugalmas-képlékeny, ill. szálaz anyag) (2.1 ábra) [1, 54].

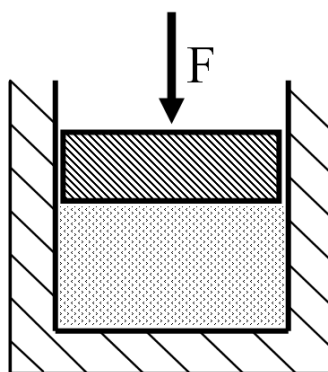


2.1 ábra. Nyomással történő agglomerálás tömörítési folyamatai [1]

- a) nagy porusok kitöltése átrendeződés útján,
- b) kis pórusok kitöltése törés által,
- c) kis pórusok kitöltése plasztikus deformációval.

A súrlódásból származó hő hatására helyenként szinter-folyamatok is lejátszódhatnak, szilárd hidakat kialakítva az érintkező felületen végbemenő diffúziós folyamatok révén. Az anyag plasztikus viselkedése a felületszerű kapcsolatok keletkezését segíti, ezért a tömöríthetőség szempontjából nagy jelentőséggel bír. A préselés során a tabletta belsejében az erőátvitel eltérősége miatt helyenként eltérő nyomások lépnek fel. Nagy nyomással érjük el, hogy az érintkező felületen megfelelő, különböző eredetű kötőerők léphessenek fel. Az alkalmazott nyomás 10 - 1000 MPa, de leggyakrabban 50 - 250 MPa tartományba esik. Egy szemcsehalmaz nyomással történő agglomerálhatósága függ [1, 56]:

- az anyagsajátságoktól,
- a szemcsemérettől, és szemcseméret eloszlástól,
- az eljárási körülményeitől (különösen a hőmérséklettől),
- a kötőanyagtól.

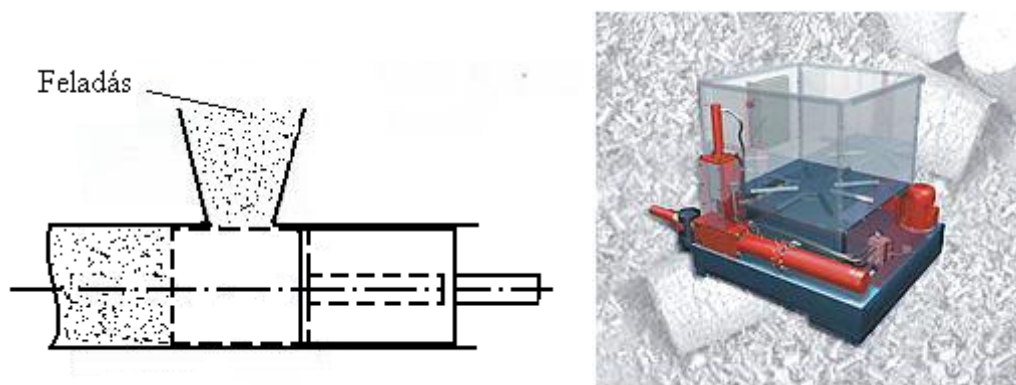


2.2 ábra. Nyomással történő agglomerálás elve

A brikettálás során a kiindulási anyagnak megfelelően jó folyóképességgel kell rendelkeznie, egyrészt a feladásnak egyenletes sebességgel kell történnie, másrészt biztosítani kell a szemcsék számára, hogy tömörítés közben együtt haladjanak a tömör szoros illeszkedésű berendezésben, ahol a nyomási és a nyírási feszültségek egyenletesen oszlanak el a brikettek belsejében. Ha az anyag belső súrlódása túl nagy, néhány részen a brikett nem kompaktálódik eléggé, a forma részben kitöltetlenül marad, mialatt más részek túlkompaktálódnak, a brikett elreped [3].

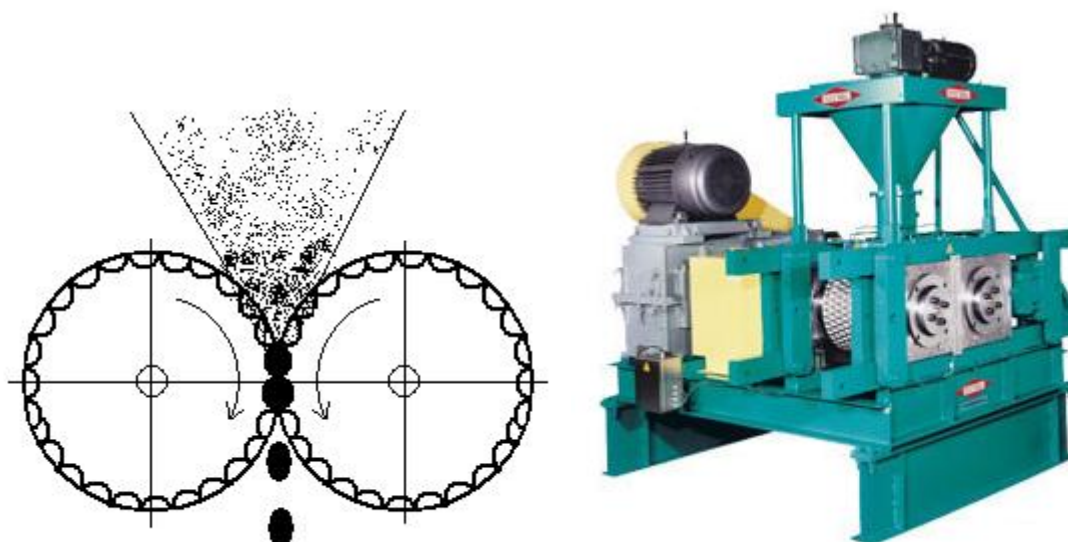
A brikettáláshoz számos gépfajta áll rendelkezésre. Létezik dugattyús berendezés, ellendugattyúval rendelkező, extruder típusú, hengerpár, ill. sík-, és hengermatricás. Az egyszerű dugattyús berendezésnél a préselés egy ellendugattyúval szemben történik, az extruder típusú gép esetén a tömörítőcsatorna falsúrlódásával szemben történik a tömörítés. A csatornák gyakran szűkítéssel rendelkeznek, ami a további tömörítést segíti [2].

A 2.3 ábra a dugattyús prések elvi ábráját, és egy konkrét berendezést mutat. A folyamat kezdetekor a darabosítani kívánt anyagot a szállítócsiga a töltőtoronyba szállítja, az anyag elrendeződik, és a szállítócsiga megáll. A következő lépésben a függőleges előtömörítő dugattyú az alapanyagot a tényleges préskamrába nyomja. Az előtömörítő az alsó végállásában marad mindaddig, amíg a présdugattyú előre mozog és ez által a brikettet préseli. A préscsatornában kereszt és hosszirányú tömörítés történik. Miután elér egy előre beállított nyomást, kinyit a fogó, utat engedve a kész brikettnek. Ezután a ciklus újraindul a fogó zárásával és a dugattyúk visszamozgásával. Az ilyen típusú prések sokfajta anyag brikettálását teszik lehetővé: fapor, forgács, rézforgács, alumíniumforgács, papírpor, dohány, gyapot, cellulóz, farostlemez hulladék, szalma.



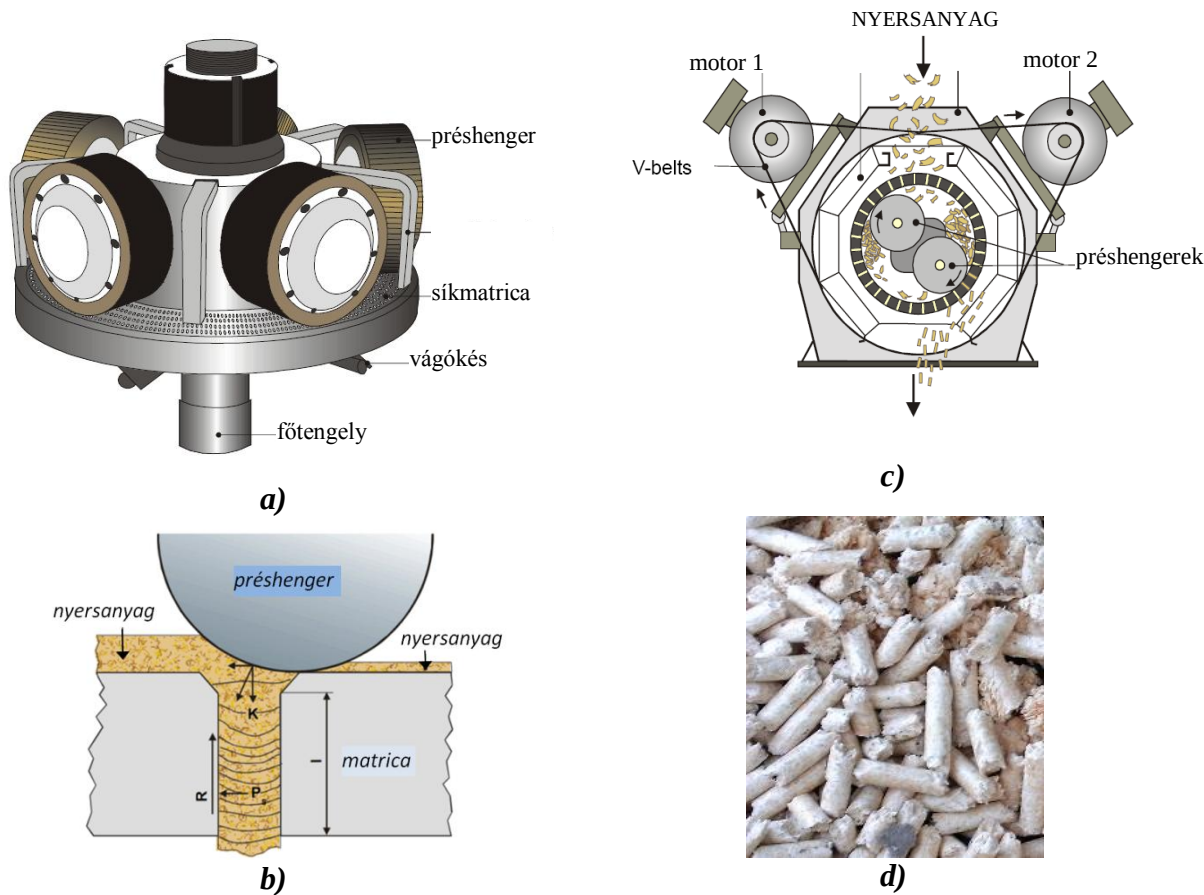
2.3 ábra. Dugattyús prés [8, 11]

Hengeres prések (2.4. ábra) esetén két azonos átmérőjű henger forog egymással szemben azonos sebességgel, amelyek a finom diszperz anyagot behúzzák és tömörítik. A kompaktálás a két henger között történik. A hengerek lehetnek sima felületűek, vagy a termék alakjának megfelelően matricázottak. Az egyik henger csapágypontjai fixen rögzítettek, míg a másik rugóerő vagy hidraulikus megtámasztás ellenében elmozdulhat. Finom porok esetében csigás adagoló is szükséges lehet. A fajlagos kompaktáló erő dimenziója a géptípusoknál kN/cm (1 cm préshenger szélességre eső préserő), melyet a megkívánt brikett szilárdság és a por anyagi tulajdonságai határoznak meg. A préselés során felszabaduló levegő a porral ellentétes irányban távozik el a hengerek közül, ez határozza meg az elérhető legnagyobb tömegáramot. A jellemző fajlagos kompaktálási erő ezen berendezéseknél 10 - 140 kN/cm között mozog [2, 49, 53, 54, 58].



2.4. ábra. Hengeres prés [4, 11]

Napjainkban a tápgyártáson túl a szilárd bio tüzelőanyagok iránti növekvő kereslet hatására egyre nagyobb jelentőségűek a sík illetve hengermatricás pelletálók. Ez a fajta pelletgyártás eljárástechnikai értelemben nyomással történő agglomerálás, brikettálás. Eredetileg takarmányok készítésére használták az eljárást (pl.: nyúltáp), manapság már a biopellet-gyártás is igen elterjedt, de (szilárd települési hulladékokból származó) másodtüzelőanyagok előállítására, filterporok, víztelenített iszapok, papír agglomerálására is használják. Különböző szabványok 10 ill. 25 mm-ben maximálják a tüzelés céljából készített biopelletek átmérőjét. Nagy előnye, hogy jó folyási tulajdonságai miatt automatikusan adagolható (csigás vagy cellás adagoló) kis hő-teljesítményű berendezésekben jó hatásfokkal ég el. Alapvetően két berendezés kialakítás létezik (2.5. ábra), a síkmatricás és a hengermatricás. A sík matrica vízszintesen helyezkedik el, a henger vagy csonka kúp alakú görgők a matrica felületén haladnak körbe, esetleg a matrica végez forgó mozgást a görgők alatt. Hengermatrica esetén a henger belsejében lévő görgők forogva végzik az anyag préselését.



2.5. ábra. Matricás brikettálók

a-b) Síkmatricás pelletáló [23],

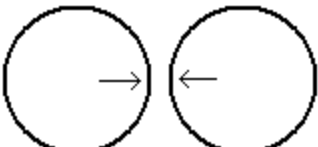
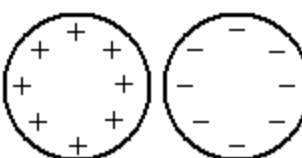
c) Hengermatricás pelletáló [23],

d) biopellet

A működés során az alapanyagot a matricára juttatjuk megfelelő rétegvastagságban. A rétegen áthaladó görgő (járókerék) az anyagot kis mértékben aprítja, és matrica furatain átpréseli (nyomással történő agglomerálás). A furaton távozó folytonos pellethengert a szükséges távolságban forgókések vágják el. A darabosítást alapvetően befolyásolják az alapanyag anyagi tulajdonságainak és a berendezésben kialakuló nyomásnak a kapcsolata, a matrica lyukainak sűrűségi karakterisztikája, lyukhossz és lyukátmérő, a nyersanyag vastagsága a matricán, préselés frekvenciája ill. görgők kerületi sebessége. A készterméket leggyakrabban ömlesztve, big bagban, vagy kis zsákokban forgalmazzák [23].

2.2 Kötésmechanizmusok, kötőerők

Két szemcse között többféle kötés léphet fel. A két fő csoportja ezen kötéseknek az anyagi, illetve agyi kötés nélkül létrejövő kapcsolódások. Mind a két fő csoporton belül vannak még további alcsoportok, melyek összefoglalását szemlélteti a 2.6. ábra Rumpf szerint.

Anyag-kötés		Anyag-kötés nélkül	
Szilárd-híd		Vonzóerők révén	
 Olvadék-híd		 van-der Waals erők	
 Kristályosodó, megkeményedő szilárd-híd		 Elektromos vezetők	
Folyadék-híd		 Szigetelők	
 Adszorpciós folyadékréteg		Alakkötés 	
 Mozgóképes folyadék-híd			

2.6. ábra. Kötésmechanizmusok [2]

2.2.1 Adhéziós erők

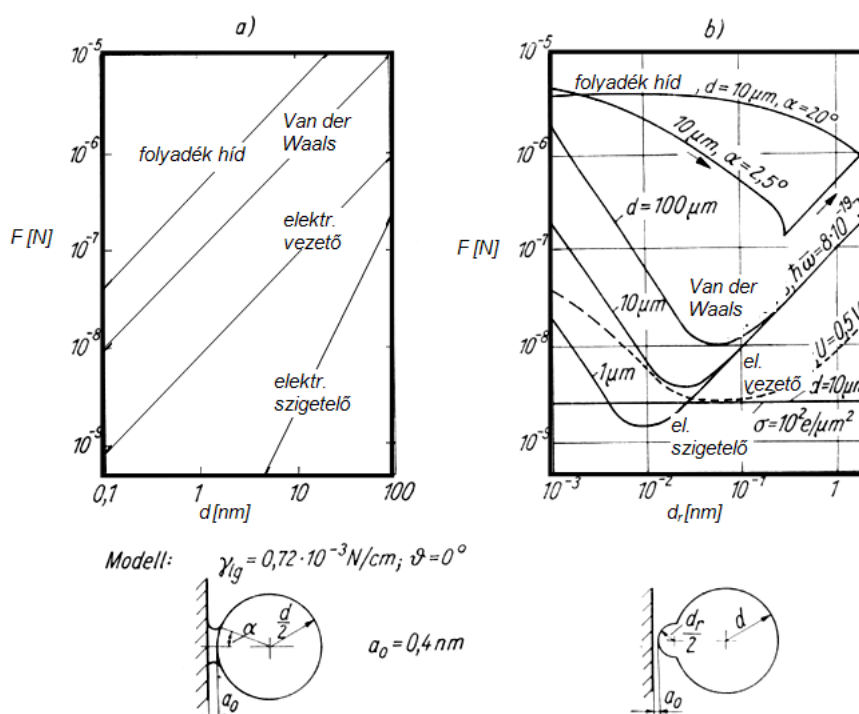
Ha egy szilárd szemcsét vákuum alatt széttörünk, és ezután megfelelően összerakunk, akkor az eredeti kötőerők (kémiai kötőerők, azaz heteropoláris, homopoláris ill. fémes kötések) újra működnek benne, úgy mint a törés előtt. A törés után levegő jelenlétében a szemcse felületén adszorpciós rétegek képződnek, telítődnek az erős kötőerők. Telített kémiai kötések kizárják a kölcsönhatást a szilárd szemcsék között. Van der Waals illetve elektrosztatikus erők lehetnek hatékonyak ilyen esetben. Kis szemcsék tapadhatnak merőleges falhoz, itt az adhéziós erők nagyobbak a tömegerőknél. Két sima felületű lapot egymáshoz téve is érzékelhetők az adhéziós erők. A testek közti kapcsolati pontok javíthatók a nyomás fokozásával is, ez annál erősebb, minél könnyebben deformálódnak a kapcsolódó felületek nem elasztikus módon. Adhéziós erők is okozhatnak deformációt, ez

időfüggő. Összefoglalva az adhéziós erők a felület nagyságától, a felületi érdességtől és a nyomóerőtől függenek. Az adhéziós erők csak erősen egyszerűsített modellekkel közelíthetők, melyekben sík-sík, gömb-sík ill. gömb-gömb közt fellépő erőket vizsgálják. Az érdességet egyenértékű sugárral, vagy átmérővel veszik figyelembe (a szemcsén elhelyezkedő félgömb modellezi az érdességet). [2, 6]

Van der Waals erők

Ezek az erők akkor vannak jelen, ha atomok vagy molekulák egymásra hatnak, az kölcsönhatásban lévő atomok elektromos dipólmomentumának következtében. Ha a dipólusok nincsenek jelen állandóan, vagy csak indukálva állnak fent, akkor csak rövid ideig tart az erőhatás.

Az erőhatás kis hatótávolsága miatt, a testek kapcsolatánál a kapcsolódási pontok geometriája jelentős hatással bír a kölcsönhatás intenzitására. Ez azt jelenti, hogy a felületi érdességnek jelentős befolyása van. Rumpf modelljét vizsgálva, látható, hogy egy $10\ \mu\text{m}$ es gömb szemcse felületi érdességét növelve a Van der Waals erő egy minimumpontig csökken, majd növekszik. Ennek az oka, hogy kis érdesség esetén a magának a szemcsének a szerepe nagy az erőben, növekvő érdesség esetén a szemcse szerepe csökken (az érdesség miatt távolabb kerül a síktól), és a szemcsén lévő érdesség szerepe nő az erőhatás vonatkozásában. [2, 6]



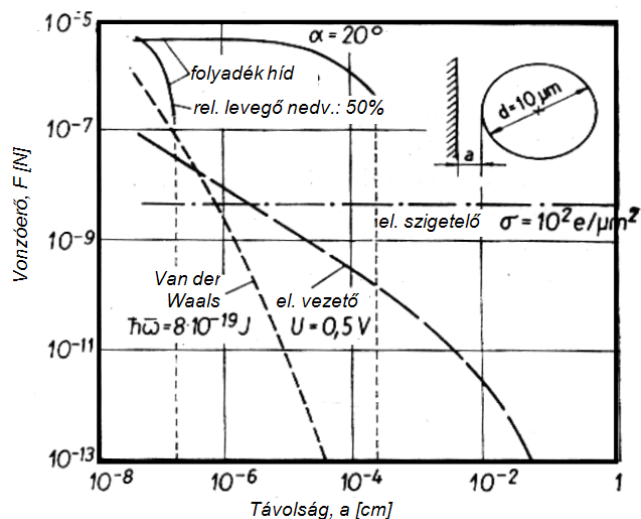
2.7. ábra. Kötőerők (folyadékhidak adhéziós és kapilláris erői) Rumpf szerint:

- sima gömb/sima lemez modell,
 - érdes gömb/sima lemez modell esetén,
- ha $a = a_0 = 0,4\text{nm}$.

Elektrosztatikus erők

Ha szilárd testek kapcsolatba kerülnek egymással, elektronátmenet történik a különböző elektronszint energiakülönbségek miatt. Az elektron leadás, ill. felvétel a felületi rétegekben történik, ennek vastagsága fémek esetén nanométer tört része, félvezetők, ill. nem vezetők esetén $1\ \mu\text{m}$ is lehet. A kontaktpotenciál -ami a fémeknél egyensúlyi

helyzetben állandósul- akár a 0,5 V-ot is elérheti. Elektrosztatikus erők modellezésénél erős egyszerűsítések szükségesek, ugyanis a felületek elektromos energiaspektruma általában ismeretlen. Ráadásul a folyamatok nagymértékben függenek az adszorpciós jelenségektől, felületi szennyeződésektől. A különböző elméletek másként látják az elektrosztatikus erők jelentőségét a Van der Waals erőkhöz képest. A Rumpf modellből látható, hogy 100 μm alatti szemcsék esetén az elektrosztatikus erők elhanyagolhatóak a Van der Waals erőkhöz képest.

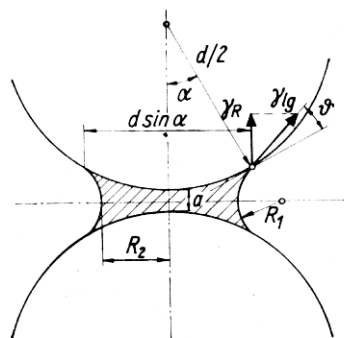


2.8. ábra. Kötőerők nagysága a szemcsetávolság függvényében [1]

A nemvezető szemcsék esetén a felületi érdességtől való függés is elhanyagolható. Egy részecske állandó töltéssűrűségű elegendő kiterjedésű lemezhez elektrosztatikus erőből eredő vonzása a távolságtól független, szemben a Van der Waals erővel, melyek a távolság növekedésével arányosan gyorsan csökkennek. [2, 6]

2.2.2 Kis viszkozitású nedvesítő folyadékkal történő kötés

A nedvesítő folyadékok által létrehozott kötéseknek alapvetően két formáját különböztethetjük meg. Csekély folyadékanyag esetén folyadékhidak képződnek a szomszédos szemcsék között. A kötés a - felületi feszültség jelenségéből származtatható - folyadékhídban lévő háromfázisú kapcsolat peremén fellépő felületi feszültségre és a kapilláris nyomásra bontható. Ha a szemcsék közti tér teljes mértékben ki van töltve folyadékkal, a felületen konkáv a folyadék meniszkusz, akkor kapilláris vákuum van. A két kötési erő akár együtt is jelentkezhet.



2.9. ábra. Folyadékíhíd gömbszemcsék között [1]

Az ábrán folyadékíhíd látható két gömb formájú szemcse között, feltételezve, hogy a híd meridián görbéje kör. A nedvesítésből (adhézió) származó erő [1]:

$$F_R = \gamma_{lg} \cos(90^\circ - \alpha - \theta) \pi d \sin \alpha = \gamma_{lg} \sin(\alpha - \theta) \pi d \sin \alpha,$$

ahol γ_{lg} a felületi feszültség, θ peremszög és α a fél peremszög. A kapilláris nyomás Laplace egyenlet szerint:

$$p_K = \gamma_{lg} \left(\frac{1}{R_1} \pm \frac{1}{R_2} \right),$$

ahol R_1 és R_2 a folyadékfelület fő görbületi sugarai. A folyadékfelszín konkáv görbülete esetén kapilláris depresszió uralkodik, konvex görbület esetén túlnyomás. Jelen esetben a fő görbületi gradiensnek különböző előjelűek, és a folyadékíhídban depresszió van, azaz kötőerő, amíg $\left| \frac{1}{R_1} \right| > \left| \frac{1}{R_2} \right|$. Az így fellépő kötőerő:

$$F_p = p_K \frac{\pi d^2}{4} \sin^2 \alpha = \gamma_{lg} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{\pi d^2}{4} \sin^2 \alpha,$$

A teljes kötőerő így [2, 6]:

$$F_K = F_R + F_p = \gamma_{lg} \pi d \left[\sin(\alpha + \theta) \sin \alpha + \frac{d}{4} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \sin^2 \alpha \right].$$

2.2.3 Nagy viszkozitású folyadékokkal történő kötések

Ha egy agglomerátum pórusai teljes mértékben vagy részben nagy viszkozitású kötőanyaggal vannak kitöltve, akkor a kötést a kötőanyagon belüli kohézió és a kötőanyag és a szemcsék közti adhézió határozza meg. A belső kapcsolatok és a felületi érdesség miatt abból lehet kiindulni, hogy a fentebb említett adhézió a kötőanyag kohézióját meghaladja. A nagy viszkozitás meggátolja a kapilláris rádiuszok kialakulását. A plasztikus anyagok megtartják a megadott felületi formát, mert a deformálási energia nagyobb, mint a lehetséges nyereség a felületi energia vonatkozásában [2, 6].

2.2.4 Alaki kötések

Szálas, lemezes ill. terjedelmes szemcsék alaki kapcsolatokat alakíthatnak ki, ahol ezek egymásba akadnak, gabalyodnak. Ilyen kötések lépnek fel a szálas biomasszáknál, xilit tartalmú barnaszemeknél és fémforgács esetén.

2.3 Kötőanyagok

Számos fizikai és kémiai mechanizmus szolgál a brikettben a szilárd szemcsék kötőanyaggal való összekötésére. A finom porokhoz kevert kötőanyag hathat ragasztóként, a részecskék felületére tapad és összetartja a szomszédos részecskéket a kötőanyag felületi feszültsége által. Ebben az esetben a kötőanyag filmként viselkedik, be kell borítania minden szemcsét, amihez keverés szükséges. A víz gyakran hat így kötőanyagként, mellette kenőanyagként is teljesít, így viselkednek a gyanták és egyéb ragadós anyagok is [3].

A szilárd anyagok keverése nagyobb mennyiségű ragadós viszkózus folyadékkal (részben olyanokkal, amik megkeményednek hűtés vagy kémiai kölcsönhatás hatására) mátrixot biztosít, ami cementálja a szemcséket, amikor azok összenyomásra kerülnek. Szurkok és gyanták általában mátrixként hatnak, ahogy a melasz mész, használt nátriumszulfit oldat, és más ragadós folyadékok. A melasz a cukorgyártás mellékterméke, kötőanyagként mésszel keverve használják, kalciumszaharátok képződésével fejti ki hatását. A reakció gyorsan végbemegy, a brikettek hamar nagy szilárdságra tesznek szert. Égetés során feltételezhetően teljesen kiég ez a fajta kötőanyag. A brikettek erősen átnedvesedve a szilárdságukból veszítenek [10].

A mátrix kötőanyagoknak az aránya a megfelelő szilárdság elérése érdekében a szilárd szemcsék finomságától, porozitásától és sűrűségétől függ. Szén hatékonyan brikettálható 6 % szurokkal, amíg néhány porózus faszénhez 30 % szurok is szükséges a jó brikett eléréséhez. A szemcsék egyenletes befedésének érdekében a keveréket fűteni kell a szurok lágyuláspontjára.

A mátrix típusú kötőanyagok alapvető karakterisztikája az alacsony viszkozitás a jó keverhetőség érdekében, a szemcsékre való tapadási hajlam, elegendő viszkozitás a szemcsék összetartásához miután brikettálásra kerülnek. A szurkot ill. bitument már száz évvel ezelőtt is alkalmazták a szénbrikettgyártás során. A szurkot szilárd, vagy folyékony formában is adagolhatják a szénhez. A kötőanyag szén keveréket 100 °C fölé kell hevíteni, a szénbrikettálás során ezt általában vízgőz direkt bevezetésével oldják meg, ami a brikettgyártás végén teljes mértékben távozik. A szurkot (szén kátrány, szurok vagy aszfalt) általában melegítik, hogy folyékonyra tegyék a keverhetőség miatt, a kész brikettet hűtik, hogy a kötőanyagmátrix megszilárduljon, és így biztosítsa a brikett szilárdságát.

Néhány kötőanyag oldószerként hat és anyagot old a szemcsék felületéből, oldat hidakat formálva, amik szilárd kötéssé válnak, mikor az oldószer elpárolog. Az oldat felületi feszültségének össze kell tartania a nyers brikettet, amíg kiszárad. Például vízoldható sók megkötéséhez 0,5-2 % nedvességet használnak.

Amíg a kötésnek elég gyorsnak kell lennie, hogy lehetővé tegye a brikett összetartását olyan hamar, amikor az kiesik a présből, sok kötőanyag nem építi fel a teljes igényelt szilárdságot a kezelésig vagy az utókezelésig. Az oldószer típusú kötőanyag elpárolgása egy példa az utókezelésre. Kémiai kölcsönhatás, beleértve a kristályosítást vagy polimerizációt is, erősítheti a kötőanyagot, főleg a mátrix típusú kötőanyagot [3, 4, 10, 39, 40, 46, 47, 48, 52].

Néhány esetben nehéz megkülönböztetni azt a speciális hatást, amivel a brikett adalékanyag bír. A víz kenőanyagként is hat, agyagokhoz adagolva és elő is segíti a kötést. Más esetben hűtőközegként is működhet, ha alacsony olvadáspontú szerves anyag kerül brikettelésre.

2.1. táblázat: Brikett kötőanyagok [3]

Adhéziós és mátrixot képző kötőanyagok	Kőszénkátrány, kőszén kátrányszurok, aszfaltok, fakátrány, bitumen, agyagok (bentonit), nedves keményítő (faszénhez), melasz, szirup, műgyanta, ligno szulfonát, nátrium szilikát oldatok	5-25 %; általános cél: inert szilárd anyagok kötése briketté; jó nyerspellet-szilárdság, útókezelés lehet szárítás vagy polimerizálása a kötőanyagnak a brikettszilárdság növelésének érdekében; keverés szükséges hogy megfelelően befedje a szemcséket
Felületaktív kötőanyagok	Víz agyag típusú anyagokkal, pl.: foszfátanyag pala, kőszénkátrány szénhez	2-6 %; Adhézió és a folyadék felületi feszültsége a biztosítja a kötést
Oldószer hatású	Nedvesség vízzeloldható anyaggal, aceton PVC porral	Általában 1-2 % oldószer, de finom szemcsék esetén akár 10 %; alacsony a nyerspellet-szilárdság; az oldószer elpárolgása után alakulnak ki a szilárd hidak a szemcsék között
Kémiai kötőanyagok	Mész, méssz és melasz	Közepes hőmérsékleten
	MgO és MgCl ₂ , MgO vagy CaO és Fe ₂ O	
	Nátrium szilikát és kalcium klorid nedvességtartalom mellett	Száritás szükséges a szilárdság felépítéséhez
	Hő hatására keményedő gyanta, pl.: fenol vagy polisztirol/polisztirol	Melegen kezelés

Szenek brikettálása

Az idősebb szenek hidrofóbok, vízzel kevésbé, de organikus folyadékokkal (pl. olajokkal) vagy megolvasztott kátránnyal, szurokkal bitumennel aszfalttal stb. (ezek a szénbrikettezés legelterjedtebb kötőanyagai a keményítő és a csiriz mellett, amit az előbbieket egyikével szoktak alkalmazni) jól nedvesíthetők: a megolvasztott kátrány vagy szurokcsépp stb. a hidrofób szemcsék felületén vékony rétegben szétterül. A kis mennyiségű kötőanyaggal összekevert finomszemcsés szén a kötőanyag lágyulási pontja feletti hőmérsékleten kerül a présbe és mivel a keverékanyag kötőanyaga kis nyomáson jól deformálható, a briketté préselt szénszemcsék közti hézagokat maradéktalanul kitölti. A kész brikettben a kötőanyag lehülve megkeményedik és szilárd hid kötést létesít a szénszemcsék között. Egyéb, ritkábban használt kötőanyagok a melasz, gyanta, viszkóza, szulfittlúg, és anorganikus anyagok, amik a brikett hamutartalmát növelik (agyag, márga, cement, mésztej, stb.) [4].

Kötőanyag nélküli brikettálás

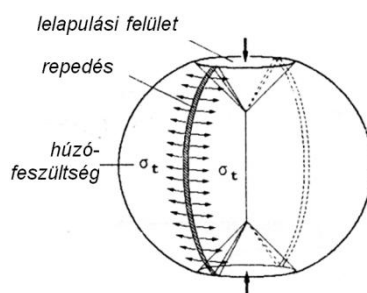
A nagy nyomásra is képes brikettálók arra a tényre épülnek, hogy bizonyos szilárd anyagok is összeolvadnak nagy hőmérsékleten, vagy akár szobahőmérsékleten. Alkáli sók kristályai -részben nátrium klorid- képlekennyé válnak és nagy nyírófeszültség mellett megfolynak. Nagy nyomás összeköti őket. Nagy nyomáson más egyéb szilárd anyag is hasonlóan viselkedik, és általában a nagyobb nyomás a szilárd anyagokat kevésbé rideggé, rugalmassá teszi, így lehetővé teszi a kötőanyag nélküli brikettezést az anyagok széles skáláján, és a kisebb nyomások alkalmazását is. Általában alkáli fémek, kalcium és magnézium sói, szabad fémek, plasztikus ásványok kötnek kötőanyag nélkül, míg nagy nyomás és nagy hőmérséklet alkalmazása sok más ásványi anyag brikettálását is lehetővé

teszi. Például hematit brikettálható nagy nyomáson (>200 MPa) $980\text{ }^{\circ}\text{C}$, vagy ha részben redukált állapotban van akkor $820\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on [3].

Kötőanyag nélkül a megfelelő nedvességtartalomig leszártított hidrophil lignitek, fiatal barnaszenek brikettezhetők. E gélszenek micellái közt finom kapillárisok vannak, az összepréselt szemcsék határán is kapillárisok képződnek. A présnyomás elegendő nagy legyen a szárítás után megmaradt víznek a micellák kapillárisból való kipréseléséhez, e kipréselt víz tapasztja össze az egyes szemeket a közöttük lévő kapillárisokban. Az optimálistól nagyobb vagy kisebb nedvességtartalom csökkenti a szilárdságot [4]. Különböző biomasszákat (fás-, ill. lágyszárúak) is brikettálhatók önmagukban kötőanyag nélkül, megfelelő hőmérsékleten [59].

2.4 Elméleti húzószilárdság

Az agglomerátumok tulajdonságainak vizsgálatakor a szilárdság különösen fontos szerepet játszik. Elméletileg megalapozott modellek a húzószilárdságra épülnek. Megállapítható, hogy a szilárd testekben - függetlenül az igénybevétel módjától - a törések keletkezése húzó ill. nyírófeszültségekre vezethetők vissza (2.10. ábra).

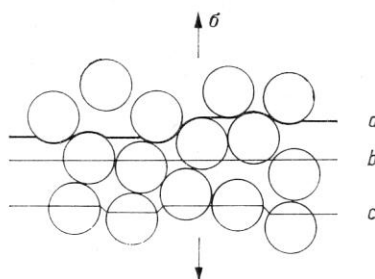


2.10. ábra: Gömb szemcse törése [2]

A húzószilárdság modellezése esetén számos egyszerűsítést kell végezni. Az agglomerátum vizsgált keresztmetszetének felületi porozitását megfelelő méretű felület esetén a teljes agglomerátum porozitásával megegyezőnek feltételezzük.

Szilárd vagy nagy viszkozitású kötőanyag

A törési felület nagyobb, mint az erőre merőleges keresztmetszet (2.11. ábra).



2.11. ábra: Lehetséges törésvonalak [1]

A törési felület szemcsfelületből (ε_P), kötőanyag felületből (ε_B) és azok határából (ε_{BP}) áll:

$$\varepsilon_B + \varepsilon_P + \varepsilon_{BP} = 1.$$

Ha a szemcse szilárdsága a kötőanyag szilárdságához, ill. a kötőanyag szemcséhez történő adhéziós erejéhez képest nagy, akkor a törési sík nem halad át a szemcséken (2.11. ábra/a). Ebben az esetben:

$$\varepsilon_B + \varepsilon_{BP} = 1,$$

és az agglomerátum húzószilárdsága:

$$\sigma_z \approx \varepsilon_B \sigma_B + \varepsilon_{BP} \sigma_{BP},$$

ahol σ_B a kötőanyag húzószilárdsága, σ_{BP} a felületre vonatkoztatott adhéziós erő szemcse és kötőanyag között.

Ha a törési felület a külső erőre merőlegesen fut (2.11. ábra/b), vagy túlnyomó részt a szemcséken át halad (2.11. ábra/c), akkor:

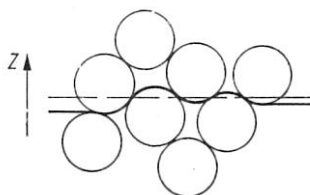
$$\varepsilon_B + \varepsilon_P = 1,$$

az agglomerátum húzószilárdsága:

$$\sigma_z \approx \varepsilon \sigma_B + (1 - \varepsilon) \sigma_P.$$

Szemcsék kapcsolódási pontjain fellépő kötőerők

Kiemelt jelentőséggel bír az agglomerálás tekintetében a folyadékhidak vagy szilárd hidak jelenléte a szemcsék közt. Feltételezzük, hogy a szomszéd szemcsékkel való kapcsolat valószínűsége a szemcse felületének bármely pontjára nézve azonos, ez csak konvex szemcsék esetén lehetséges. Feltételezzük továbbá, hogy a törési felület a kapcsolódási pontok mentén halad, nem a szemcséken át (2.12. ábra).



2.12. ábra: Törési felület a szemcsék kapcsolódási pontjain át (törési felület és vágási sík) [1].

Egy szemcse szomszéd szemcsével történő érintkezési pontjainak számát a k koordinációs szám mutatja meg, a szemcse felülete A_p . A húzószilárdság így, ha F_H az átlagos kötőerő:

$$\sigma_z = (1 - \varepsilon_A) k \frac{F_H}{A_p}.$$

Monodiszperz gömbszemcsék esetén, $A_p = \pi d^2$ és $k \approx \pi / \varepsilon_A$ esetén:

$$\sigma_z = \frac{1 - \varepsilon_A}{\varepsilon_A} \frac{F_H}{d^2},$$

ahol ε_A a felületi porozitás.

Ezt az összefüggést folyadékidas kötések esetén a gyakorlatban is alátámasztották, és szilárd hidak esetén is használható. Olyan agglomerátumok esetén, ahol a szilárdságot túlnyomó részt adhéziós erők okozzák ezek az egyszerű egyenletek nem alkalmazhatók. [1, 2, 6]

2.5 Tablettázás elméleti háttere

A zárt térben a finom szemcsés anyagalmazok (porok) térfogata külső terhelés hatására megváltozik, csökken, amely a porok halmaz sűrűségének növekedésével jár:

$$V=f(p, \kappa),$$

amelyben p a terhelés (nyomás), V a tablettá térfogata és κ az anyagtól függő kompresszibilitási tényező [32].

Fontos jellemző a kompresszibilitás vagy más néven összenyomhatóság. A kompresszibilitás a tablettá térfogatának (sűrűség) változása és a préselési nyomás közötti összefüggést adja meg, azaz a porok nyomás hatására történő deformációs képességét mutatja. Ez azonban nem ad felvilágosítást a tabletták szilárdságáról. Gyakorlati szempontból kiemelten fontos a tömöríthetőség, amely a szilárdság (eredmény) és a befektetett energia, ill. nyomás közti összefüggést vizsgálja. A kompresszibilitásra és a tömöríthetőségre számos empirikus, ill. félempirikus közelítő egyenlet létezik, többnyire korlátozott érvényességi tartománnyal, ezeket mutatom be a következő alfejezetekben. [2, 18]

A tablettázás során befektetett munkát az erő elmozdulás diagramból számíthatjuk.

2.5.1 Kompresszibilitás

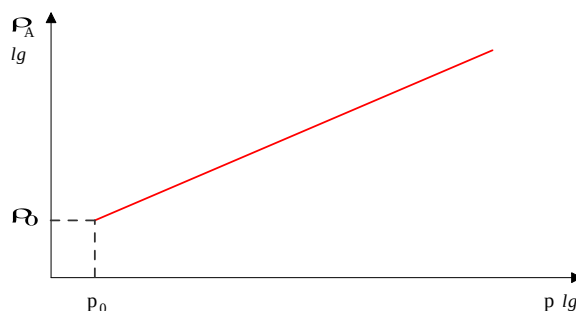
Johanson mérések alapján egyszerű hatványfüggvényt állított fel, amit hengeres prések méretezésénél használt:

$$\frac{\rho_A}{\rho_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/\kappa},$$

azaz

$$\rho_A = \rho_0 p_0^{-1/\kappa} p^{1/\kappa},$$

ahol ρ_A a tabletták (agglomerátum) sűrűsége, p a préselési erő, ρ_0 , p_0 alapsűrűség ill. alapnyomás. A mért $\rho_A(p)$ értékeket logaritmikus hálón ábrázolva $1/\kappa$ meredekségű egyenest kapunk (2.13. ábra).



2.13. ábra: Agglomerátumsűrűség a préselési nyomás függvényében a kompresszibilitási tényező meghatározására

κ a préselési ellenállásra jellemző szám, a kompresszibilitási tényező. Szokásos értékei: 2...10 közé esnek. [2, 57]

Dugattyús prés esetén a Johanson féle hatványfüggvény a prэшűvely A átmérőjével számolva az alábbi formában is felírható a préselési erő (F) ill. tablettá térfogat (V) ismeretében:

$$\frac{F}{F^*} = \left(\frac{V}{V^*} \right)^\kappa$$

Préselési nyomás és kompresszibilitás közti összefüggést ír le az alábbi egyenlet, mely a reális viszonyokat kielégítően tükrözi [1]:

$$\ln p = -k_1 \frac{V}{V_\infty} + k_2,$$

ahol $V=f(p)$ brikettérfogat, V_∞ a pórusmentes brikett térfogat ($p \rightarrow \infty$), k_1 ill. k_2 anyagfüggő paraméterek.

A következő modell (Cooper és Eaton) figyelembe veszi a nagy méretű pórusok átrendeződés által történő bezárását, illetve a kis pórusok bezárását deformációs hatások alapján [1, 19]:

$$\frac{V_0 - V}{V_0 - V_\infty} = k_3 \exp\left(-\frac{p_g}{p}\right) + k_4 \exp\left(-\frac{p_k}{p}\right)$$

ahol V_0 a brikettálandó anyag kiindulási térfogata, p_k ill. p_g a nagyobb, ill. kisebb pórusok bezárásának nyomása, k_3 és k_4 anyagfüggő tényezők. A k paraméterek az elméletileg lehetséges maximális tömörítési részt adják meg, ami a nagyobb ill. kisebb pórusokra vezethető vissza. A modellt kerámia porokra dolgozták ki, azonban aprított biomasszákra is használják (Mani, Shaw).

Rieschel által adott összefüggés finomszemcsés anyagokra érvényes (homok, szén, mész, szóda):

$$p = B \left[e^{\left(1 - \frac{\eta_{v0}}{\eta}\right) \frac{1}{CM}} - 1 \right],$$

ahol $M=0,4343$, B és C anyag konstansok, η_{v0} préselés kezdetén a sűrűség, η_v p nyomáson a sűrűség. Runge és Weissgüttel dugattyús préssel mészkeő poron ill. PVC poron végzett kísérletei alapján két összefüggést adnak meg:

$$\rho = \rho_{max} \left[1 - v \left(\frac{\sigma}{b} \right)^K \right],$$

ahol K a feszültség-sűrűség diagram görbületi indexe, σ a normálfeszültség, b a vonatkoztatási feszültség, v a tömöríthetőség:

$$v = \frac{\rho_{max} - \rho_0}{\rho_{max}}.$$

A másik egyenlet:

$$\rho = p_1 + p_2 \sigma + p_3 \exp(-p_4 \sigma),$$

ahol $p_1 \dots p_4$ anyagfüggő együtthatók [16].

A Walker által felírt –Johanson féle kapcsolattal rokon– összefüggés a kompresszibilitásra [18, 51]:

$$V = -w \log(P) + V_1,$$

ahol V a relatív térfogat, w a Walker együttható, és V_1 a relatív térfogat 1 MPa-on.

Biomasszákra vonatkozó összefüggések

A szecskázott biomasszák tömörítésének modellezésére is számos összefüggés létezik. Walker a következő modellt kalcium karbonát és tetronitrometilaminra dolgozta ki, de számosan alkalmazták biológiai anyagokra is:

$$V = a_1 - K_1 \ln P,$$

ahol V a relatív térfogatarány, P az alkalmazott nyomás, a_1 és K_1 konstansok. Egy másik elterjedt összefüggés a nyomás térfogátváltozás leírására Kawakita és Ludde nyomán:

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{a_2 b_2} + \frac{P}{a_2},$$

ahol P az alkalmazott nyomás, a_2 és b_2 konstansok, C a relatív térfogatsökkenés, vagy terhelés:

$$C = \frac{V_0 - V_p}{V_0},$$

ahol V_0 a kezdeti térfogat, és V_p a térfogat bármely adott nyomáson. Sone modellje nagy hasonlóságot mutat az előbbi modellel [15].

Skalweit modellje 10 MPa-ig mutatja a szalmabrikettálás nyomás térfogátváltozás összefüggését:

$$\frac{p_{k0}}{\rho_0^m} = \frac{p_k}{\rho^m} \text{ azaz } p = C \rho^m,$$

ahol p_{k0} és ρ_0 a kezdeti feltételeket mutatják, p_k és ρ a végső állapotot, m anyagfüggő tényező. A modell alapján Sacht is összefüggést dolgozott ki 20 MPa nyomástartományig szénára, zab, ill. búzaszalmára. Busse 20...200 MPa tartományra kötőanyag nélküli aprítatlan szalma préselésre a következő összefüggést adta:

$$p_k = e \left[\left(c_0 + c_1 \frac{U}{100} \right) + \left(c_2 + c_3 \frac{U}{100} \right) \rho \right],$$

ahol $c_0..c_3$ anyagfüggő tényezők, U az anyag nedvességtartalma. Kutzbach fejlesztette tovább a modellt kisebb nyomástartományok irányába is [16].

Matricás pelletáló berendezések nyomásviszonyaival többek közt Quandt, Heijft, Achilles, Wieneke és Orth foglalkozott [16].

A [21] vizsgálta a biomasszák kompaktálásának mechanizmusát, különböző nyomások és szemcseméretetek esetén. Vizsgálta továbbá a létező kompaktálási modellek alkalmazhatóságát biomasszákra. A biomasszák cellulózt, hemicellulózt, proteint, lignint, nyers rostot és hamut tartalmaznak. A ligninnek alacsony az olvadáspontja (140°C). Ha a biomasszát hevítik, a lignin lágy lesz és olvad, és hőre keményedő tulajdonságokat mutat.

A Heckel modell a porok kompaktálhatósági viselkedését mutatja:

$$\ln \frac{1}{1-\rho_f} = mP + n,$$

$$\rho_f = \frac{\rho}{\rho_1 X_1 + \rho_2 X_2},$$

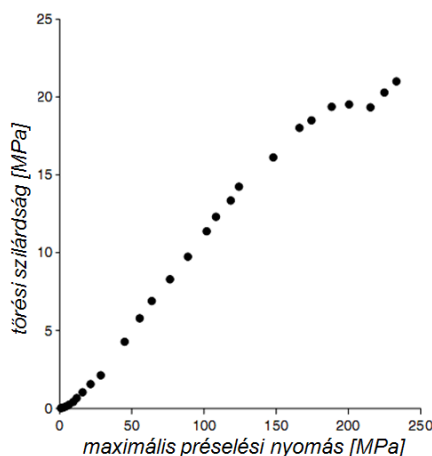
ahol ρ_f a tömörségi hányados ill. az anyag relatív sűrűsége a részecskék átrendeződése után, P az alkalmazott nyomás, m és n a Heckel modell konstansai, ρ a kompaktált porkeverék laza sűrűsége, ρ_1 és ρ_2 a komponensek anyagi sűrűségei, X_1 és X_2 a komponensek tömeghányadai a keverékben. Nagy ρ_f érték azt jelzi, hogy nagy térfogat csökkenés lesz a mintán a részecskék átrendeződésének hatására. Az m konstans a fő alakváltoztató nyomás reciproka, ami a plasztikus deformációhoz szükséges. Nagy m érték jelzi a plasztikus deformáció kezdetét relatív alacsony nyomáson, ami mutatja, hogy az anyag kompresszibilisebb. A vizsgálatok megállapították, hogy a biomasszák (búzaszalma, árpaszalma, kukorica takarmány, díspázsit) finomabb szemcseméretre történő aprítása nagyobb laza sűrűséget eredményezett. A préselési erő a kezdeti szakaszban lassan, közel állandó meredekséggel emelkedett (szemcsék átrendeződésének szakasza, ahol a pórusok eltűnnek), biomasszától függően különböző ideig. Ezt követően az idő előre haladtával a préselő görbe meredeksége jelentősen nő, amely jelzi, hogy az elasztikus plasztikus deformációval, ill. alakváltozással történő tömörítést. Általánosságban elmondható, minél kisebb a szemcseméret, az átrendeződés annál hamarabb megtörténik. A vizsgálat megállapította, hogy a Kawalita-Lüdde és a Cooper-Eaton modellek nagyon jól illeszkedtek a kompressziós adatokra [21].

A [21]-hez hasonló vizsgálati sort hajtott végre [22] a kutatása során (azonos biomasszák, ill. azonos szemcseméretetek), vizsgálta a szemcseméret, nedvességtartalom és préselő hatását. Minden paraméter fontos hatással bírt a tablettákra, kivéve a szemcseméret a búzaszalma esetén. A legnagyobb sűrűséget a takarmánykukoricával sikerült elérni, 12 % nedvességtartalommal (1136 kg/dm^3) [22].

2.5.2 Tömöríthetőség

Tömöríthetőségre számos összefüggés létezik, ezek közül néhányat ismertetek ebben az alfejezetben. A lineáris összefüggés helytállóságát vizsgálta a [18], 11-féle a gyógyszergyártásban használatos finom por esetén. A kompaktálási idő $400...540 \text{ ms}$ volt, a tabletták tömegét 500 ill. 1000 mg -ra választották, átmérőjük 15 mm , a préselési nyomás $0...240 \text{ MPa}$ tartományon belül volt. A törési szilárdságot határozták meg, az eredményekre egyenest illesztettek. Az eredmények alapján elmondható, hogy az összefüggés kis nyomások esetén nem lineáris, mivel eleve nehéz meghatározni, hogy

milyen nyomástól létezik összeálló tabletta, nagy nyomásokon -ahol lemezeltség-jelentkezik sem lineáris. A kapcsolat a legjelentősebb tartományon belül lineáris összefüggéssel jól leírható (2.14. ábra).



2.14. ábra: Préselési nyomás törési szilárdság tipikus összefüggése [18]

A vizsgálatok során megállapítható, hogy a tabletta mérete nem volt befolyással az eredményekre. [18]

A kompresszibilitás vizsgálata során Walker egyenletet illesztette a szerző [18] a kapott értékekre, amely a nátrium-klorid esetén kevésbé tökéletesen illeszkedett, mint a többi, ridegebb anyag esetén. Vizsgálta a tömöríthetőség ill. a kompresszibilitás közti összefüggéseket is, a pozitív kapcsolat azt jelenti, hogy mindkét érték magas (pl. mikrokristályos cellulóz esete), ekkor az anyag deformálódik nyomás hatására, nagy a kompresszibilitása, számos új kötési pont alakul ki, ahol erős kötések alakulnak ki. A keményítők elasztikus deformációt szenvednek, ez lehet az oka az eltérő viselkedésének. [18]

Leuenberger szerint növekvő nyomással ill. tömörítéssel nő a szilárdság, azonban a szilárdság növekedése annál kisebb, minél inkább a tömörödés a határértékhez közelít. A szilárdság leírására alkalmas modell [2]:

$$\sigma = \sigma_{max}(1 - \exp[-k p \gamma_r]),$$

ahol σ_{max} a maximális lehetséges brikett szilárdság, k anyagfüggő préselési szuszceptibilitás. A határtömörítésnél a brikett sűrűség a tiszta anyagsűrűségnek felel meg.

Higuchi szerint a törési szilárdság az alábbi összefüggéssel írható le [18]:

$$CS = a \log(P) + b,$$

ahol P maximális kompaktálási nyomás, b konstans.

Newton és Grant szerint a törési szilárdság:

$$\log(CS) = a \log(P) + b.$$

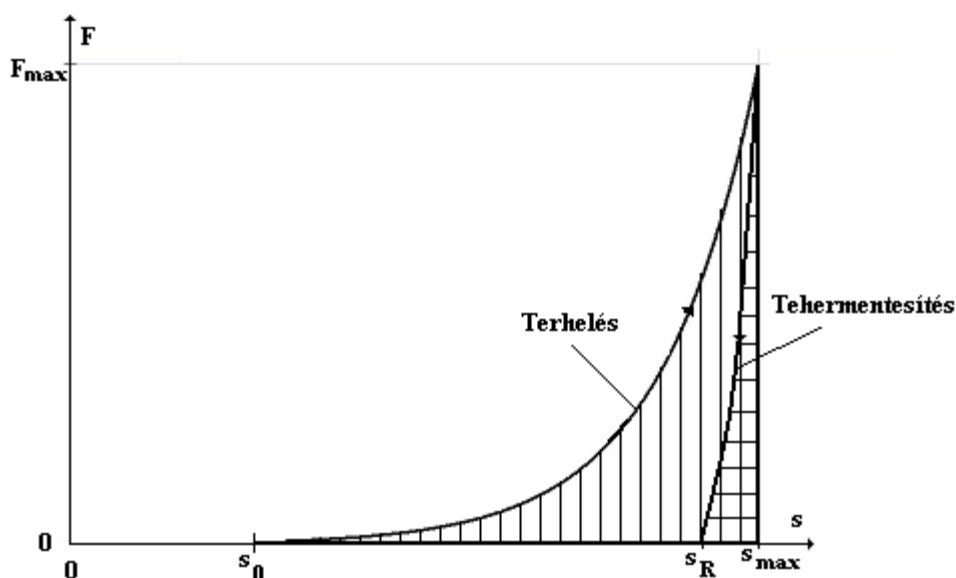
Kuenz és Leuenberger szerint [18]:

$$CS = k P^{T/2},$$

ahol T konstans.

2.5.3 Tablettázás erő-elmozdulás diagramja

A tablettázáshoz szükséges munkát a mért erő-elmozdulás görbe (2.15. ábra) integrálásával kapjuk. A terhelés (préselés) során a *Terhelés-görbe* mentén s_0 és $s_{\max}$ között $W_A = \int F(s) ds$ munkát szükséges befektetni (függőlegesen vonalkázott terület), a tehermentesítés során gyakran rugalmas visszatágulás következik be (*Tehermentesítés-görbe*), mely során a befektetett munkának egy csekély része felszabadul, ez a gyakorlatban nem visszanyerhető.



2.15. ábra: Erő-elmozdulás görbe a tablettázás során

A *Terhelés*-, ill. *Tehermentesítés*-görbék közti terület megfelel a plasztikus elváláshoz, súrlódáshoz ill. aprózódáshoz felhasznált irreverzibilis munkának. Tömegegységre vonatkoztatva megkapjuk a fajlagos tablettázási munkát kJ/kg dimenzióban [2, 50].

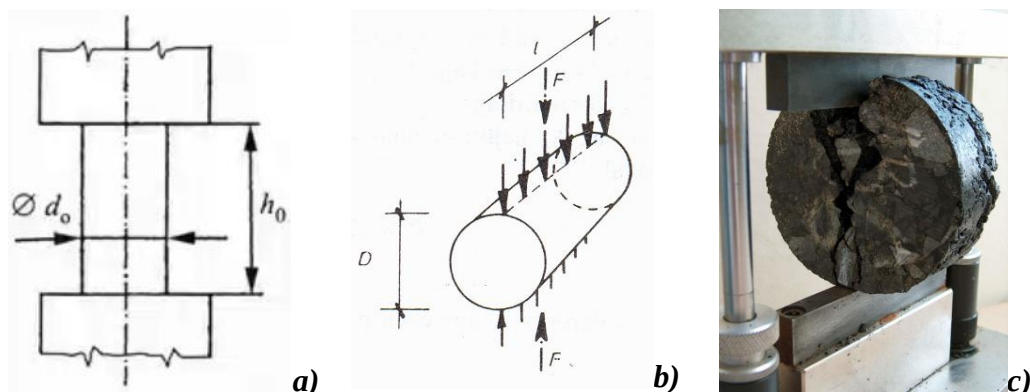
2.6 Brikettek minősítése

A brikett minőség jellemzésére a törési szilárdság és a brikett sűrűség a legalkalmasabb. Gyakorlati szilárdságvizsgálatok elvégzésére több lehetőség is adódik. A mindenkori szilárdsággal kapcsolatos követelményeknek megfelelően azok vizsgálatára technológiai tesztmódszereket alkalmaznak. Sokat a gyógyszeripar érdekének megfelelően fejlesztettek ki (tablettavizsgáló berendezés), viszont más termékek vizsgálatánál is alkalmazzák. Fontos szerepet tölt be a nyomó-, ill. húzószilárdság vizsgálata a mérnökgeológia és az építőipar területén is. A legfontosabbak a következőkben kerülnek bemutatásra.

2.6.1 Nyomószilárdság vizsgálata

Közetek egyirányú nyomószilárdságának meghatározására legáltalánosabban elterjedt módszer a henger alakú próbatesten végzett nyomószilárdság vizsgálat, mivel a

fűrőmagból a próbatest könnyen kialakítható, illetve a közettömbből laboratóriumban is ez a próbatest munkálható ki a legegyszerűbben. A vizsgálat eredményét befolyásolja a próbatest magasság-átmérő arány, anizotróp próbatestek irányítottsága és a nedvességtartalma, valamint a próbatest és a nyomólapok közti súrlódási tényező [41, 43]. A vizsgálatokat a 2.16. ábra szemlélteti.



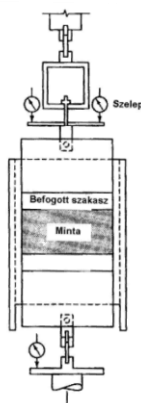
2.16. ábra. Nyomószilárdság (a) ill. hasítószilárdság (b és c) vizsgálata [42, 45, 46].

A mérnökgeológiában és az építőiparban elterjedt még a henger alakú próbatestek hasító vizsgálata is (2.16. ábra (b és c)). Több módszer létezik, a vizsgálat használható olyan esetben is, ahol nincs lehetőség próbatest kialakítására, ekkor a magdarabot az egymással szemben lévő 35...45°-os lapszögű hasító élek közé helyezik, és egyenletes terheléssel eltörik [43]. Más esetben a hengeres próbatest tengelyével párhuzamos (2.16. ábra (b és c)) ill. merőleges lehet a törőél [42, 43, 46].

Triaxiális nyomóvizsgálat a szabályos próbatesteken többtengelyű feszültségterben a törés-épenmaradás határállapota összetartozó feszültség értékeinek meghatározását jelenti.

2.6.2 Húzószilárdság vizsgálata

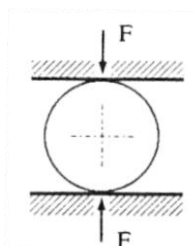
Húzószilárdság valamely szilárd test egységnyi keresztmetszetére eső akkora megterhelés, amelynél a szakadás bekövetkezik. Az egyszerű húzókísérlet adott karcsúságú hengeres mintatesteken végzik, a mintatest véglapjait a berendezés pofáiba rögzítik, és növekvő tengelyirányú húzóterhelések teszik ki (2.17. ábra) [35].



2.17. ábra. Egyszerű húzóvizsgálat [44]

A kísérlet folyamán mérjük a tengelyirányú húzóerőt (sugár, ill. érintő irányú feszültség nem lép fel, csak triaxiális vizsgálat esetén). A mintatest húzószilárdsága a maximális húzóerő ill. mintatest keresztmetszetének hányadosából adódik.

Közvetett húzóvizsgálat (Brasil-vizsgálat, diametrális nyomóvizsgálat) alkalmazása hengeres testek (esetleg golyók, vagy más szabályos formák) esetében lehetséges. Ezt a vizsgálati módszert többek közt közetmechanikában, gyógyszergyártás [33, 34], ill. brikettálás során használják. A mintatestet nyomólapok közé helyezzük úgy, hogy a mintatest két alkotója (henger esetén) mentén érintkezzen a nyomólapokkal, és ilyen helyzetben közelítjük lassan egymáshoz a nyomólapokat, törésig ($F_{\max}$) tereljük a mintatesteket.



2.18. ábra. Közvetett húzóvizsgálat

A húzószilárdság a következő összefüggéssel számítható [35]:

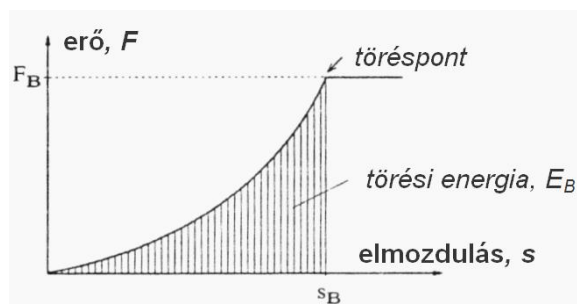
$$\sigma_z = \frac{2 F_{\max}}{d \pi l}.$$

A nedvesen agglomerált (pelletezés) és szárított golyókra gyakran fennáll az alábbi egyszerű összefüggés a törőerő és az agglomerátum tömege közt [2]:

$$\frac{F_B}{F'_B} = \left(\frac{m}{m'} \right)^b.$$

A törőerő és a törőpofa elmozdulásának mért értékeit kettős logaritmikus hálón ábrázolva közelítőleg egyenest kapunk, amin a tetszőleges F'_B és m' vonatkoztatási értékek találhatók, és aminek az emelkedése b -vel egyenlő. Általában a b értéke 0,45...0,7 között mozog. Informatívabb azonban időigényesebb az erő-elmozdulás diagramok felvétele, amiből az agglomerátum ridegségére, plasztikus deformálhatóságára következtethetünk. Ezen kívül az erőnek az út szerinti integrálja (2.19. ábra) a törésig befektetett munkát (törési energiát) adja. [2]

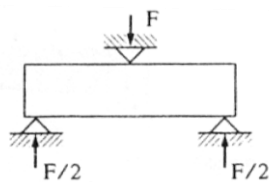
$$\int_0^{s_B} F(s) ds = w_B.$$



2.19. ábra: Törési energia [2]

2.6.3 Hajlítószilárdság vizsgálata

A hajlító szilárdságot tabletták, vagy más lemezes alakú, hosszúkas agglomerátumok esetében célszerű vizsgálni, ha az alkalmazásuk során hajlítási igénybevétel is fellép (pl. ceruzabél, kréta, keksz stb.). Az igénybevételi módot (három pontos terhelés) az 2.20. ábra szemlélteti.



2.20. ábra: Hajlítószilárdság vizsgálata

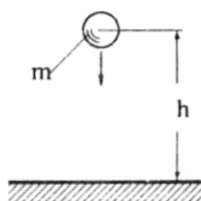
Ha azonos termékek sorozatban vizsgálándók (pl.: minőségbiztosítás), elegendő a törőerő és egy toleranciatartomány megadása relatív szilárdságértékekhez. A hajlítószilárdság vizsgálat eredményéből a maximális szakítószilárdság számítható:

$$\sigma_{Bmax} = \frac{M_{Bmax}}{w_B},$$

ahol M_{Bmax} a maximális hajlító nyomaték, w_B a próbatest keresztmetszet hajlítási ellenállás momentuma. Ez az egyszerű módszer csak akkor alkalmazható, ha a próbatest homogén és izotróp és lineárisan rugalmas tulajdonságokat mutat [2, 36].

2.6.4 Ejtési vizsgálat

Az ejtési vizsgálat fontos minden agglomerátum esetében, aminek a szállítás, ill. adagolás során szabad esést törés nélkül ki kell bírniuk. Ütközéssel vizsgálatról van szó.



2.21. ábra: Ejtési vizsgálat

Megadható például az ejtési vizsgálatok száma, amit adott magasságból az agglomerátum sértetlenül kibír. Megadható azonban a törési valószínűség az ejtési energia függvényében [2]. A H magasságból történő törési valószínűség:

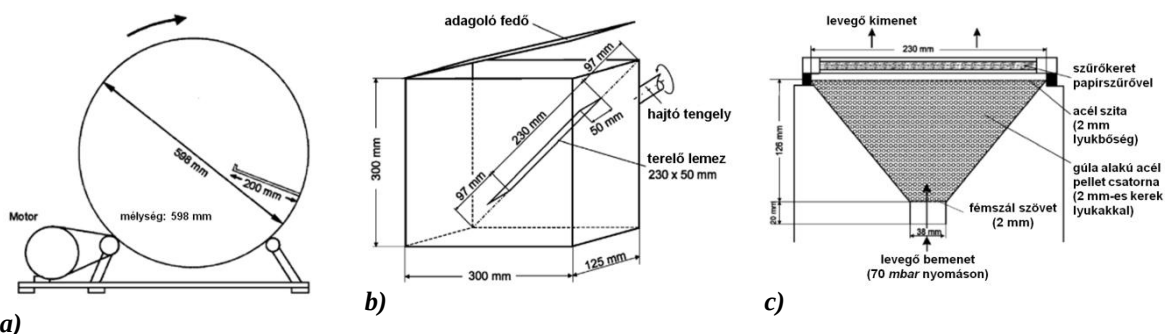
$$P_H = \frac{m_{tört}}{m_{összes}},$$

ahol $m_{tört}$ az összetört agglomerátumok száma, $m_{összes}$ az összes agglomerátum száma.

2.6.5 Morzsolódás vizsgálata

A vizsgálatot végezhetik vízszintes tengelyű forgódobban. Az előre megadott fordulatok száma által egy meghatározott igénybevételi időtartam elérhető. Az eredmény a százalékos szitaáthullás értéke lesz (szitalyukbősség < agglomerátum méret). Koks és szén például

vizsgálható ezen a módon, napjainkba a biopelletek is hasonló módon minősíthetők, ekkor azonban más formájú dobokat is használhatnak (pl. szögletes), esetleg fluidizált állapotot hoznak létre az igénybevétel biztosítására.



a)

b)

c)

2.22. ábra. Forgódob (a), ASAE S269.4 (b) és Ligno Tester (c) morzsolódás vizsgálók [13]

ASAE S269.4 (2.22. ábra) főként biopelletek minősítésre kifejlesztett szögletes mintaelemző dimenziói: 300×300×125 mm, 500 g mintát 500 fordulaton át tartanak benne, majd 3,15 mm lyukbőségű szitán választják le a lemorzsolódott részeket. Az ONORM M 7135 szabvány a Ligno-Tester LT II-t használja morzsolódásos vizsgálatokra. A berendezés légárammal keveri a 100 g mintát adott ideig, a finom rész a berendezés perforált falán át távozik [2, 13]. Morzsolódás vizsgálatára Deval dob is használható.

3 VIZSGÁLATI BERENDEZÉSEK ÉS ÉRTÉKELESI MÓDSZEREK

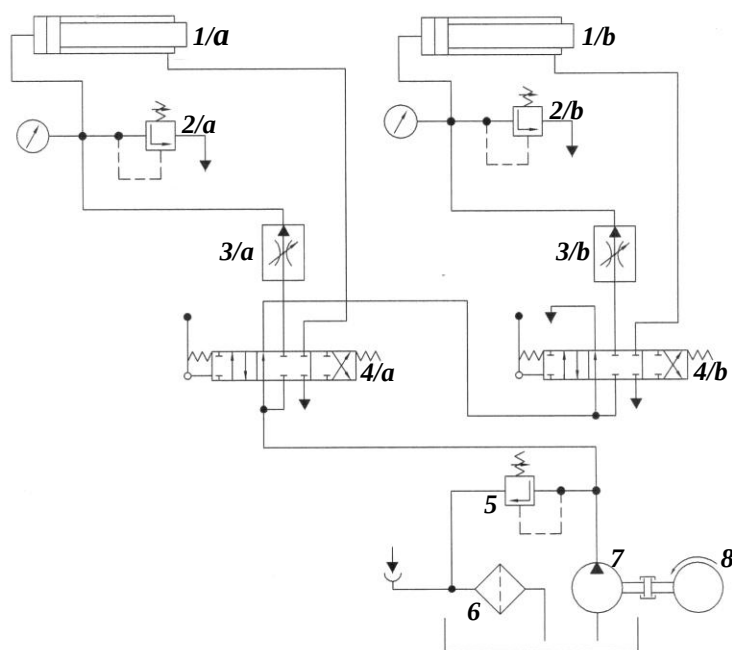
A szakirodalmak, valamint a korábbi szén-biobrikett vizsgálatoknál szerzett tapasztalataim alapján alakítottam ki a vizsgálati és értékelési módszereket, illetve fejlesztettem tovább a kísérleti berendezéseket.

3.1 Kísérleti munka leírása

A vizsgálataimba elsősorban a hiányterületekről, nevezetten hulladékanyagok köréből vontam be anyagokat. Ennek megfelelően a vizsgálat a rideg ásványi anyagoktól kezdve a szálaz, viszkoelasztikus anyagokon át ezek keverékeire terjedt ki. A vizsgálatok során 25 mm átmérőjű tablettákat készítettem, a tablettázás során változtattam a préselési nyomást, bizonyos esetekben a dugattyú sebességét ill. préselési hőmérsékletet. A készült tablettákat sűrűségük és húzó szilárdságuk alapján minősítettem, meghatároztam a fajlagos tablettázási munkákat. Minden esetben meghatároztam a préselési nyomás és sűrűség, valamint préselési nyomás húzó szilárdság közti összefüggéseket.

3.2 Kísérleti berendezés

A kísérleteket a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézete által kifejlesztett, és legyártott hidraulikus brikettáló-berendezéssel (3.2. ábra) folytattam le. A hidraulikus kapcsolási rajz a 3.1. ábrán látható. A berendezés egy nyomáshatárolóval (5) ellátott hidraulikus tápegységről (ábrán 5...8 jelű egységek) üzemel.



3.1. ábra. Kísérleti berendezés egyszerűsített hidraulikus kapcsolási rajza

Két hidraulikus dugattyú található rajta, a felső (1/a) – préselésre használt – 200 kN maximális erő kifejtésére képes. Az alsó (1/b) kizárólag a kész brikett kiemelésére szolgál. A dugattyúk útváltó szelepek segítségével mozgathatók (4/a és 4/b). A dugattyúkba jutó olaj nyomását (így a tabletta felületére ható erőt) tetszőleges, előre beállított értéken le lehet határolni a nyomáshatárolókkal (2/a ill. 2/b). A dugattyúk sebességei a mennyiségállandósító szelepekkel (3/a és 3/b) állíthatók, a présdugattyú maximális sebessége 30 mm/s. A hüvely, biobrikettek és műanyag brikettek készítése érdekében fűthető, a hőmérséklet 20 és 140 °C között szabályozható.

Kutatómunkám érdekében az eredeti mérő berendezést továbbfejlesztettem, az alábbi eszközökkel láttam el: inkrementális távolságmérő a dugattyú elmozdulásának mérésre, erőmérő a fellépő erők meghatározására, hüvely fűtését szabályozó rendszer, 25 mm átmérőjű tabletta előállítására alkalmas hüvely és dugattyú, valamint számítógépes adatrögzítő rendszer. Az berendezés megépítését és eszközökkel történő ellátását Antal Gábor irányításával az intézeti műhely végezte, a számítógépes adatgyűjtő szoftvert Dr. Fajtli József készítette el.



Műszaki adatok	
$F_{\max}$	200 kN
$V_{\max}$	30 mm/s
Hőmérséklet tart.	20 - 140 °C
Tabletta átmérők	25 ill. 40 mm
Távolságmérés	Inkrementális
Adatfeldolgozás (erő, távolság)	PC, LabWindows

3.2. ábra. Hidraulikus brikett-prés

A mérés kezdetén meghatároztam a berendezés dugattyújának sebességét a mennyiségátároló szelep különböző beállítási értékeknél (0...10 skála). Az egyes sebességi fokozatokban több próbapréselést is végeztem, melyek eredményeit a 3.1. táblázat mutatja.

3.1. táblázat. Dugattyú mozgási-sebességének kiértékelése

	Berendezésen beállított értékek				
	2	4	6	8	10
Nyomás [MPa]	Sebesség [mm/s]				
100	5,63	12,81	20,15	28,08	34,76
150	5,84	11,69	19,9	27,28	36,57
200	5,54	12,4	19,41	28,4	32,85
250	5,88	12,47	20,19	28,74	33,74
Relatív szórás [%]	2,48	3,30	1,56	1,92	4,01
Átlagértékek [mm/s]	5,72	12,34	19,91	28,13	34,48

A táblázat első oszlopában látható, hogy a próbaüzemben különböző nyomásokon indítottam el a dugattyút. A többi oszlopban a beállított értékekhez tartozó sebességértékek találhatók. Minden sebességadat több vizsgálat átlagából adódik. A különböző nyomásokon végzett, egy oszlopban található adatokból és azok relatív szórásából látható, hogy a nyomás nem befolyásolja számottevően a dugattyú mozgási-sebességét. Ezeket az eredményeket ezért az oszlopok alján átlagoltam.

3.3 A törési szilárdság meghatározására szolgáló berendezés

A próba brikettek törése a Miskolci Egyetem Mechanikai Technológiai Tanszéken egy hidraulikus törőgéppel történt. A berendezés az összenyomó erőt az elmozdulás függvényében rögzítette.

A préstabletták törése hidraulikus törőgéppel történt, melyet az MTS Systems Corporation (Minneapolis, Minnesota, USA) gyártott. A szerkezetnek négy nagyobb egysége van: terhelőkeret, vezérlőelektronika, hidraulikus rendszer és a számítógép.

A terhelőkeretben található a munkahenger, amely maximálisan 250 kN erővel képes húzni-nyomni. A munkahengeren helyezkedik el az erőmérő cella (modell: 661.23A-01), amely szintén 250 kN-ig terhelhető. A berendezéshez többfajta alakváltozás mérésére alkalmas műszert lehet csatlakoztatni. A munkahengerbe épített útdó inductív elven működik (LVDT – lineáris differenciál transzformátor). A többi mérőrendszer mérőbéllyeges elven működik, melynek lényege, hogy a mérőelem rugalmas, erre ragasztják rá a bélyeget.

A vezérlő elektronika egy szervo-szelepet mozgat, ami beengedi a hidraulikafolyadékot a munkahengerbe. A rendszer nyomása 210 bar. A kísérlet során a munkahenger elmozdulását szabályoztam. Az elmozdulásokat számítógép rögzítette.



3.3. ábra. Hidraulikus törőgép, kiértékelő berendezés

3.4 Brikettek minősítése

A brikett minőség jellemzésére a brikett sűrűség meghatározásán túl a 2.6 fejezetben bemutatott módszerek közül a húzószilárdságot használtam.

3.4.1 Tabletta sűrűség meghatározása

A tabletták sűrűségével jól és egyszerűen jellemezhető a minőségük. A munkám során tolómérő segítségével meghatároztam a tabletták átmérőjét. A hüvely átmérője 25 mm, azonban bizonyos hulladéktípusoknál a préselés után tágulás léphet fel, ezért kellett meghatározni az átmérőt is. Tolómérőt használtam a tabletták magasság meghatározáshoz is. Minden esetben adott tömegű mintát mértem be a préseléshez a berendezésbe, azonban a préselés, tabletták eltávolítás során kis tömegvesztések léptek fel, ezért minden elkészült tabletták tömegét meghatároztam. Ezekből az adatokból határoztam meg a tabletták sűrűségét az alábbi képlet alapján:

$$\rho_t = m / V = 4 m / (D^2 \pi h), \text{ ahol}$$

ρ_t	a tabletták sűrűsége,
m	a tabletták tömege,
V	a tabletták térfogata,
D	a tabletták átmérője,
h	a tabletták magassága.

3.4.2 Közvetett húzószilárdság vizsgálat

Ezt a módszert használtam a tabletták húzó szilárdságának meghatározására. A tablettákat két síklap közé élükre állítva, a 3.3 fejezeten bemutatott berendezéssel történt a szilárdság meghatározása.



3.4. ábra. SiC tabletták törése

A berendezés rögzíti a vizsgálat során a törőpofa elmozdulását, és a fellépő erőt. Az értékpárokból felvehető a törés erő-elmozdulás függvénye (2.19. ábra). A vizsgálataim során, az adott tabletták törése során fellépő maximális erőből számoltam a húzó szilárdságot. A húzó szilárdság a következő képlet szerint számítható:

$$\sigma = 2 F_{\max} / (\pi h D), \text{ ahol:}$$

σ :	a tabletták húzó szilárdsága,
$F_{\max}$:	a maximális erő a törés során.

A h ill. D meghatározáshoz az azonos paraméterekkel készült tabletták magasságának átlagát, valamint az átlagos átmérőjét használtam.

4 ÁSVÁNYOS POR KÖTŐANYAGGAL TÖRTÉNŐ AGGLOMERÁLÁSA

Ebben a fejezetben a szilícium-karbid por kötőanyaggal történő brikettálhatóságának vizsgálatát ismertetem. A kísérletekhez használt szilícium-karbid por a csiszolóanyag gyártás során keletkezik, nagyméretű szilícium-karbidok aprításánál hulladékporként. Újrahasznosítása fontos feladat, egyrészt azért, mert fel nem használása esetén veszélyes hulladékként kell tárolni, vagy deponálni, másrészt a szilícium-karbid dezoxidálószer és ötvöző is, a felhasználása iránt igény van az acélművek és az öntödék részéről [24, 55].

4.1 Szilícium karbid

A szilícium karbid a természetben igen ritkán előforduló anyag, inkább a mesterséges előállítás jellemzi. Igazolja ritkaságát, hogy jó 50 évvel az első előállítás után találta meg a természetben Dr. Ferdinánd Henri Moissan Arizónában a „Canyon Diablo” nevezetű meteoritban. Róla kapta a természetes szilícium karbid az ásványtani Moissanit elnevezést. Legalább 70 különböző kristályformában fordul elő. Leggyakrabban az α -SiC-el találkozhatunk, viszont manapság egyre nő a kereslet a β -SiC iránt is a gyémánthoz való hasonló tulajdonságai miatt. A szilícium és a karbon egyetlen vegyülete. Nagyon kemény és rideg anyag. Kémiaileg igen ellenálló, vízben oldhatatlan, 800 °C alatt nem lép reakcióba savval, lúggal és olvasztott sóval sem. A legnagyobb tisztaságú kristályok fehérek vagy színtelenek, a szennyeződést tartalmazóak színei nagyon változatosak. Jó a hővezető képessége.

4.1. táblázat. Szilícium karbid fizikai tulajdonságai

Olvadáspont	3103 °K
Sűrűség	3170...3210 kg/m ³
Keménység	9,2...9,3 Mohs skálán
Felületi mikrokeménység	2900...3100 mm ²

A szilícium karbid előállítására több módszer is rendelkezésre áll. Az eljárás kiválasztásánál figyelembe kell venni, hogy milyen tisztaságú, nagyságú kristályt és mennyit szeretnék előállítani. Minél tisztább és nagyobb kristályt gyártunk, az előállítási költségek annál magasabbak. A főbb előállítási lehetőségek a következők [11]:

- A legegyszerűbb gyártási eljárás Acheson grafit kemencében történik. A kemencébe szilíciumot és karbont adagolnak, majd 1600 - 2500 °C hőmérsékletűre melegítik fel.
- A Lely eljárás tiszta SiC-t eredményez, itt SiC port szublimáltatnak argon atmoszférában 2500 C-on és kristályosítják egy valamivel hidegebb anyagon.
- A CVD felületkezelési eljárás (Chemical Vapor Deposition - kémiai gázfázis leválasztás) lényege, hogy a felületi bevonat kialakításakor a megfelelő reakciók a gáztérrel körülvett hordozó felületen jönnek létre, biztosítva a bevonatolás egyenletes minőségét. Az eljárás során valamilyen vegyületnek felületen történő termokémiai bontásával és újabb reakcióval érik el.
- A PVD felületkezelési eljárásokban (Physical Vapor Deposition) a gázfázis átalakítandó vegyületet vagy nem tartalmaz, vagy a meglévő vegyület bomlása még gázfázisban megtörténik fizikai úton.

- Nagy tisztaságú szilícium-karbid előállítható polymer (poly methylsilyle) hőbontásával is inert atmoszférában, kis hőmérsékleten.

Felhasználása számos területen elterjedt, nagy keménysége és félvezető képessége miatt [11]. A legfontosabb felhasználási területek az alábbiak:

- *félvezető*: az elő rádiók detektora volt,
- *villámhárító*: már régen felfedezték azt a tulajdonságát, hogy kapcsolatot tud létrehozni a villám és a föld között
- *csiszolóanyag*: nagy keménységének köszönhetően csiszolófejeket, csiszolópapírokat készítenek belőle,
- *úrkutatásban* keménységének, ridegségének, ellenállóképességének köszönhetően alkalmas úrben használt eszközök készítéséhez,
- *kuplung*: Porsche Carrera GT típusú autóban,
- *diesel aerosol szűrő*: szinterezett formában használják ezeknél a szűrőknél,
- *vágószerszámok*: 1982-ben fedezték fel az alumínium oxid és a szilícium-karbid ötvöztetésének különösen nagy keménységét,
- *nukleáris üzemanyag borítás*: magas hőtűrő képességét kihasználva, a nukleáris töltetek borításaként,
- *acél*: kohászatban fémek fontos ötvöző anyaga,
- *páncél*: Chobham páncél készítése,
- *tárcsa fék*.

4.2 Szilícium karbid por minta eljárástechnikai vizsgálata

Ezen vizsgálatok -az ásványos összetétel meghatározásának kivételével- a Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetének laboratóriumában készültek [11]. A sűrűségmérés piknométeres módszerrel, etil alkoholt közegben történt.

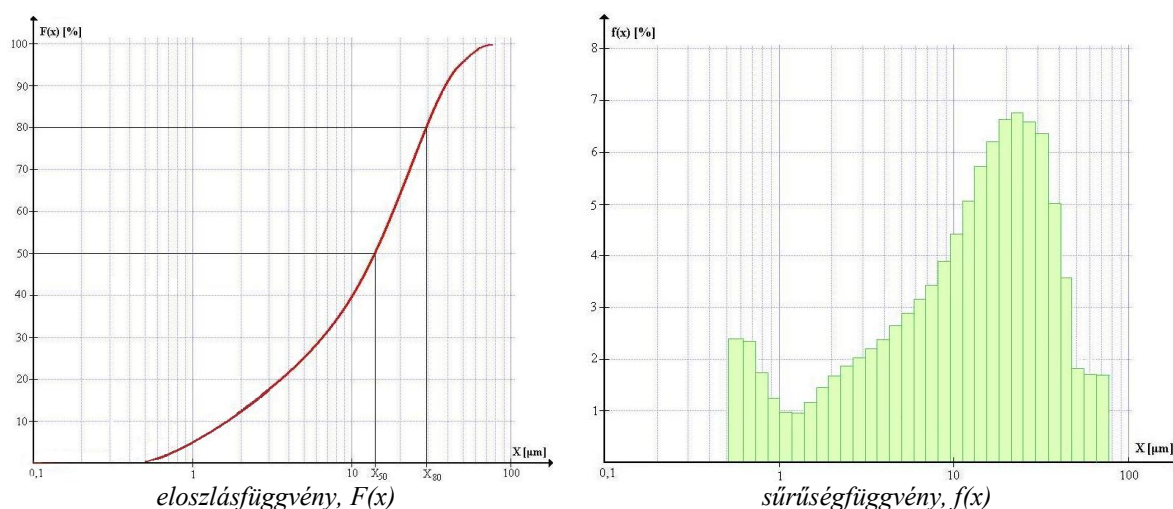
4.2. táblázat. SiC eljárástechnikai tulajdonságai

Tulajdonság	
sűrűség	3170 kg/m ³
fajlagos felület	280 m ² /kg
nedvességtartalom	0,2 %
szemcseméreteloszlás nevezetes értékei:	
X _{max}	76 μm
X ₈₀	29 μm
X ₅₀	14 μm

A fajlagos felület meghatározása intézetben található Griffin- készülékkel történt. A mérés a porágy légáteresztő képességén alapszik. A vizsgált szilícium karbid por fajlagos felülete 281,17 m²/kg- ra adódott. A szilícium-karbid porból mintákat 24 órára szárítószekrénybe helyeztem 105 C-on a nedvességtartalom meghatározás céljából, megállapítható hogy a brikettálás szempontjából a nedvességtartalma elhanyagolható (0,2 %).

A szemcsenagyság vizsgálata a Fritsch Analysette 22 lézeres szemcsenagyságelemzővel történt. Az eredmények alapján az alábbi eloszlás és sűrűségfüggvény vehető fel (4.1. ábra). A diagramokból jól látszik, hogy a szemcsetartomány 0,5 -76 μm között van. Fontos megemlíteni, hogy a por jelentős része, közel 40%-a 0,25 – 10 μm- os tartományba esik, mely fokozottan veszélyes az emberi egészségre, szilikózist okoz, ezért ha a por nem kerül

hasznosításra, veszélyes hulladékként lerakják. Az eloszlásfüggvényről leolvasható a két jellegzetes szemcsenagyság értéke: $x_{50} = 14 \mu\text{m}$ és az $x_{80} = 29 \mu\text{m}$.



4.1. ábra. Szilícium karbid por eloszlás-, ill. sűrűségfüggvénye

Az ásványos összetétel vizsgálatát az Ásványtani Tanszéken végezték el, röntgen diffrakciós módszerrel. A mintában a Moissanite-6H módosulatából található a legnagyobb mennyiségben, közel 90 %-ban. Ezen kívül a vizsgált por tartalmaz 4% Moissanite- 4H-t és 5,7 %-ban szilícium-karbidot és kis mennyiségben kvarcot. Vizsgáltuk az ásványos összetételt, a kapott minta pontos összetételének megismerése, és a későbbi reprodukálhatóság érdekében (4.3. táblázat).

4.3. táblázat. Szilícium karbid ásványos összetétele

Kémiai képlet	Ásványtani elnevezés	Tömegszázalék
SiC	Moissanite-6H	89,90%
	Moissanite-4H	4,00%
	Szilícium karbid	5,70%
SiO ₂	Kvarc	0,30%
Si	Szilícium	0,00%

4.3 Kötóanyagok

Az SiC por gazdaságosan üzemeltethető nyomással nem brikettálható kötőanyag nélkül a vizsgált préseleési nyomás tartományban (0...300 MPa), ennek oka a rideg viselkedése. Poláros felületi tulajdonsága miatt poláros kötőanyag szükséges az agglomeráláshoz. A kötőanyaggal szemben támasztott követelmény továbbá a megfelelő brikettszilárdság biztosítása és az egyszerű beszerezhetőség. Nem kevésbé fontos szempont, hogy a kohászati felhasználás során ne szennyezzen a kötőanyag. A vizsgálatokhoz ezért három vízbázisú, viszonylag előnyösen beszerezhető kötőanyagot választottunk: Mozaik csemperagasztó (Akzo Nobel Coatings Zrt.), diszperziós falfesték (J. W. Ostendorf GmbH & Co. KG) és Palma-Faragasztó (Henkel Magyarország Kft.). A vízbázisú kötőanyagok nedvesítik a szilícium karbid por felületét. A nedvesség által javul a keverhetőség és elősegíti a kötések létrejöttét. A három diszperziós kötőanyag nedvességtartalmát és összetételét tartalmazza a 4.4. táblázat.

4.4. táblázat. Kötőanyagok, illetve kötőanyag alapanyagok összetétele

Kötőanyag neve	Összetétel [%]
Mozaik csemperagasztóból kinyert kötőanyag	vízbázisú akril diszperzió: 45,5 %, ebből nedvesség (mért): 40,7 %, mészkő: 45,5 %, adalékanyagok: 9,0 %.
Faust diszperziós falfesék	mért nedvesség: 40,1 %, összetevők: műanyag-diszperzió, töltőanyagok, színezőanyagok, segédanyagok, konzerválószer (izotiazolinon)
Palma Faragasztó (egykomponensű vizes diszperziós ragasztóanyag)	mért nedvesség: 50 %, összetevők: polivinilacetát alapú vizes diszperzió (etilénvinilacetát-kopolimér)

4.4 Kötőanyag kiválasztására irányuló kísérletek

E vizsgálatok célja, a kötőanyagok közül a legalkalmasabb kiválasztása a további részletes vizsgálatokhoz.

Csemperagasztó diszperzió

A Mozaik csemperagasztó a gyártó adatai szerint 70 %-ban tartalmaz homok mészkő keveréket. A vízbázisú akril diszperzió 25 %-ot tesz ki a ragasztóban, ezen felül 5 % egyéb adalékanyagot tartalmaz. Saját méréseim szerint 22,4 % a nedvességtartalma, és 45 % a homoktartalma a ragasztónak. A működési elve, hogy a ragasztó vízbázisú akril diszperziója száradás után filmet képez a szemcséken. A homokra nem volt szükség, ezért ülepítéssel eltávolítottam a ragasztóból víz hozzáadásával két bekeverési arányban. Az egyik esetben 40% volt a ragasztó, 60% a víz, a másik esetben 60% a ragasztó és 40% a víz. Ebből a keverékből –a homok kiülepítése útján- a vizes kötőanyagot kinyertem. Az így nyert víz bázisú (homokmentes) kötőanyagot adtam hozzá a szilícium karbid porhoz 2, 6, 8, 12 tömegszázalék arányban (c_k).

A préselési nyomást (100, 200 és végül 300 MPa) változtattam. A tabletták 10 g tömegűek, 25 mm átmérőjűek, magasságuk kis mértékben változott (9-10 mm). Minden összetételből legalább 5 tablettát készítettem a törési szilárdság meghatározására, a legkedvezőbb esetben további ötöt a vízfelvétel vizsgálatára.

Az összetételen és az alkalmazott nyomáson kívül fontos tényező a dugattyú sebessége - elegendő időt hagyva a szemcsék a tömörödéssel - melyet 10 mm/s-ra állítottam be, és a megfelelő halmazsűrűség elérése érdekében 3 s-ig rajta tartottam a nyomást a porágyon.

4.5. táblázat. Nedves tabletták akril diszperzió tartalmai

Kötőanyag tartalom a tablettában [tömeg %]	Alkalmazott préselési nyomások [MPa]	A kötőanyag csempereasztó diszperzió tartalma [tömeg %]	Számított vizes akril diszperzió tart. nedves tablettában [tömeg %]	Számított akril tartalom a nedves tablettában [tömeg %]
4	100, 200	40	0,73	0,08
4	100, 200, 300	60	1,09	0,11
8	100, 200	40	1,45	0,15
8	100, 200, 300	60	2,18	0,23
12	200	40	2,18	0,23
12	200, 300	60	3,27	0,34

Falfesték

A kísérletek során a tabletták kötőanyagtartalmát (8, 12 ill. 16 %), a kötőanyag (vízzel hígított falfesték) koncentrációját (40, 60 ill. 80 %) változtattam, a préselési nyomást 200 MPa-ra állítottam be. A tabletták 10 g tömegűek, 25 mm átmérőjűek, magasságuk kis mértékben változott (9-10 mm). Minden összetételből legalább 5 tablettát készítettünk a törési szilárdság meghatározására.

4.6. táblázat. Vizsgált kötőanyagtartalmak és koncentrációk falfesték esetén

Kötőanyag tartalom a tablettában [tömeg %]	A kötőanyag polimer diszperzió tartalma [tömeg %]
8	40
8	60
12	40
12	60
12	80
16	60

Faragasztó

A kísérletek során a kötőanyagtartalmat (8, 12 ill. 16 %), a kötőanyag (vízzel hígított faragasztó) koncentrációját (48, 72 ill. 96 %) változtattam, a préselési nyomást 200 MPa-ra állítottam be. A tabletták 10 g tömegűek, 25 mm átmérőjűek, magasságuk kis mértékben változott (9-10 mm). Minden összetételből legalább 5 tablettát készítettem a törési szilárdság meghatározására.

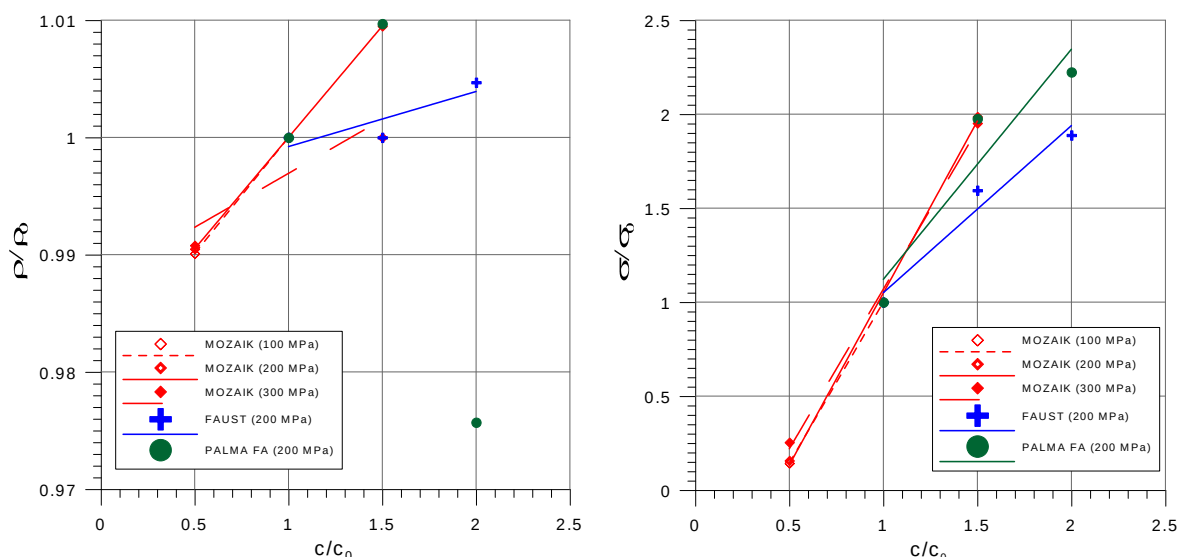
4.7. táblázat. Mérési eredmények 200 MPa nyomással készített SiC-brikettek esetében

Kötőanyag tartalom a tablettában [tömeg %]	A kötőanyag polimer diszperzió tartalma [tömeg %]
8	72
12	48
12	72
12	96
16	72

Megállapítások

Ábrázoltam a relatív kötőanyag tartalom függvényében a relatív tabletták sűrűségeket és a relatív törési szilárdságokat. Kötőanyagtartalom esetén $c_0 = 8\%$, ρ_0 ill. σ_0 a c_0 -hoz tartozó

sűrűség ill. húzószilárdság értékek. Csemperagasztó és falfesték esetén a 60% polimer diszperzió tartalmú kötőanyag vizsgálat, faragasztó esetén a 72 %-os látható az 4.2. ábrán.



4.2. ábra. Relatív sűrűség és relatív törési szilárdság a relatív kötőanyag tartalom függvényében

A vizsgálatok alapján az alábbi megállapítások tehetők:

- A kötőanyag fajlagos mennyiségének növelésével szignifikánsan javul a brikettek relatív szilárdsága és relatív sűrűsége mindhárom kötőanyag használata esetén.
- A legnagyobb relatív szilárdság és relatív sűrűség csemperagasztó diszperzió és faragasztó esetén érhető el.

Vízállósági vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a 300 MPa-on gyártott, 60 % polimer diszperzió koncentrációjú csemperagasztóból származó kötőanyagot 12 %-ban tartalmazó tabletták vízzel teli edénybe helyezve legalább 24 órán át egyben maradtak. A 200 MPa-on gyártott, 60 % koncentrációjú falfesték alapú kötőanyagot 8, 12 ill. 16 %-ban tartalmazó tabletták és a 72 % koncentrációjú fa ragasztó alapú kötőanyagot 8, 12 ill. 16 %-ban tartalmazó tabletták vízzel teli edénybe helyezve rövid idő elteltével szétestek. A vízállósági szempontokat is figyelembe véve a csemperagasztóból származó kötőanyag a legmegfelelőbb a SiC agglomerálására.

4.5 Szilícium karbid tablettázása csemperagasztóból kinyert kötőanyaggal

A kísérletek során különböző kötőanyag és víztartalmú tablettákat készültek, különböző nyomásokon, minden keverékarányból, minden nyomáson 5 – 6 db.

4.8. táblázat. Különböző összetételekből készült tabletták száma

nyomás	40 % polimer diszperzió a kötőanyagban				60 % polimer diszperzió a kötőanyagban			
	kötőanyagtartalom a tablettában				kötőanyagtartalom a tablettában			
	2 %	6 %	8 %	12 %	2 %	6 %	8 %	12 %
100 MPa	6 db	6 db	6 db	6 db	6 db	6 db	5 db	5 db
150 MPa	6 db	6 db	6 db	6 db	6 db	6 db	6 db	6 db
200 MPa	5 db	5 db	5 db	5 db	6 db	6 db	5 db	5 db

A kötőanyag Mozaik csemperagasztóból származó diszperziót volt. A kísérleti tabletták esetén a kötőanyagtartalom (c_k) 2 %, 6 %, 8 % majd pedig 12 %, a kötőanyagban lévő polimer diszperzió koncentrációja 40 %, 60 %, a préselési nyomást 100, 150 és végül 200 MPa-ra választottam.



4.3. ábra. Szilícium karbid brikettek (átmérő: 25 mm, magasság 9 mm)

Az így készített préstabletták (4.3. ábra) szárított állapotban 25 mm átmérőjűek, 8...9 mm magasságúak és (kötőanyagtartalomtól és az esetleges veszteségektől függően) 8...9 grammok lettek. A brikettálás alatt minden tablettánál rögzítésre került a dugattyú pillanatnyi pozíciója és az ehhez tartozó erő, majd ezekből az adatokból lehetett kiszámolni a brikettáláshoz szükséges munkát. A különböző összetételű és nyomáson préselt brikettek tömegéből, átmérőjéből, magasságából a tabletták sűrűsége és a fajlagos brikettálási munka kiszámolható. Meghatározásra került a tabletták törése során a maximális törő erő.

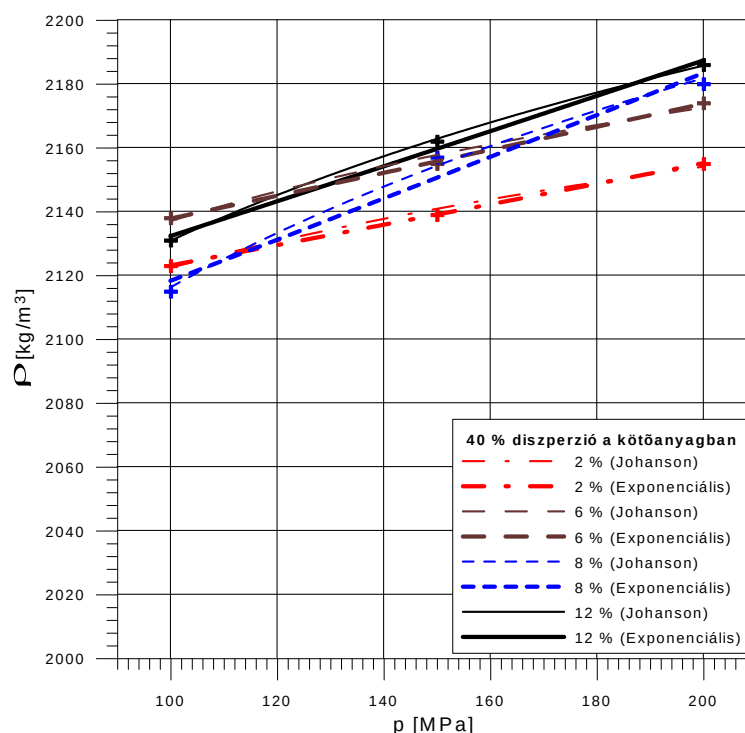
4.5.1 Sűrűség – nyomás összefüggése

A briketteknek sűrűségének meghatározása a 3. fejezetben ismertetett módon történt. Minden keveréktípusnál 5 db tablettá sűrűségét átlagolva (a 2 szélsőértéket nem számításba véve) kapjuk meg az adott paraméterek mellett készült tabletták átlagsűrűségét. A kapott értékeket a 4.9. táblázat tartalmazza.

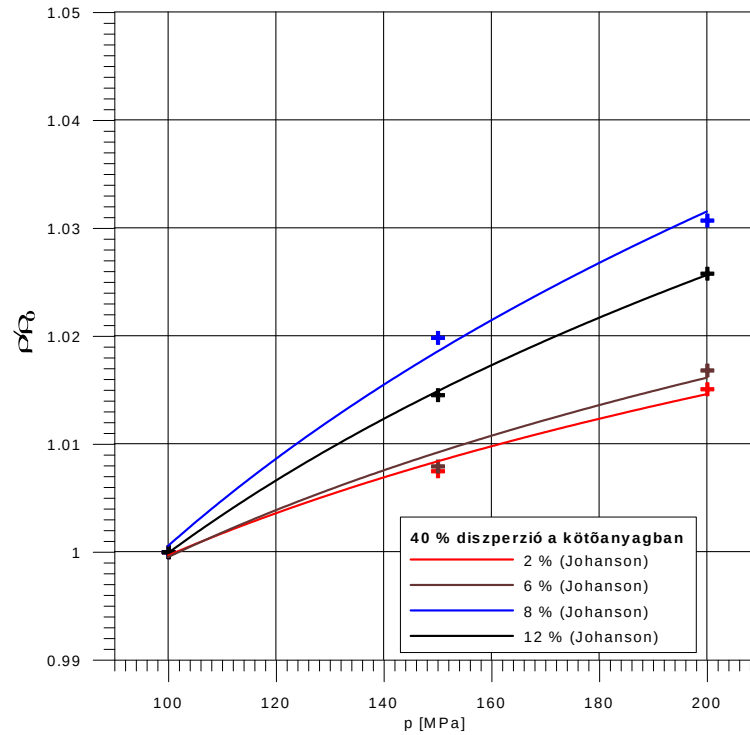
4.9. táblázat. Brikettek sűrűsége és relatív sűrűsége (zárójelben)

BRIKETTEK SŰRŰSÉGE				
40 % diszperzió tartalom a kötőanyagban				
Nyomás	kötőanyag tartalom a tablettában, c_k			
	2 %	6 %	8 %	12 %
100 <i>Mpa</i>	2123 <i>kg/m</i> ³ (1)	2138 <i>kg/m</i> ³ (1)	2115 <i>kg/m</i> ³ (1)	2131 <i>kg/m</i> ³ (1)
150 <i>Mpa</i>	2139 <i>kg/m</i> ³ (1,0075)	2155 <i>kg/m</i> ³ (1,0080)	2157 <i>kg/m</i> ³ (1,0199)	2162 <i>kg/m</i> ³ (1,0145)
200 <i>Mpa</i>	2155 <i>kg/m</i> ³ (1,0151)	2174 <i>kg/m</i> ³ (1,0168)	2180 <i>kg/m</i> ³ (1,0307)	2186 <i>kg/m</i> ³ (1,0258)
60 % diszperzió tartalom a kötőanyagban				
Nyomás	kötőanyag tartalom a tablettában, c_k			
	2 %	6 %	8 %	12 %
100 <i>Mpa</i>	2086 <i>kg/m</i> ³ (1)	2116 <i>kg/m</i> ³ (1)	2123 <i>kg/m</i> ³ (1)	2135 <i>kg/m</i> ³ (1)
150 <i>Mpa</i>	2143 <i>kg/m</i> ³ (1,0273)	2151 <i>kg/m</i> ³ (1,0165)	2169 <i>kg/m</i> ³ (1,0217)	2159 <i>kg/m</i> ³ (1,0112)
200 <i>Mpa</i>	2178 <i>kg/m</i> ³ (1,0441)	2179 <i>kg/m</i> ³ (1,0298)	2189 <i>kg/m</i> ³ (1,0311)	2200 <i>kg/m</i> ³ (1,0304)

4.4. ábra és 4.7. ábra a sűrűség – nyomás összefüggéseit ábrázolják 40 és 60 % kötőanyag koncentráció esetén, 2, 6, 8, 12 % kötőanyag tartalom mellett a tablettában. Johanson szellemében meghatároztam a relatív tablettasűrűségeket, a vonatkoztatási alapsűrűség a 100 *MPa*-on készült tablettá sűrűség. Relatív sűrűségértékeket mutatja a 4.5. ábra és 4.8. ábra. A 4.9. táblázatban található pontokra és a relatív sűrűségekre függvényeket illesztettem, amiknek az egyenletei a 4.10. táblázat és 4.12. táblázatokban találhatóak.



4.4. ábra. Tablettá sűrűség – préselési nyomás diagram 40% kötőanyag koncentráció esetén, különböző kötőanyagtartalmak esetén

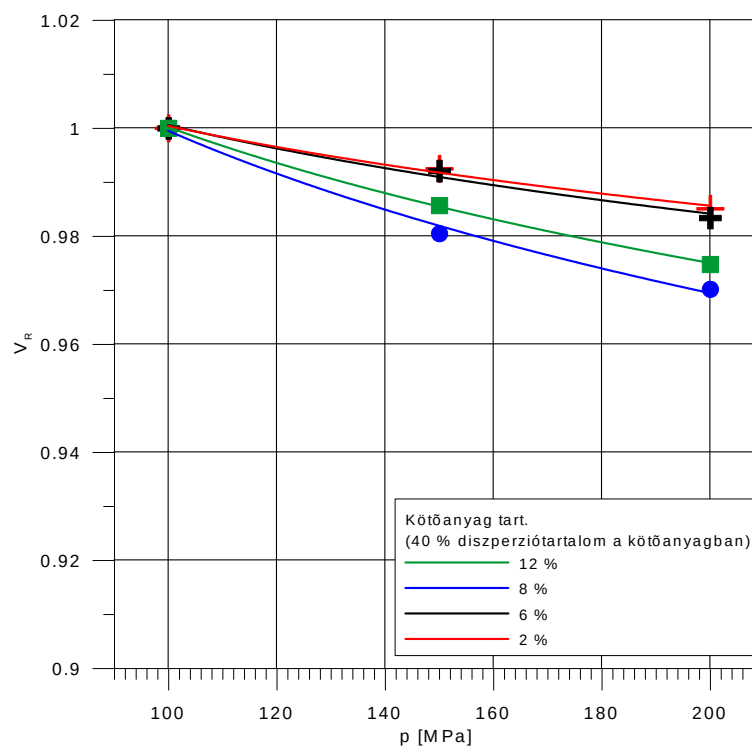


4.5. ábra. Relatív sűrűség (ρ/ρ_0) – nyomás (p) diagram (40 % diszperzió a kötőanyagban)

4.10. táblázat. Illesztett görbék egyenletei 40% kötőanyag koncentráció esetén

Johanson összefüggés		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\rho = 1923,26 p^{0,021382}$ $\kappa=46,77$	$R^2 = 0,990882$ (korrelációs együttható négyzete) $\sigma^2 = 1.02039E-006$ (residual mean square)
6	$\rho = 1915,16 p^{0,023790}$ $\kappa=42,03$	$R^2 = 0,983843$ $\sigma^2 = 2,25449E-006$
8	$\rho = 1728,09 p^{0,043987}$ $\kappa=22,73$	$R^2 = 0,994642$ $\sigma^2 = 2,52812E-006$
12	$\rho = 1799,50 p^{0,036687}$ $\kappa=27,26$	$R^2 = 0,999565$ $\sigma^2 = 1,4196E-007$
Exponenciális összefüggés		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\ln(\rho)=0,0001496054083 p$ $+7,645634247$	$R^2 = 0,999995$ $\sigma^2 = 5,21807E-010$
6	$\ln(\rho)=0,000166979761 p$ $+7,65078509$	$R^2 = 0,99912$ $\sigma^2 = 1,22738E-007$
8	$\ln(\rho)=0,000302700643 p$ $+7,628049535$	$R^2 = 0,971023$ $\sigma^2 = 1,36717E-005$
12	$\ln(\rho)=0,0002548203664 p$ $+7,639431711$	$R^2 = 0,994091$ $\sigma^2 = 1,92972E-006$
Johanson összefüggés relatív sűrűségek esetén		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\rho/\rho_0 = 0,905777 p^{0,0214122}$ $\kappa=46,70$	$R^2 = 0,990142$ $\sigma^2 = 1,10718E-006$
6	$\rho/\rho_0 = 0,895774 p^{0,0237907}$ $\kappa=42,03$	$R^2 = 0,983838$ $\sigma^2 = 2,25512E-006$
8	$\rho/\rho_0 = 0,817083 p^{0,043983}$ $\kappa=22,74$	$R^2 = 0,994633$ $\sigma^2 = 2,53192E-006$
12	$\rho/\rho_0 = 0,84444 p^{0,036688}$ $\kappa=27,26$	$R^2 = 0,999564$ $\sigma^2 = 1,42239E-007$

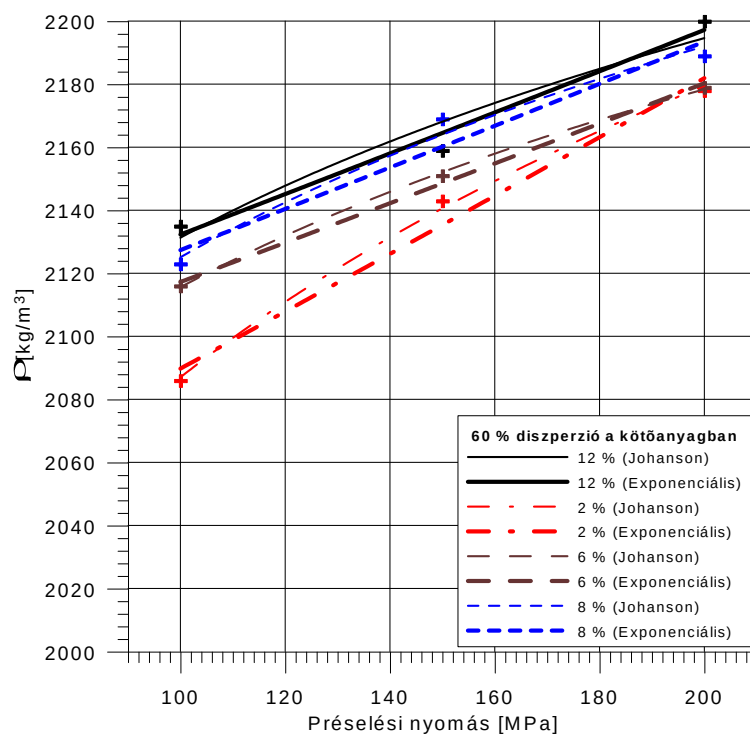
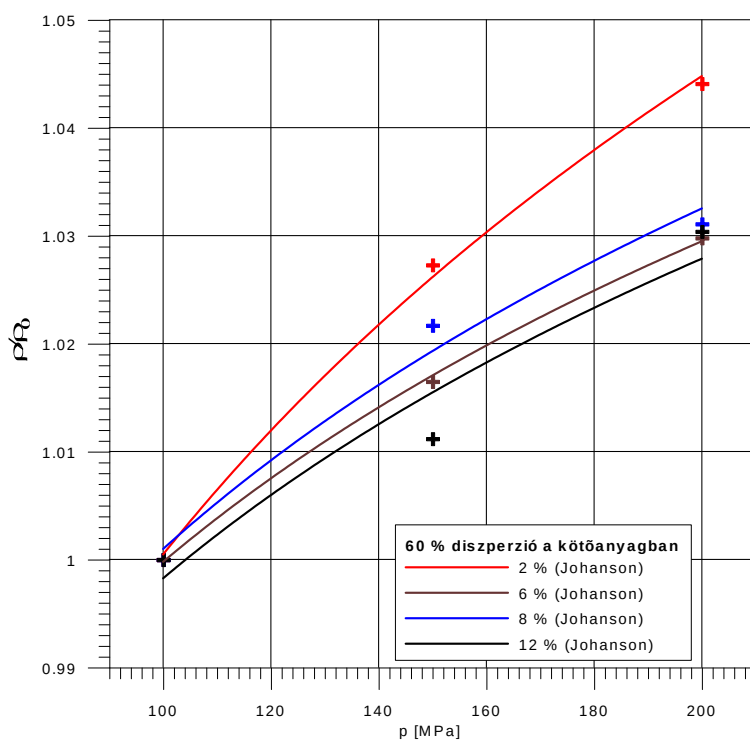
A présnyomás relatív tablettatérfogat ($p=100$ MPa présnyomáshoz tartozó térfogatra vonatkoztatva) értékpárookra a Walker által kompresszibilitásra felírt függvényét illesztettem (4.6. ábra) 40 % diszperziótartalom esetén. A függvények paramétereit a 4.11 táblázat tartalmazza.



4.6. ábra. Préselési nyomás – relatív tablettatérfogat kapcsolata

4.11 táblázat. Illesztett függvények

Walker összefüggés		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$V_R = -0,049043 \log_{10} p + 1,0984$	$R^2 = 0,991205$
6	$V_R = -0,054469 \log_{10} p + 1,1094$	$R^2 = 0,984305$
8	$V_R = -0,099764 \log_{10} p + 1,1990$	$R^2 = 0,993835$
12	$V_R = -0,083548 \log_{10} p + 1,1672$	$R^2 = 0,999598$


4.7. ábra. Sűrűség (ρ) – nyomás (p) diagram 60% kötőanyag koncentráció esetén

4.8. ábra. Relatív sűrűség (ρ/ρ_0) – nyomás (p) diagram (60 % diszperzió a kötőanyagban)

4.12. táblázat. Illesztett görbék egyenletei 60% kötőanyag koncentráció esetén

Johanson összefüggés		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\rho = 1564,71 p^{0,062542}$ $\kappa=15,99$	$R^2 = 0.997964$ $\sigma^2 = 1.93569E-006$
6	$\rho = 1741,88 p^{0,042204}$ $\kappa=23,69$	$R^2 = 0.999126$ $\sigma^2 = 3.78002E-007$
8	$\rho = 1729,39 p^{0,044739}$ $\kappa=22,35$	$R^2 = 0.983355$ $\sigma^2 = 8.21705E-006$
12	$\rho = 1754,55 p^{0,042237}$ $\kappa=23,68$	$R^2 = 0.941774$ $\sigma^2 = 2.67508E-005$
Exponenciális összefüggés		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\ln(\rho) = 0,00043158 p + 7,6016$	$R^2 = 0.979709$ $\sigma^2 = 1.92893E-005$
6	$\ln(\rho) = 0,00029339 p + 7,6285$	$R^2 = 0.995353$ $\sigma^2 = 2.00928E-006$
8	$\ln(\rho) = 0,00030614 p + 7,6320$	$R^2 = 0.949276$ $\sigma^2 = 2.50409E-005$
12	$\ln(\rho) = 0,00029991 p + 7,635$	$R^2 = 0.97886$ $\sigma^2 = 9.71224E-006$
Johanson összefüggés relatív sűrűségek esetén		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\rho/\rho_0 = 0,750126 p^{0,062533}$ $\kappa=15,99$	$R^2 = 0,998016$ $\sigma^2 = 1.88544E-006$
6	$\rho/\rho_0 = 0,823072 p^{0,042233}$ $\kappa=23,68$	$R^2 = 0,998995$ $\sigma^2 = 4,35202E-007$
8	$\rho/\rho_0 = 0,814524 p^{0,044759}$ $\kappa=22,34$	$R^2 = 0,983137$ $\sigma^2 = 8,33439E-006$
12	$\rho/\rho_0 = 0,822048 p^{0,042172}$ $\kappa=23,71$	$R^2 = 0,941341$ $\sigma^2 = 2,6879E-005$

A 40 % diszperzió tartalmú kötőanyag esetén a préselési nyomás növekedésével nő a tabletták sűrűsége (4.4. ábra). A tabletták közül a maximális sűrűség 200 MPa-on tapasztalható 12% kötőanyag tartalomnál 2186 kg/m³. A legalacsonyabb sűrűséget a legkevesebb 2 % kötőanyag tartalomnál tapasztalhatjuk.

A 4.7. ábra a sűrűség – nyomás összefüggést ábrázolja 60 % diszperzió tartalmú kötőanyag esetén, 2 %, 6 %, 8 %, 12 % kötőanyag tartalom mellett a tablettában. Itt is megállapítható, hogy a nyomás növekedésével nő a tabletták sűrűsége. A maximum sűrűség 200 MPa-on tapasztalható a 12 %-os kötőanyag tartalmú tablettáknál, ami 2200 kg/m³. A legmeredekebb görbe a 2 %-os kötőanyag tartalmú tablettáké, de a jelentős mértékű növekedés ellenére is elmarad a sűrűsége a legnagyobb alkalmazott nyomásnál a többi összetételhez képest.

A 2 % és 6% kötőanyag tartalmú tabletták $\rho=f(p)$ görbéinek lefutása jelentősen eltér 40 ill. 60 % kötőanyag koncentráció mellett, ez feltételezhetően a keverék elkészítése során a nem megfelelő homogenizálásnak tudható be.

A vizsgálatok alapján összefoglalva megállapítható:

- A préselési nyomás növelésével a tabletták sűrűsége nő mind 40 mind 60 % diszperzió tartalmú kötőanyag esetén (4.4. ábra és 4.7. ábra);
- A kötőanyag mennyiségtől a tabletták sűrűsége gyakorlatilag független;
- Nagyobb diszperzió tartalom a kötőanyagban (60 % vs. 40 %) nagyobb tablettasűrűséget eredményez azonos préselési nyomáson;
- Relatív sűrűségek esetén a 6, 8 ill. 12 % kötőanyag tartalmú tabletták $\rho/\rho_0=f(p)$ görbéi gyakorlatilag együtt futnak (60 % diszperziótartalom esetén) és a Johanson összefüggéssel írhatók le, ahol $\kappa=23,24$ konst..

4.5.2 Befektetett munka

A brikettálás során mértem a dugattyú által megtett utat és a tablettára ható erő nagyságát. A program másodpercenként 50 mérési pontot rögzít, ezen pontok segítségével vehető fel az erő – elmozdulás diagram. A mérési pontokra minden tabletta esetében ötöd fokú polinom segéd függvényt illesztettem. Ezt a diagramot minden egyes tablettánál megrajzoltam Graph v4.3 program segítségével. A függvény alatti terület a brikettáláshoz szükséges munkát adja meg. A munka számítására is a Graph v4.3 programot használtam, úgy hogy integráltam a függvényt az s_0 és $s_{\max}$ között.

$$W = \int F ds = A \int p ds \text{ ahol,}$$

W a munka,

F az erő,

s az elmozdulás,

A a tabletta préselési irányra merőleges felülete.

Az egyes tablettákon végzett munkát elosztva a tabletták tömegeivel megkapjuk a fajlagos munkát:

$$w = W / m_t [J/g] \text{ ahol}$$

w a fajlagos munka,

W egy tabletta elkészítéséhez szükséges munka,

m_t a tabletta tömege.

A szilícium karbid por rideg anyag ezért, ha a terhelést leveszem a tablettáról, akkor a visszatágulása nem jelentős, ennek a mérése nehéz lenne, és mértéke elhanyagolható.

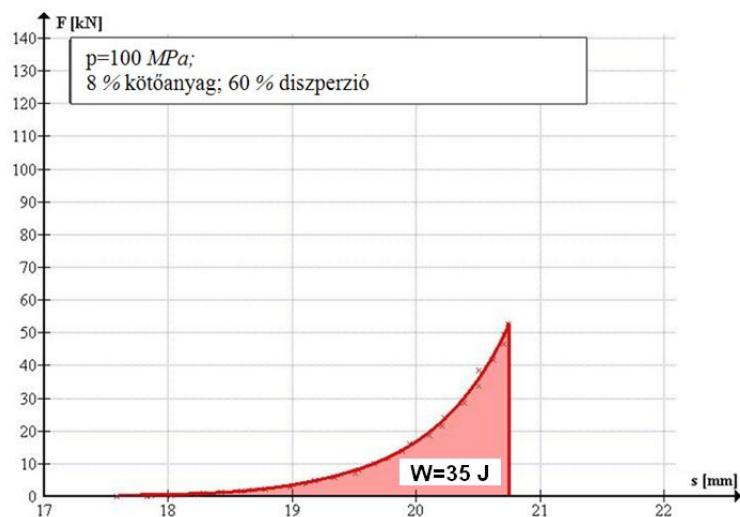
A kapott eredményekből megállapítható, hogy a kötőanyag koncentrációtól és a kötőanyag tartalomtól nem függ kimutathatóan a befektetett munka nagysága. A munka nagysága a brikettek készítéséhez használt nyomás növelésével nő. Ezen okokból a továbbiakban csak a 8% kötőanyagtartalmú (60 % diszperziótartalom) tabletták diagramját mutatom be külön ábrázolva a 100, 150 és 200 MPa nyomás alkalmazását.

Az F-s értékpárookra az alábbi típusú görbe is illeszthető:

$$F(s) = s^k,$$

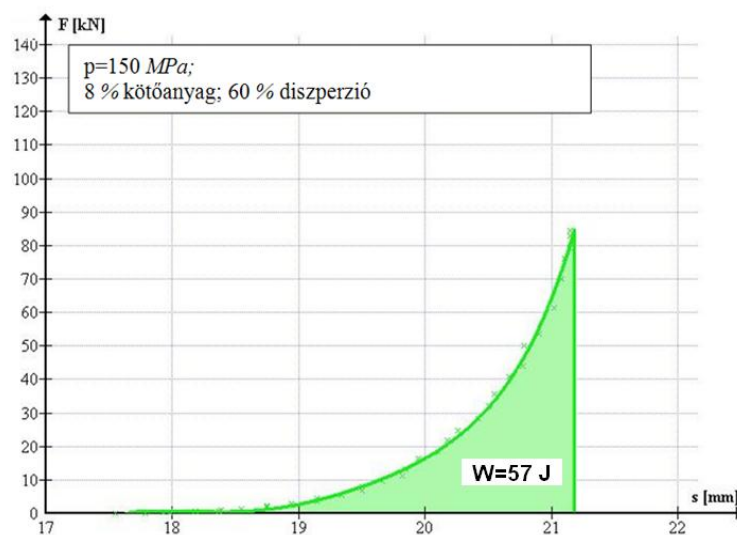
a W befektetett munka:

$$W = \int_0^{s_{\max}} F(s) ds = \frac{s^{k+1}}{k+1}.$$



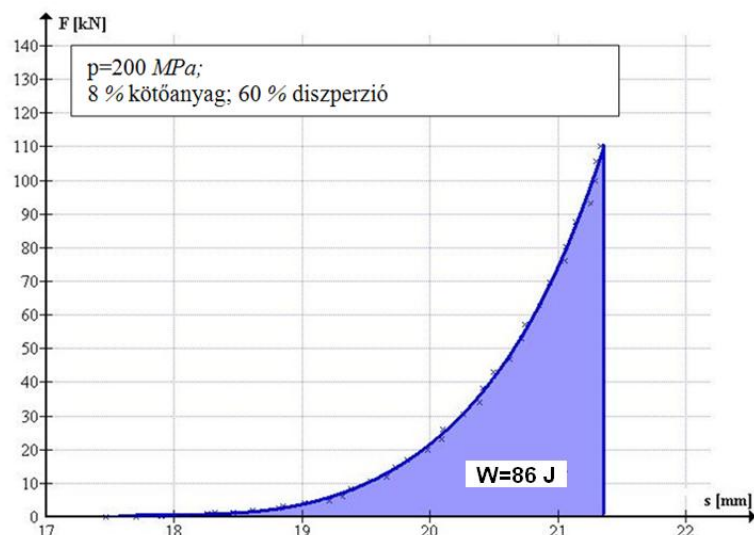
4.9. ábra. Erő (F) – elmozdulás (s) összefüggése 100 MPa nyomáson

A 4.9. ábrán a 100 MPa nyomáson készült brikettek készítéséhez szükséges munka látható, amely 35 J. 100 MPa nyomást beállítva átlagosan 57 kN maximális erőt fejt ki a dugattyú a porágyra. A dugattyú 3 mm-t mozdul el a porágy tömörítésének kezdetétől a végéig.



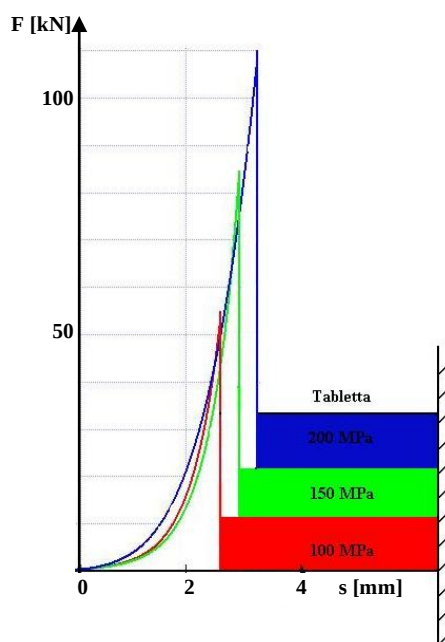
4.10. ábra. Erő – elmozdulás összefüggése 150 MPa nyomáson

A 4.10. ábrán a 150 MPa nyomáson készült brikettek készítéséhez szükséges munka látható. 150 MPa nyomást beállítva átlagosan 85 kN maximális erőt fejt ki a dugattyú a porágyra. A dugattyú 3,3 mm-t mozdul el a porágy tömörítésének elejétől a végéig. Egy tabletta elkészítéséhez 57 J munkára van szükség.



4.11. ábra. Erő – elmozdulás összefüggése 200 MPa nyomáson

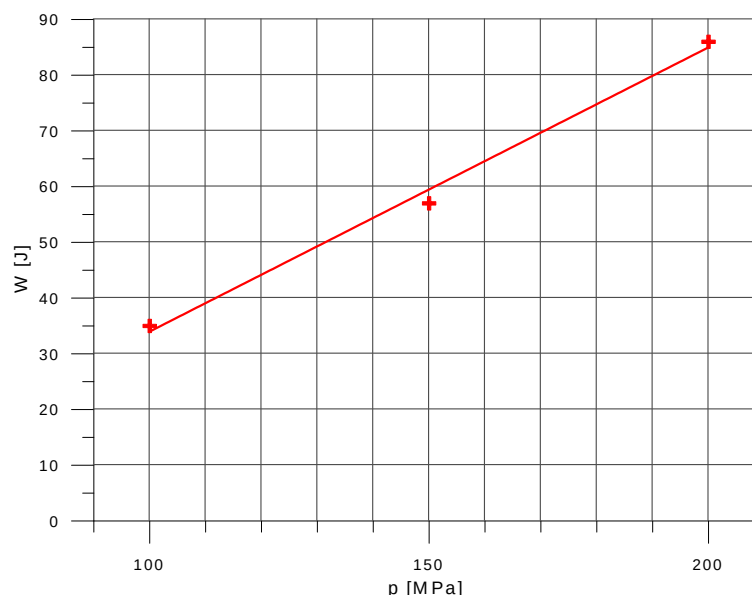
A 4.11. ábrán a 200 MPa nyomáson készült brikettek készítéséhez szükséges munka látható. 200 MPa nyomást beállítva átlagosan 110 kN maximális erőt fejt ki a dugattyú a porágyra. A dugattyú ebben az esetben 3,7 mm-t mozdul el a porágy tömörítésének kezdetétől a végéig.



4.12. ábra. Erő – elmozdulás összehasonlítása 100, 150, 200 MPa nyomáson

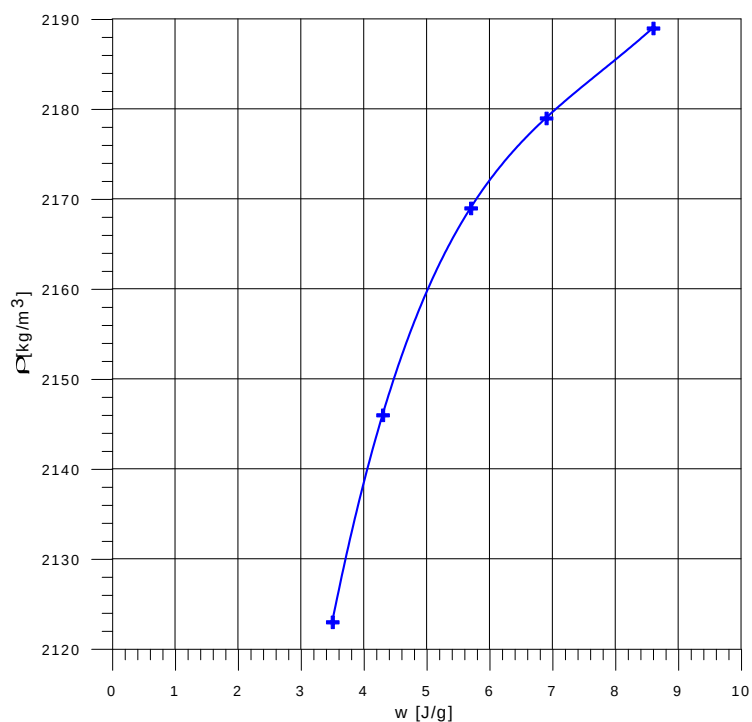
A 4.12. ábra mutatja az erő – elmozdulás összehasonlítását 100, 150, 200 MPa nyomáson. Fontos megállapítás, hogy a görbék gyakorlatilag együtt futnak, egy folyamatot írnak le, az eltérés köztük az, hogy más előre beállított maximális erőnél határolt le dugattyú. Megfigyelhető, hogy minél nagyobb nyomást alkalmazunk a brikettálás során, annál nagyobb a befektetett munka és annál nagyobb sűrűségű, kisebb magasságú tabletták készíthetők, állandó átmérő mellett. A különböző nyomással végzett préselés egyetlen egységes folyamatként kezelhető, ahol a befektetett munka eredménye a sűrűség növekedés. Az illesztett görbe (amely nulla pontja az anyag tömörítésének kezdeti pontja) egyenlete:

$$F(s) = 1,7701 s^{3,4229}.$$



4.13. ábra. Munka (W) – nyomás (p) diagram

A 4.13. ábrán látható, hogy 100 MPa nyomást alkalmazva 35 J, 150 MPa-on 57 J, míg 200 MPa-on 86 J munkát kell befektetni, hogy egy tabletta elkészüljön. A befektetett munka $W=f(p)$ függvénye lineárisan közelíthető 100 és 200 MPa nyomástartományban ($W=0,51p-17,17$).



4.14. ábra. Befektetett fajlagos munka - sűrűség értékpárok (8 % kötőanyag, 60 % diszperzio konc.)

A 4.14. ábrán a befektetett fajlagos munka-tablettasűrűség értékpárokat tüntettem fel. A 4,3 és a 6,9 J/g értékeket a 4.12. ábra alapján számítottam. A pontokra illesztett negyedfokú függvény egyenlete: $\rho(w) = 1851,66 + 135,82w - 21,58w^2 + 1,5474w^3 - 0,04w^4$.

4.5.3 Húzószilárdság

A briketteket a Mechanikai Technológiai Tanszéken egy hidraulikus törőgéppel törtük el. A berendezés az összenyomó erőt az elmozdulás függvényében rögzítette. Leolvastam a diagramokról a maximális törőerőket, melyeket úgy értékeltem ki, hogy fajtánként az öt mérésből a legkisebb és legnagyobb adatot nem vettem számításba. A fennmaradó három értéket pedig átlagoltam.



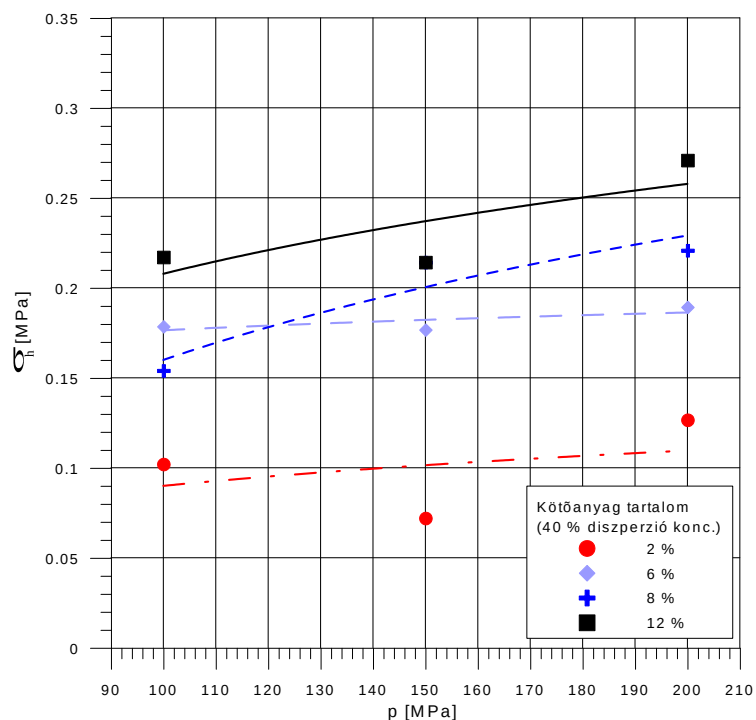
4.15. ábra. Tabletta törés közben

4.13. táblázat. Brikettek húzószilárdságának összefoglaló táblázata

diszperzió tartalom a kötőanyagban							
c ₁ =40 %				c ₂ =60 %			
nyomás [MPa]	100	150	200	nyomás [MPa]	100	150	200
kötőanyag tart. [%]	húzószilárdság [MPa]			kötőanyag tart. [%]	húzószilárdság [MPa]		
2	0,1021	0,0721	0,1267	2	0,0612	0,0834	0,1083
6	0,1786	0,1768	0,1894	6	0,1269	0,1756	0,2236
8	0,1541	0,2143	0,2209	8	0,1824	0,2376	0,2428
12	0,2172	0,2143	0,2710	12	0,2874	0,2918	0,3028

Préselési nyomás - húzószilárdság

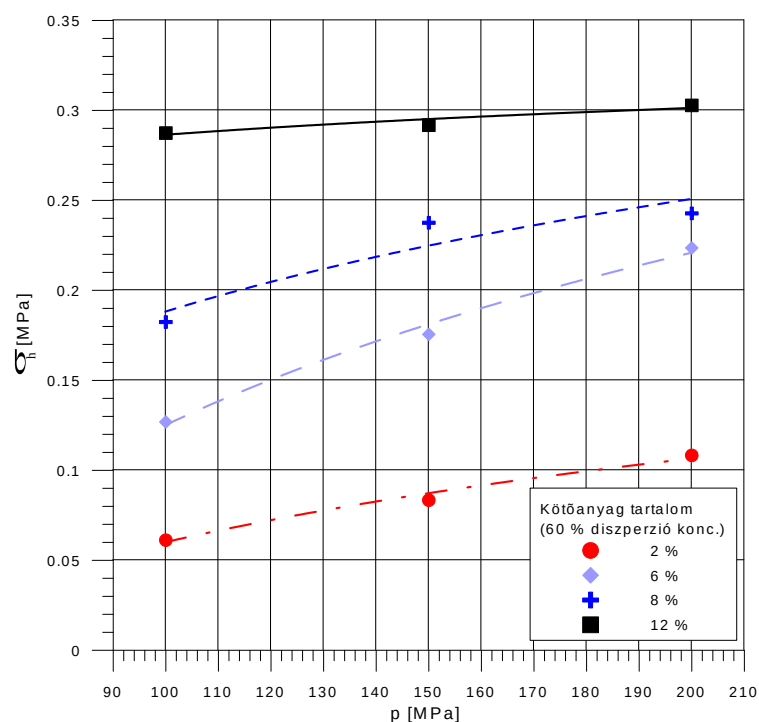
A 4.16. ábra és a 4.17. ábra mutatják a mért húzószilárdságot a préselési nyomás függvényében. A pontokra logaritmikus függvényeket illesztettem Higuchi nyomán, ezek a 4.14. táblázatban és a 4.15. táblázatban találhatók. A 40 % diszperziótartalmú kötőanyaggal készült tabletták esetén az illesztett függvények szórása jóval meghaladja a 60 %-os tabletták esetén mértéket.



4.16. ábra. Húzószilárdság (σ_h) a préselési nyomás (p) függvényében (40 % diszperzió a kötőanyagban)

4.14. táblázat: Illesztett görbék egyenletei (40 % diszperzió a kötőanyagban)

Logaritmikus összefüggés (Higuchi)			
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe		
2	$\sigma_h = 0,028305 \ln(p) - 0,040413$	$R^2 = 0,129935$ $\sigma^2 = 0,001301$ $V_s = 35,96 \%$ (számított relatív szórás)	
6	$\sigma_h = 0,014267 \ln(p) + 0,110673$	$R^2 = 0,531531$ $\sigma^2 = 4,35114E-005$ $V_s = 3,63 \%$	
8	$\sigma_h = 0,099792 \ln(p) - 0,299668$	$R^2 = 0,891267$ $\sigma^2 = 0,000295$ $V_s = 8,75 \%$	
12	$\sigma_h = 0,072053 \ln(p) - 0,124037$	$R^2 = 0,617472$ $\sigma^2 = 0,000780$ $V_s = 11,93 \%$	



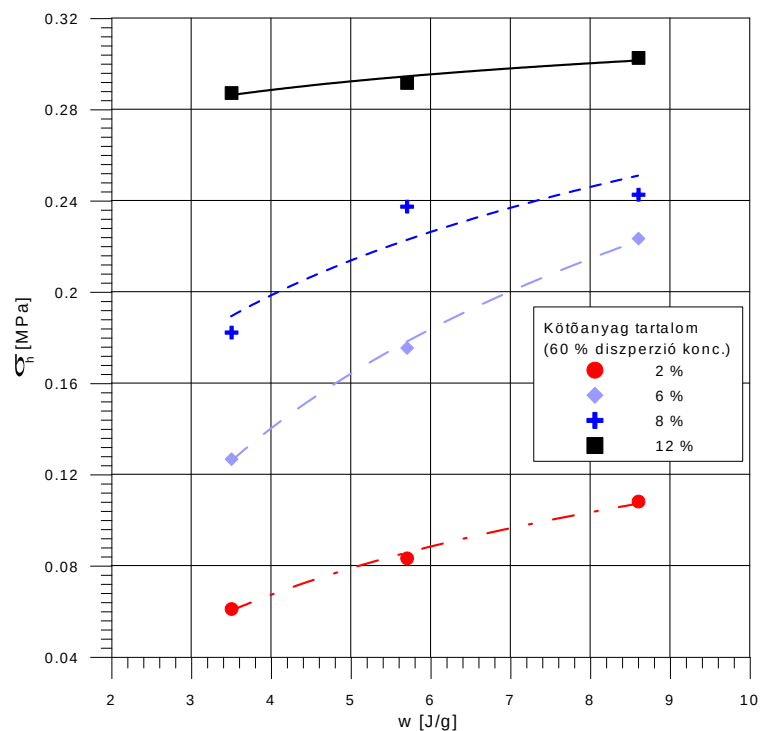
4.17. ábra. Húzószilárdság (σ_h) a préselési nyomás (p) függvényében (60 % diszperzió a kötőanyagban)

4.15. táblázat: Illesztett görbék egyenletei (60 % diszperzió a kötőanyagban)

Logaritmikus (Higuchi)		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\sigma_h = 0,067085 \ln(p) - 0,249203$	$R^2 = 0,982969$ $\sigma^2 = 1,8912E-005$ $V_s = 5,12 \%$
6	$\sigma_h = 0,138235 \ln(p) - 0,511853$	$R^2 = 0,991262$ $\sigma^2 = 4,08548E-005$ $V_s = 3,64 \%$
8	$\sigma_h = 0,090355 \ln(p) - 0,228255$	$R^2 = 0,883674$ $\sigma^2 = 0,000261$ $V_s = 7,31 \%$
12	$\sigma_h = 0,021472 \ln(p) + 0,187257$	$R^2 = 0,888562$ $\sigma^2 = 1,40234E-005$ $V_s = 1,27 \%$

Befektetett fajlagos munka - húzószilárdság

Ábrázoltam a tabletták húzó szilárdságát a befektetett munka függvényében (4.18. ábra).



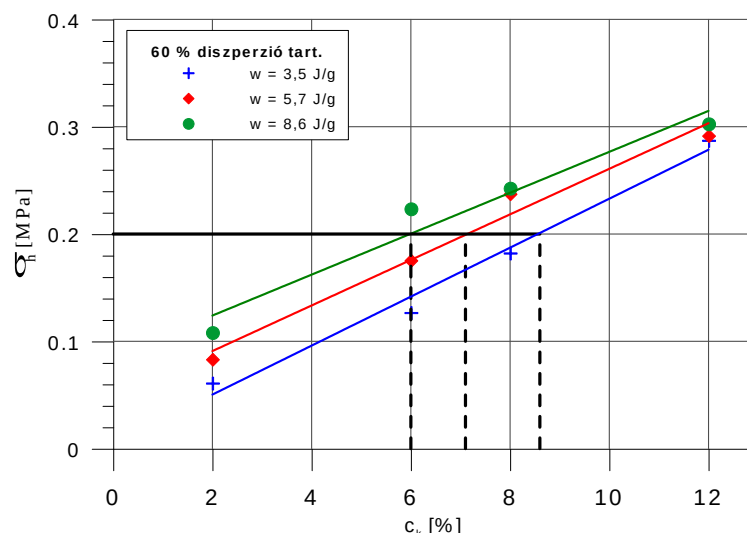
4.18. ábra. Húzószilárdság (σ_h) a fajlagos préselési munka (w) függvényében (60 % diszperzió a kötőanyagban)

4.16. táblázat. Illesztett görbék egyenletei (60 % diszperzió a kötőanyagban)

Logaritmikus		
Kötőanyag tartalom [%]	Illesztett görbe	
2	$\sigma_h = 0,052181 \ln(w) - 0,005190$	$R^2 = 0,993272$ $\sigma^2 = 7,47059E-006$ $V_s = 3,22 \%$
6	$\sigma_h = 0,107327 \ln(w) - 0,008699$	$R^2 = 0,99799$ $\sigma^2 = 9,39909E-006$ $V_s = 1,75 \%$
8	$\sigma_h = 0,068596 \ln(w) + 0,103291$	$R^2 = 0,850632$ $\sigma^2 = 0,000335$ $V_s = 8,29 \%$
12	$\sigma_h = 0,016882 \ln(w) + 0,265048$	$R^2 = 0,917355$ $\sigma^2 = 1,04E-005$ $V_s = 1,10 \%$

Kötőanyag tartalom és húzószilárdság kapcsolata

A 4.19. ábrán látható a húzószilárdság és kötőanyag tartalom összefüggése 60 % kötőanyag koncentráció esetén, 100, 150, 200 MPa nyomáson.



4.19. ábra. Törési szilárdság - kötőanyag függvénye 60 % kötőanyag koncentráció esetén 100, 150, 200 MPa nyomáson

4.17. táblázat. Illesztett egyenesek egyenletei (60 % diszperzió a kötőanyagban)

Fajlagos munka [J/g]	Illesztett egyenes	
3,5	$\sigma_h = 0,022817 c_k + 0,004754$	$R^2 = 0,984124$ $\sigma^2 = 0,000218$ $V_s = 8,42 \%$
5,7	$\sigma_h = 0,021231 c_k + 0,048485$	$R^2 = 0,976685$ $\sigma^2 = 0,000279$ $V_s = 7,56 \%$
8,6	$\sigma_h = 0,019071 c_k + 0,085877$	$R^2 = 0,952119$ $\sigma^2 = 0,000476$ $V_s = 7,42 \%$

A pontokra egyenest illesztettem, melyek egyenletei a 4.17. táblázatban láthatók. A kötőanyag tartalom és a brikettáláshoz alkalmazott nyomás növekedésével nőtt a húzószilárdság (a kötőanyagtartalomtól erősebben függ a szilárdság). A legnagyobb húzószilárdság 0,3 MPa lett 200 MPa nyomáson, 12 % kötőanyag tartalommal.

A húzószilárdság összefoglalásaként megállapítható, hogy a növekedés azt mutatja, hogy az agglomerátum szilícium-karbid szemcséi közé beépül a kötőanyag, a vizsgált kötőanyag tartalom tartományon belül. Valószínűleg még képes lenne több kötőanyagot is befogadni, ami a húzószilárdság további növekedését eredményezhetné.

A mérésekre támaszkodva az alábbi modell alakítható ki kötőanyaggal történő brikettálási technológia tervezésére.

Tervezésnél a gyártandó brikett húzószilárdságából indulunk ki: egy előírt szilárdság többféle módon elérhető, nevezetesen nagyobb munkával és kisebb kötőanyagfelhasználással, és fordítva, nagyobb kötőanyag felhasználással kisebb befektetett munkával. Például 0,2 MPa szilárdság 6 % kötőanyag tartalommal 8,6 J/g befektetett fajlagos munkával, vagy 8,6 % kötőanyag tartalommal 3,5 J/g befektetett fajlagos munkával állítható elő. Gazdasági szempontból fontos annak a vizsgálata, hogy milyen munkával, milyen kötőanyag tartalommal célszerű előállítani a brikettet. A tervezés az alábbi lépésekben és összefüggésekkel történik. A húzószilárdság:

$$\sigma_h = f(w, c_k),$$

lineáris kapcsolatot alapján:

$$\sigma_h = f(c_k, a, b) = a c_k + b,$$

ahol

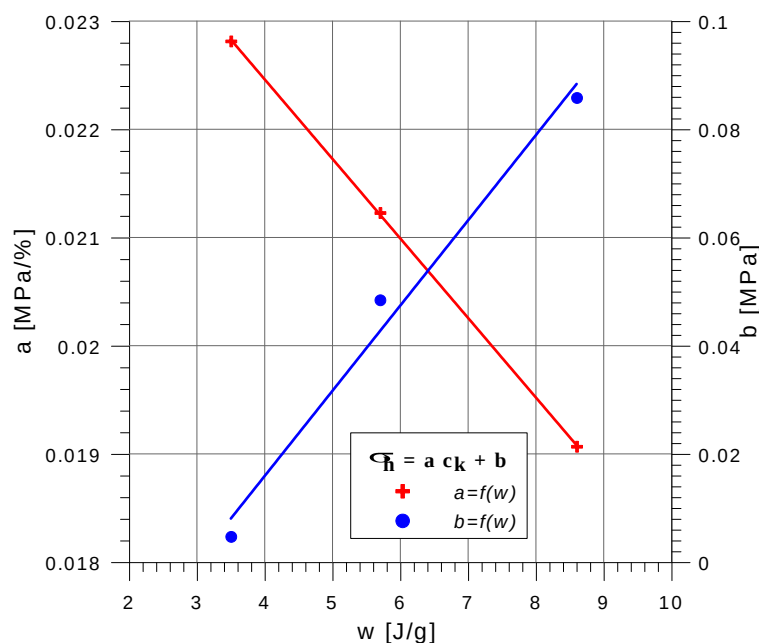
$$a = f(w) = \alpha_1 w + \beta_1,$$

$$b = f(w) = \alpha_2 w + \beta_2.$$

A konstansok (100...200 MPa tartományban, 60% diszperzió tartalom a kötőanyagban) a 4.20. ábra alapján:

$$a = f(w) = -7,3504 \cdot 10^{-4} w + 2,5401 \cdot 10^{-2},$$

$$b = f(w) = 1,5751 \cdot 10^{-2} w - 4,7082 \cdot 10^{-2}.$$



4.20. ábra: A $\sigma_h = f(c_k)$ leírására szolgáló modell konstansainak meghatározása

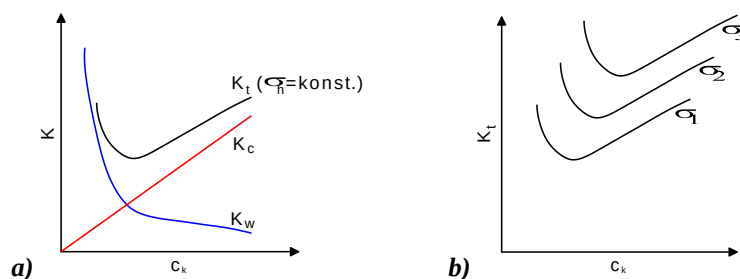
Amennyiben ismert az adott berendezés által gazdaságosan bevihető munka, az a ill. b konstansok meghatározásával felírható adott befektetett munkára a $\sigma_h = f(c_k)$ összefüggés. Az összefüggésből az elérni kívánt szilárdság ismeretében meghatározható a szükséges kötőanyagtartalom. Bizonyos további felhasználások során a technológia előírhatja a bevihető idegenanyag (kötőanyag) maximális mennyiségét, vagy a kötőanyag beszerzési ára korlátozhatja az alkalmazható mennyiséget. Ebben az esetben a maximális kötőanyag tartalom és az elérni kívánt szilárdság ismeretében számítható a befektetendő fajlagos munka.

A kötőanyagtartalom és befektetett fajlagos munka függvényében felírtam a húzószilárdságot MATLAB szoftver segítségével:

$$\sigma_h = 0,021040 c_k + 0,010605 w - 0,016553,$$

ezzel gyakorlatilag pontokra egy síkot illesztettem, ahol a szórás négyzet: $\sigma^2 = 0,0025$. Ez mutatja, hogy az illesztés megfelelő, alkalmas a vizsgált változók közti összefüggés leírására.

A fenti összefüggésekkel végzett szimulációval, valamint a szimulációs alappontokhoz a munka (energia) (K_w) és kötőanyag költség (K_c) megállapításával, ill. összegzésével ($K_t = K_c + K_w$, 4.21 ábra) a költségminimum helye, azaz a kívánatos brikettminőség optimális előállítási körülményei meghatározhatók az alábbiak szerint.



4.21 ábra. Költségfüggvények a kötőanyag koncentráció (c_k), a munka (w) ill. σ_h előírt brikettszilárdság függvényében

K költség,
 K_c a kötőanyag költsége,
 K_w a munka költsége és
 K_t a teljes költség.

4.5.4 Eredmények összefoglalása

- Az általánosan használt vízbázisú polimerek közül (diszperziós falfesték, csemperagasztó, faragasztó) az előzetes vizsgálatok alapján a csemperagasztóból kivont diszperzió bizonyult a leghatékonyabb kötőanyagnak.
- Megállapítható, hogy mind 40 mind 60 % polimer-koncentrációjú kötőanyag esetén a kompresszibilitás leírására a Johanson által meghatározott hatványfüggvény, és a Walker által felírt összefüggés a vizsgált tartományban alkalmas. Célszerű a széles körben alkalmazható Johanson-összefüggést használni a különböző anyagok brikettálhatóságának összehasonlíthatósága érdekében.
- Az azonos préselési nyomáson, ásványos hulladékból polimer kötőanyaggal készült tabletták abszolút és relatív sűrűségei –és ebből következően kompresszibilitási tényezőjük is– egy meghatározott minimális kötőanyagtartalom felett (60 % diszperziótartalom és $c_k > 2\%$ esetén) gyakorlatilag függetlenek a kötőanyag tartalomtól. Megállapítható, hogy a polimer kötőanyaggal készült tabletták préselés hatására azonos módon viselkednek, kompresszibilitásuk azonos tényezőjű Johanson-összefüggéssel ($\kappa = 23,24$ konst.) írható le a kötőanyagtartalomtól függetlenül.
- A préselés során felvett $F(s)$ görbe legnagyobb –a préselési munka szempontjából releváns– szakasza lineárisan közelíthető.
- Ábrázoltam a sűrűséget és a húzószilárdságot a befektetett fajlagos munka függvényében. A munka egységesítő szerepet tölt be ebben az ábrázolás módban, mivel mind az erőt, mind a térfogatcsökkenést magában foglalja.
- Megállapítható, hogy mind 40 mind 60 % polimer-koncentrációjú kötőanyag esetén a tömöríthetőség ($\sigma(p)$) leírására a Higuchi által meghatározott logaritmikus függvény alkalmas. A 40 % polimer-koncentrációjú kötőanyag esetén mutatkozó nagyobb szórás mutatja, hogy nincs elegendő kötőanyag a rendszerben.
- A sűrűség (60 % diszperziótartalom és $c_k > 2\%$ esetén) csak a befektetett munkától (ill. nyomástól) függ, a kötőanyagtartalomtól gyakorlatilag független: $\rho = f(p)$ ill. $\rho = f(w)$, ahol $w = f(p)$.

- A húzószilárdság azonban a kötőanyag mennyiségének és a munkának is függvénye: $\sigma_h = f(w, c_k)$. Ásványos hulladékok polimer kötőanyaggal történő brikettálása esetén egy előírt agglomerátum szilárdság többféle módon elérhető, nevezetesen nagyobb munkával és kisebb kötőanyagfelhasználással, és fordítva nagyobb kötőanyag felhasználással kisebb befektetett munkával. A tervezést tehát ezen kísérleti vizsgálatokra alapozott összefüggésekre kell alapozni a gazdaságosság figyelembevételével. Az SiC-re (100...200 MPa tartományban a vizsgált kötőanyaggal) a következő összefüggések adódtak:

$$\sigma_h = a c_k + b,$$

ahol

$$a = f(w) = \alpha_1 w + \beta_1,$$

$$b = f(w) = \alpha_2 w + \beta_2,$$

amelyekben: $\alpha_1 = -7,3504 \cdot 10^{-4}$, $\beta_1 = 2,5401 \cdot 10^{-2}$, $\alpha_2 = 1,5751 \cdot 10^{-2}$, $\beta_2 = -4,7082 \cdot 10^{-2}$.

5 HETEROGÉN, SZÁLAS HULLADÉKOK NYOMÁSSAL TÖRTÉNŐ AGGLOMERÁLÁSA

Ebben a fejezetben az AVE Miskolc által szelektíven begyűjtött papír ill. karton hulladékok (ill. ezek fűrészporral és faforgáccsal készített keverékeinek), valamint szilárd települési hulladék mechanikai biológiai stabilizálásának nagy fűtőértékű frakciójának darabosíthatóságát vizsgálom meg. Ismertetem továbbá autóshredderüzemi ciklonpor és komposztált szennyvíziszap briketálhatóságának kísérleti vizsgálati eredményeit.

5.1 Papírhulladékok valamint papírhulladék-faforgács és papírhulladék-fűrészpor keverékek darabosíthatóságának vizsgálata

A hulladékgazdálkodási cégek a papírhulladékok mellett gyakran fahulladékot is begyűjtenek. A papírhulladék energetikai hasznosítása mellett, a papír és fa együttes energetikai hasznosítása is célszerű lenne. Emiatt a kísérleteim a papírhulladékok (újságpapír), valamint papírhulladék és fa kötőanyag nélküli együttes brikettálásának vizsgálatára irányultak.

A brikettálási kísérletek megkezdése előtt vizsgáltam az anyag nedvességtartalmát. A nedvességtartalom meghatározása után elkészítettem a briketteket az intézeti dugattyús prés segítségével.

5.1.1 Nedvességtartalom meghatározás

A brikettálás során kiemelten fontos a nyersanyagok nedvességtartalma, az eddigi intézeti vizsgálatok alapján 5-10 % nedvességtartalom az optimális. Nedvességtartalom vizsgálatra a vágómalom (12 mm-es lyukbőségű kihordó szitaráccsal rendelkező) aprítéka, valamint a 2 mm-nél nagyobb szemcseméretű faforgács és a 2 mm-nél kisebb szemcseméretű fűrészpor került. A mérések eredményeit az 5.1 táblázat foglalja össze [14].

5.1 táblázat: Alapanyagok nedvességtartalmai

Anyag	Nedvességtartalom [%]
<i>újságpapír</i>	6,3
<i>fűrészpor</i>	11,3
<i>faforgács</i>	11,4

A táblázatból leolvasható, hogy minta nedvességtartalma optimális volt a brikettáláshoz.

5.1.2 Sűrűség nyomás összefüggése

A kísérletek során vizsgáltam az újságpapír és a fa (fűrészpor, faforgács) együttes brikettálásának lehetőségeit. A tabletták elkészítése a 3. fejezetben bemutatott kísérleti berendezéssel történt. A kísérletek során az újságpapír brikettálási lehetőségeit; valamint az újságpapír és faforgács (> 2 mm), illetve az újságpapír és fűrészpor (< 2 mm) együttes brikettálásának lehetőségeit vizsgáltam.

A 12 mm-es lyukbőségű kihordó szitaráccsal történt aprítás termékének brikettálása; az eredmények kiértékelése

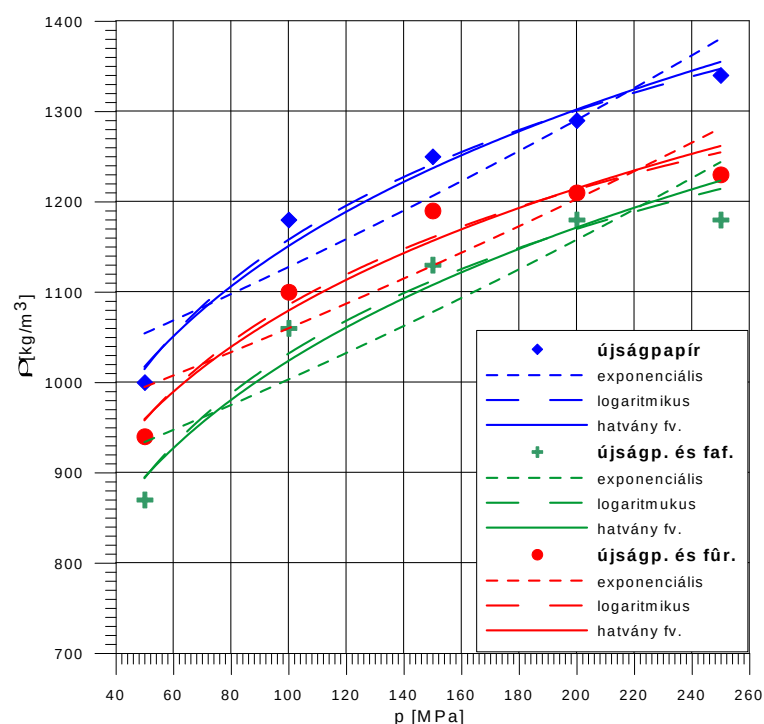
Először a 12 mm-es kihordó szitaráccsal rendelkező vágómalomban történt az újságpapír aprítása. Az első esetben tisztán az újságpapír hulladékból készült brikett, majd az újságpapír és faforgács keverékéből (50-50 % arányban), végül pedig az újságpapír-fűrészpor keverékéből (50-50 % arányban). Mind a három esetben öt különböző nyomáson (50, 100, 150, 200, 250 MPa), és szobahőmérsékleten három tabletta készült.

Az egyes tabletták térfogatának és sűrűségének meghatározása a 3. fejezetben leírtak szerint történt. A számított térfogatok és sűrűségek átlagértékeit a következő táblázat foglalja össze.

5.2 táblázat: 12 mm lyukbőségű kihordó szitarács esetén az átlag sűrűség és térfogat

Alkalmazott nyomás	Papírhulladék		Papírhulladék + fűrészpor		Papírhulladék + faforgács	
	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]	V [cm ³]	ρ [kg/m ³]
50 MPa	4,94	1000	5,24	940	5,65	870
100 MPa	4,21	1180	4,44	1100	4,67	1060
150 MPa	3,93	1250	4,10	1190	4,39	1130
200 MPa	3,87	1290	4,09	1210	4,17	1180
250 MPa	3,71	1340	4,02	1230	4,16	1180

A tabletták sűrűségének meghatározása után vizsgáltam a tabletták sűrűsége és az alkalmazott nyomás közötti összefüggéseket. Az adatokat a Grapher 3 nevű program segítségével ábrázoltam egy sűrűség-nyomás koordináta rendszerben. A pontokra hatványfüggvényt, logaritmikus és exponenciális függvényeket illesztettem, majd leolvastam a görbék egyenleteit.



5.1. ábra: A brikettek sűrűsége és nyomási közötti összefüggése

A görbéről leolvasott egyenleteket a következő táblázat foglalja össze. Látható, hogy a legkisebb relatív szórások a logaritmikus ($V_{s\text{átl.}}=1,92\%$) és a Johanson-féle hatványfüggvények ($V_{s\text{átl.}}=2,38\%$) illesztésével érhetők el.

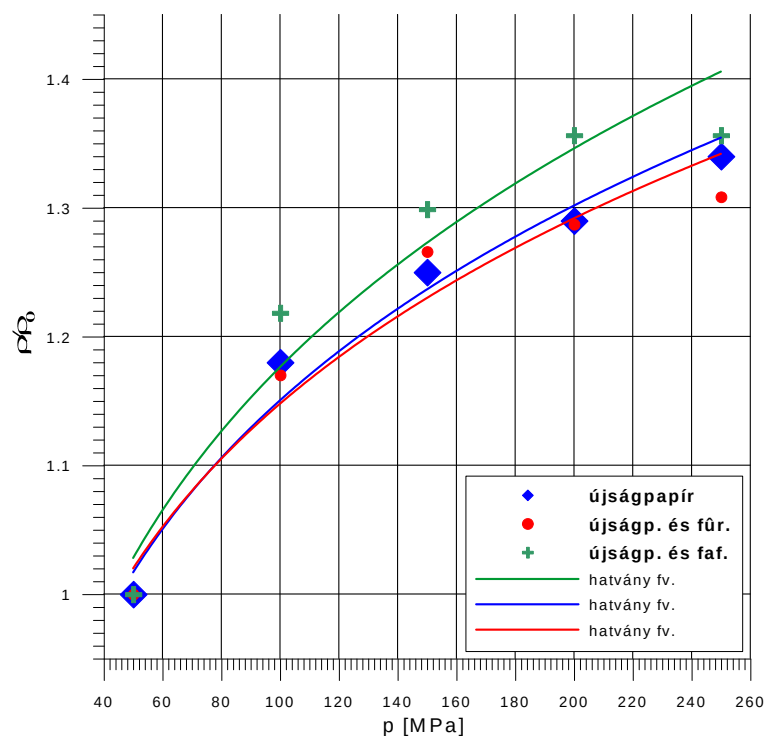
5.3. táblázat: A sűrűség-nyomás görbék egyenletei

Johanson-összefüggés (hatványfüggvény)		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\rho = 506,57 p^{0,178105}$ $\kappa=5,61$	$R^2=0,976512$ $\sigma = 20,48$ (számított szórás) $V_s = 1,69\%$
újságpapír és fűrészpor	$\rho = 492,23 p^{0,17041}$ $\kappa=5,87$	$R^2=0,954433$ $\sigma = 27,1$ $V_s = 2,39\%$
újságpapír és faforgács	$\rho = 418,02 p^{0,194408}$ $\kappa=5,14$	$R^2=0,942202$ $\sigma = 33,06$ $V_s = 3,05\%$
Exponenciális összefüggés		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\ln(\rho) = 0,001349 p + 6,8926$	$R^2=0,866845$ $\sigma = 48,01$ $V_s = 3,96\%$
újságpapír és fűrészpor	$\ln(\rho) = 0,001266 p + 6,8388$	$R^2=0,81542$ $\sigma = 52,51$ $V_s = 4,63\%$
újságpapír és faforgács	$\ln(\rho) = 0,001434 p + 6,7672$	$R^2=0,792878$ $\sigma = 60,42$ $V_s = 5,57\%$
Logaritmikus összefüggés		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\rho = 206,5663 \ln(p) + 206,12$	$R^2=0,986438$ $\sigma = 15,39$ $V_s = 1,27\%$
újságpapír és fűrészpor	$\rho = 184,3527 \ln(p) + 236,29$	$R^2=0,964579$ $\sigma = 22,45$ $V_s = 1,98\%$
újságpapír és faforgács	$\rho = 199,0053 \ln(p) + 114,94$	$R^2=0,956043$ $\sigma = 27,12$ $V_s = 2,5\%$

Ábrázoltam a relatív sűrűséget is –Johanson szellemében– a préselési nyomás függvényében (5.2. ábra), a kompresszibilitás jobb összehasonlíthatósága érdekében, hiszen a keverék alkotóinak sűrűsége is eltér egymástól. Az újságpapírra és az újságpapír-fűrészpor keverékére gyakorlatilag ugyanaz az a hatványfüggvény illeszthető. A függvények egyenletei az 5.4. táblázatban találhatók.

Az eredmények alapján a következő megállapítások tehetők: a legnagyobb sűrűségű briketteket 250 MPa nyomáson sikerült előállítani, az átlagos sűrűségértékek 870...1340 kg/m³ között változnak. A nyomás növelésével arányosan nő a költség is. A nyomás

növelésével azonban egy bizonyos érték után (jelen esetben 200 MPa) csak kis mértékben nő a sűrűség, emiatt meg kell találni azt az optimumot, ahol megfelelő a sűrűség és az előállítás gazdaságos.

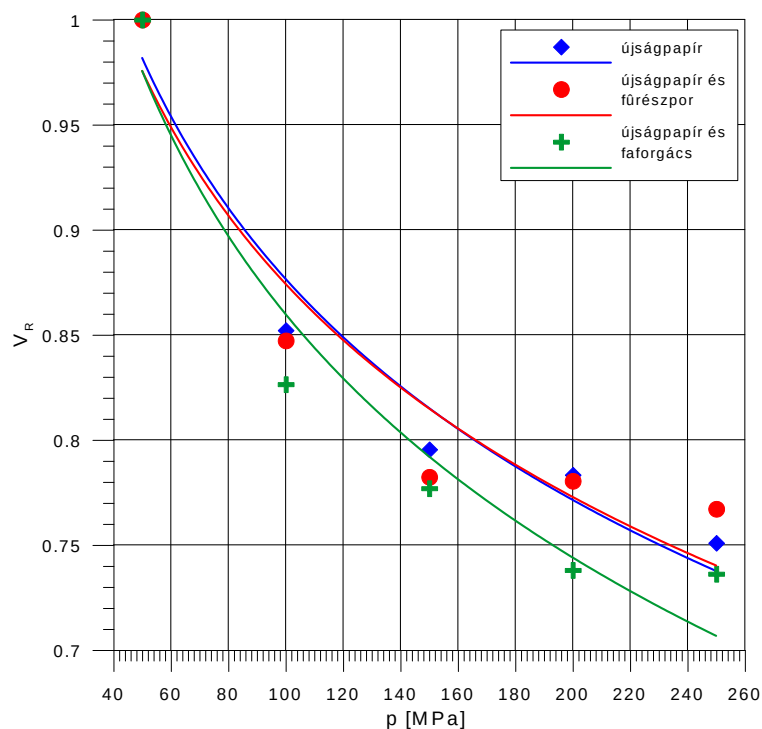


5.2. ábra: A briettek relatív sűrűsége és a nyomás közötti összefüggés

5.4. táblázat: A relatív sűrűség - nyomás görbék egyenletei

Johanson-összefüggés (hatványfüggvény)		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\rho/\rho_0 = 0,506569 p^{0,178105}$ $\kappa=5,61$	$R^2 = 0,976512$ $\sigma = 0,0205$ $V_s = 1,69 \%$
újságpapír és fűrészpor	$\rho/\rho_0 = 0,523661 p^{0,170404}$ $\kappa=5,87$	$R^2 = 0,954389$ $\sigma = 0,0288$ $V_s = 2,39 \%$
újságpapír és faforgács	$\rho/\rho_0 = 0,480506 p^{0,194399}$ $\kappa=5,14$	$R^2 = 0,942153$ $\sigma = 0,0380$ $V_s = 3,05 \%$

Az alkalmazott préselési nyomás relatív tabletta térfogat értékpárookra a Walker által meghatározott függvényt illesztettem (5.3. ábra), melynek egyenletei az 5.5 táblázatban láthatók. A κ átlagos értéke 5,54 (5,14...5,87), míg SiC esetén (60 % diszperzió a kötőanyagban) 23,24 adódott. Az alacsonyabb κ esetén adott préselési nyomásérték változást nagyobb sűrűségnövekedés követ. Az újságpapír keverékek esetén a szemcsék alakváltozása miatt érhető el nagyobb sűrűségnövekedés, szemben a rideg, szemcsés SiC-vel.

5.3. ábra: Tabletta relatív térfogat (V_R) a préselési nyomás (p) függvényében

5.5 táblázat: Illesztett függvények

Walker-összefüggés		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$V = -0,349195 \log_{10} p + 1,5749$	$R^2 = 0,9578$
újságpapír és fűrészpor	$V = -0,336702 \log_{10} p + 1,5475$	$R^2 = 0,9161$
újságpapír és faforgács	$V = -0,384578 \log_{10} p + 1,6289$	$R^2 = 0,9407$

A 6 mm-es lyukbőségű kihordó szitaráccsal történt újságpapír aprítás aprítékát csak önmagában vizsgáltam, öt különböző nyomáson készültek tabletták (50, 100, 150, 200, 250 MPa), minden egyes névleges nyomáson 3 db.

A tabletták térfogatának meghatározása után, a tömegek ismeretében kiszámolható a tabletták sűrűsége. Az átlag térfogatokat és sűrűségeket a következő táblázat foglalja össze.

A tabletták térfogatának meghatározása után, a tömegek ismeretében kiszámolható a tabletták sűrűsége. Az átlag térfogatokat és sűrűségeket a következő táblázat foglalja össze.

5.6 táblázat: 6 mm lyukbőségű szita esetén az átlag sűrűség és az átlag térfogat

Alkalmazott nyomás	újságpapír		
	$V [cm^3]$	$\rho [kg/m^3]$	ρ/ρ_0
50 MPa	4,99	990	1
100 MPa	4,22	1180	1,19
150 MPa	4,00	1240	1,25
200 MPa	3,92	1270	1,28
250 MPa	3,77	1320	1,33

Megállapítható, hogy az elért sűrűségek -azonos préselési nyomásokon- gyakorlatilag megegyeznek a <12 mm lyukbőségű szita termékéből készült tablettákéval. Mivel a

nagyobb szemcseméretű termék is megfelelően brikettálódott, ezért költséghatékonyság szempontjából nem célszerű 12 mm-nél kisebb lyukbőségű kihordó szitarácsot alkalmazni. A továbbiakban emiatt csak a 12 mm-es lyukbőségű kihordó szitarács aprítékának segítségével készített brikettek vizsgálatom.

5.1.3 Brikettálási munka

A brikettek minősítése során vizsgáltam a brikettálási munkát, valamint a brikettek sűrűsége és a fajlagos munka közötti összefüggéseket. Az elvégzett törési kísérletek eredményeire támaszkodva vizsgáltam a húzószilárdság és a nyomás, illetve a húzószilárdság és a fajlagos munka kapcsolatát.

A brikettálási munka vizsgálata és kiértékelése

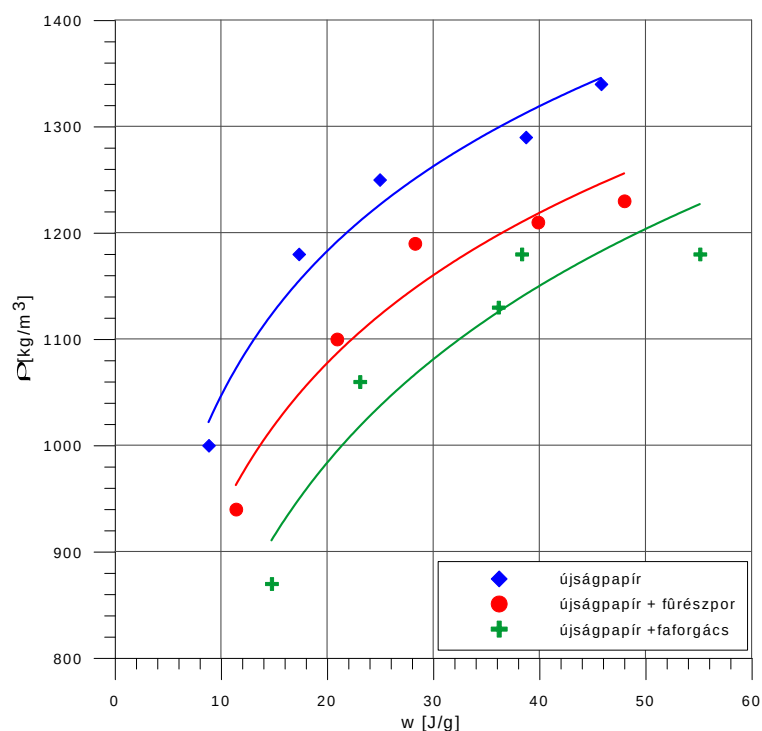
A tabletták préselése közben a 3. fejezetben bemutatott mérőberendezés regisztrálta az erőt és az elmozdulást az idő függvényében.

A méréseimhez használt program 50 mérési pontot mentett el másodpercenként. Ezeket a pontokat Graph program segítségével ábrázolva megkapjuk a pontokat egy erő-elmozdulás koordináta rendszerben, minden egyes tablettára. A pontokra exponenciális segéd függvényt illesztette, a görbe alatti terület megadja a végzett munkát.

5.7. táblázat: Az átlagos fajlagos munka értékei

Alkalmazott nyomás	újságpapír	újságpapír és fűrészpor	újságpapír és faforgács
	w [J/g]	w [J/g]	w [J/g]
50 MPa	8,83	11,14	14,76
100 MPa	17,33	20,92	23,08
150 MPa	24,95	28,27	36,13
200 MPa	38,72	39,86	38,33
250 MPa	45,81	47,99	55,12

Ezután vizsgáltam a tabletták sűrűsége és a fajlagos munka közötti összefüggéseket (5.4. ábra). Az adatokat ábrázoltam egy sűrűség-fajlagos munka koordináta rendszerben. A pontokra egy logaritmus függvényt illesztettem, majd leolvastam a görbék egyenleteit.



5.4. ábra: A brikettek sűrűsége és a fajlagos munka közötti összefüggése

A görbéről leolvasott egyenleteket a következő táblázat foglalja össze:

5.8. táblázat: A sűrűség-fajlagos munka görbék egyenletei

Logaritmikus összefüggés		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\rho = 196,67 \ln(w) + 593,34$	$R^2 = 0,967942$ $\sigma^2 = 746,729$
újságpapír és fűrészpor	$\rho = 203,99 \ln(w) + 466,01$	$R^2 = 0,943789$ $\sigma^2 = 1066,52$
újságpapír és faforgács	$\rho = 240,01 \ln(w) + 264,41$	$R^2 = 0,891455$ $\sigma^2 = 2421,29$

A kísérleti eredmények alapján megállapítható, hogy a befektetett munka növelésével nőtt a brikettek sűrűsége.

5.1.4 Húzószilárdság vizsgálata

A törési kísérletek során a különböző nyomásokon készült tablettákat egytengelyű nyomó vizsgálatnak vettem alá. A kísérletek végrehajtása a Mechanikai Technológiai Tanszéken található MTS gyártmányú hidraulikus törőgépel történt. A berendezés működési elvét és paramétereit a 3. fejezetben ismertettem. Az erők ismeretében meghatározható a húzószilárdság (5.9. táblázat).

5.9. táblázat: A húzószilárdságokat összefoglaló táblázat

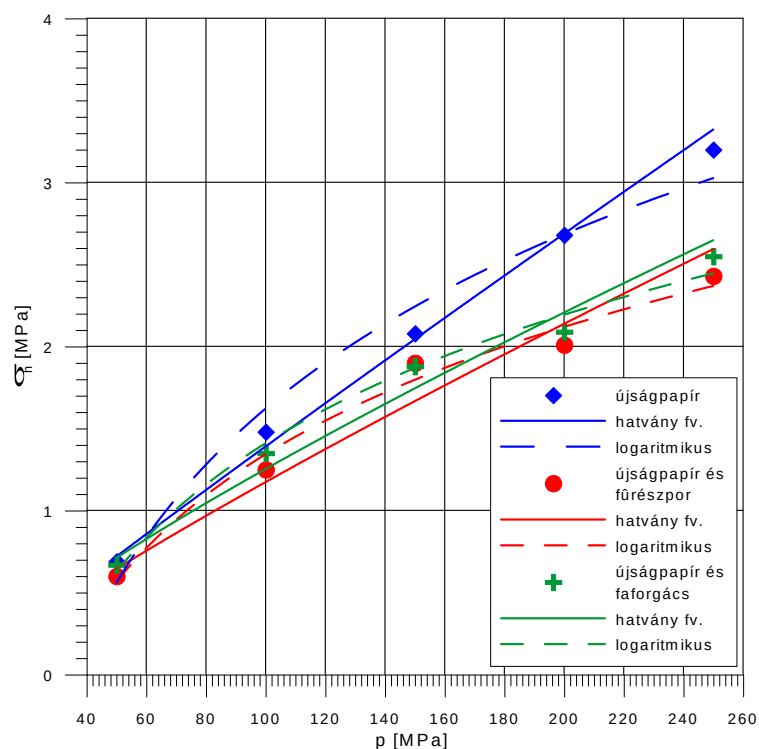
Alkalmazott nyomás	Papír hulladék	Papír + fűrészpor	Papír + forgács
	σ_h [MPa]	σ_h [MPa]	σ_h [MPa]
50 MPa	0,69	0,6	0,67
100 MPa	1,48	1,25	1,35
150 MPa	2,08	1,9	1,88
200 MPa	2,68	2,01	2,09
250 MPa	3,2	2,43	2,55

Az 5.5. ábra mutatja a papír tabletta törési szilárdságának meghatározását.



5.5. ábra: Papír tabletta törése

A kísérletek végeztével vizsgáltam a szilárdság-nyomás összefüggéseit (5.6 ábra), a pontokra illesztett függvények az 5.10 táblázatban találhatók. A Higuchi ($V_{sátl.}=6,06\%$) ill. Newton Grant ($V_{sátl.}=6,82\%$) nyomán illesztett görbékkel leírhatók az összefüggések.

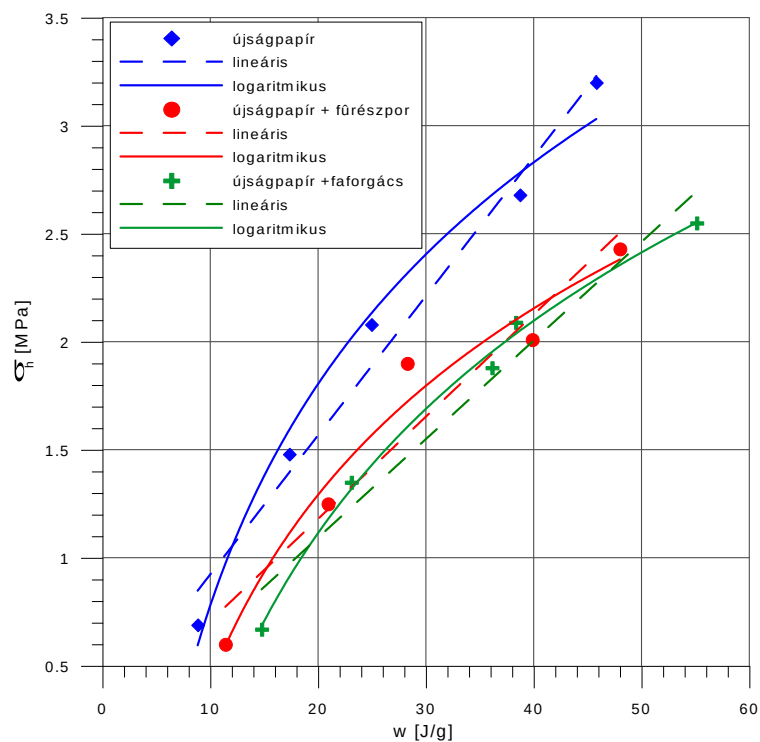


5.6 ábra: A húzószilárdság és nyomás összefüggése

5.10 táblázat: Illesztett függvények egyenletei

Logaritmikus (Higuchi)		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\sigma_h = 1,5332 \ln(p) - 5,4402$	$R^2 = 0,975839$ $\sigma = 0,1533$ $V_s = 7,57 \%$
újságpapír és fűrészpor	$\sigma_h = 1,1199 \ln(p) - 3,8156$	$R^2 = 0,982553$ $\sigma = 0,0948$ $V_s = 5,79 \%$
újságpapír és faforgács	$\sigma_h = 1,1300 \ln(p) - 3,7946$	$R^2 = 0,986982$ $\sigma = 0,0825$ $V_s = 4,83 \%$
Hatványfüggvény (Newton és Grant)		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\sigma_h = 0,01743 p^{0,9508}$	$R^2 = 0,99499$ $\sigma = 0,0791$ $V_s = 3,9 \%$
újságpapír és fűrészpor	$\sigma_h = 0,0217 p^{0,8659}$	$R^2 = 0,97253$ $\sigma = 0,1615$ $V_s = 9,86 \%$
újságpapír és faforgács	$\sigma_h = 0,02911 p^{0,8168}$	$R^2 = 0,982582$ $\sigma = 0,1146$ $V_s = 6,71 \%$

A következő ábra a brikettálási munka és a feszültség összefüggését szemlélteti.



5.7. ábra: A húzószilárdság és a fajlagos brikettálási munka összefüggése

A leolvasott egyenletek paramétereit a következő táblázat tartalmazza, a logaritmikus görbék esetén $V_{sátl.}=5,60\%$, egyenes illesztéskor $V_{sátl.}=9,33\%$.

5.11. táblázat: A húzószilárdság - brikettálási munka görbéről leolvasott egyenletek

Logaritmikus		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\sigma_h = 1,4796 \ln(w) - 2,6283$	$R^2 = 0,983703$ $\sigma = 0,1259$ $V_s = 6,22\%$
újságpapír és fűrészpor	$\sigma_h = 1,2444 \ln(w) - 2,4369$	$R^2 = 0,969383$ $\sigma = 0,1269$ $V_s = 7,75\%$
újságpapír és faforgács	$\sigma_h = 1,4175 \ln(w) - 3,1323$	$R^2 = 0,995503$ $\sigma = 0,0485$ $V_s = 2,84\%$
Lineáris		
Minta összetétele	Illesztett görbe	
újságpapír	$\sigma_h = 0,064413 w + 0,278617$	$R^2 = 0,979647$ $\sigma = 0,1407$ $V_s = 6,95\%$
újságpapír és fűrészpor	$\sigma_h = 0,047304 w + 0,233627$	$R^2 = 0,924228$ $\sigma = 0,1950$ $V_s = 11,91\%$
újságpapír és faforgács	$\sigma_h = 0,045626 w + 0,180255$	$R^2 = 0,953613$ $\sigma = 0,1557$ $V_s = 9,12\%$

A papír, faforgács és fűrészpor brikettálásával kapcsolatban összefoglalóan megállapítható:

- A brikettált újságpapír, ill. annak fűrészporral és faforgáccsal kevert változatai esetén a kompresszibilitás a logaritmikus ill. Johanson-féle hatványfüggvénnyel írható le a legjobban a vizsgált tartományban. A legnagyobb sűrűség tiszta papír esetén érhető el. A Walker-összefüggés is alkalmazható a jelenség leírására. A κ értékei 5,14...5,87 közt változnak, míg SiC esetén a κ jelentősen nagyobb: a papír, és az abból képzett keverékek esetén a préselési nyomás érték változást nagyobb sűrűségnövekedés követi.
- Az újságpapírra és az újságpapír keverékeire az ρ/ρ_0 -p (relatív sűrűség) Johanson féle hatványfüggvénnyel leírható összefüggés gyakorlatilag megegyezik, ugyanaz az a hatványfüggvény illeszthető.
- Tiszta papír esetén a papír szemcsemérete (12 ill. 6 mm-es szitacíssal üzemelő malom) nem befolyásolta a tabletták sűrűségét.
- A tömöríthetőség legjobban a logaritmikus (Higuchi) függvénnyel írható le, legnagyobb húzószilárdság tiszta papír esetén érhető el, a fűrészpor és a faforgács csökkentették a szilárdságot, a fűrészpor kevésbé, mert jobban be tudott épülni a papír mátrixba.

5.2 Mechanikai biológiai hulladékkezelés technológiájából származó nagy fűtőértékű frakció

A brikettálási eljárások manapság egyre nagyobb teret hódítanak. Az ipar számos területén észrevehető az igény az új típusú agglomerátumok (köznyelvben pellet) előállítására. Eredetileg takarmányok készítésére használták az eljárást, de ma már másod-tüzelőanyagok előállítására is alkalmazzák. Ebben az alfejezetben bemutatásra kerülnek a kezelt települési szilárd hulladékból történő tablettá előállítás, és a hulladék eljárás technikai tulajdonságai.

A mechanikai biológiai hulladékkezelés (MBH) során a hulladékot kíméletes előaprítást követően több héten át (jelen hulladék esetén 4 héten át) tartó biológiai kezelésnek vetik alá, levegő hozzávezetésével. A kezelés során a biológiailag bomló anyagok szemcsemérete csökken, így szemcseméret szerint leválasztható a jellemzően nagyobb szemcseméretű, nagy fűtőértékű frakcióból. A nagyobb fűtőértékű frakciót további mechanikai kezelésekkal készítik elő fűtőanyagnak, gyakran pelletálják. A vizsgálatok során a biológiai kezelés termékének > 75 mm-es frakcióját használtam.

5.2.1 A brikettálandó anyag előkészítése, eljárás technikai jellemzői

A mintaanyag anyagi összetétele az 5.12 táblázatban látható.

5.12 táblázat. Anyagi összetétel > 75 mm-es frakció esetében (MSZ 21420-28 és 29 szabványok szerinti kategóriák)

Anyag fajta	Tömeghányad [%]
1.Bio	0,1
2. Papír	10,6
3. Karton	3,5
4. Kompozit	1,6
5. Textil	6,7
6. Higiéniai	7
7. Műanyag	46
8. Éghető	18,8
9. Üveg	0
10. Fém	4,3
11. Éghetetlen	1,4
12. Veszélyes	0
Összesen	100

Látható, hogy 46 %-ban a minta műanyagot, műanyagból készült csomagolóanyagot tartalmazott. A merev falú műanyag csomagolóanyagok és fóliák legfontosabb típusait tartalmazza a következő táblázat.

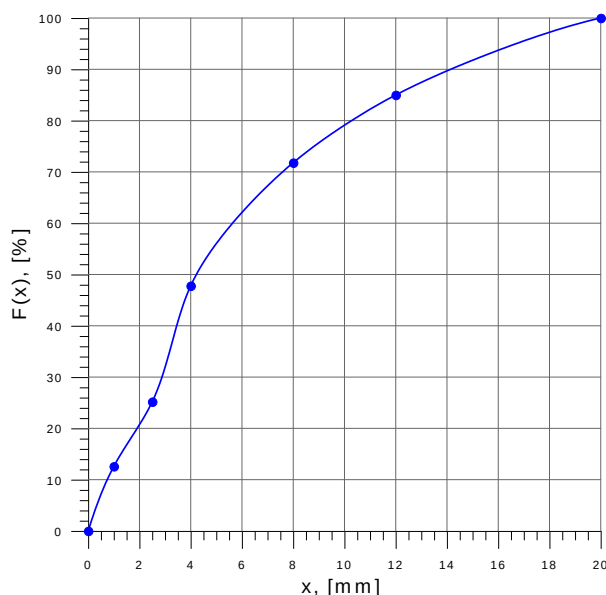
5.13. táblázat. Fontosabb műanyag csomagolóanyagok lágyuláspontjai

Műanyag megnevezése	Főbb felhasználás	Olvaspont
Poliéterterftalát (PET)	szénsavas italok palackja, élelmiszercsomagolás	255 °C
Kis sűrűségű polietilén (LDPE)	fóliák, zacskók	olvadási hőmérséklet: 110...120 °C
Nagy sűrűségű polietilén (HDPE)		olvadási hőmérséklet: 133 °C
Polivinilklorid (PVC)	ételtálcák, ásványvizes palackok	melegen formázható: 110...140 °C
Polipropilén (PP)	margarinos poharak, tálcák mikrohullámú melegítésre szánt ételeknek	olvadási tartomány: 140...160 °C
Polisztriol (PS)	habosított ételtálcák, tojástartók, elektronikai eszközök, játékok csomagolása	olvadási tartomány: 140...160 °C

Az anyag előkészítése a forgótárcsás nyíró-aprítógéppel, majd a 8 mm-es szitabetéttel ellátott függőleges tengelyű vágómalommal történő aprításból állt. Ezek után a brikettálásra szánt anyag eljárastechnikai tulajdonságait (szemcseméret-eloszlás, nedvességtartalom stb.) szükséges meghatározni. A hulladék meghatározott szitasoron kézi, száraz szítással meghatározott szemcseméret-eloszlását és sűrűségfüggvényét az 5.14. táblázat és az 5.8. ábra tartalmazza [26].

5.14. táblázat. A brikettálásra szánt anyag szita elemzésének eredményei

x [mm]	m [g]	Δm_i [%]	Δx_i [mm]	F(x) [%]	f(x) [1/mm]
(20) >12	138,18	15,0192	8	100,0000	1,8774
12-8	121,30	13,1845	4	84,9808	3,2961
8-4	220,89	24,0093	4	71,7963	6,0023
4-2,5	208,20	22,6299	1,5	47,7870	15,0866
2,5-1	115,55	12,5595	1,5	25,1571	8,373
(0) <1	115,90	12,5976	1	12,5976	12,5976
Σ	920,02	100,0000			

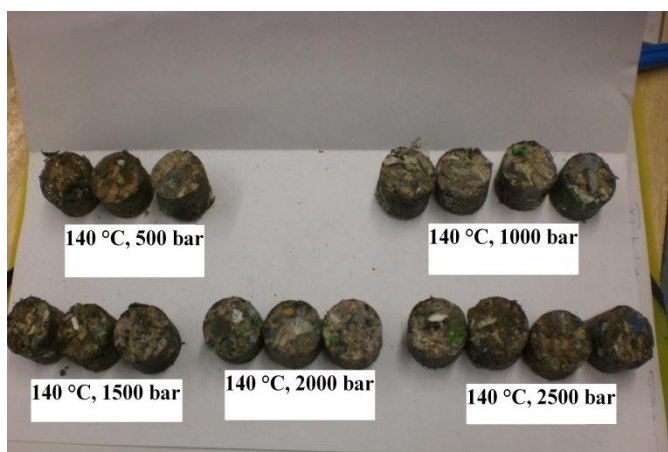


5.8. ábra. A brikettálásra szánt MBH frakció szemcseméret-eloszlása

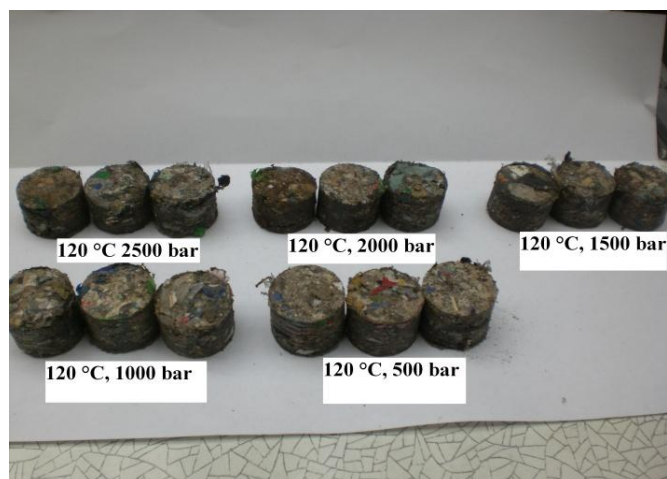
A tablettázásra feladott anyag nedvességtartalma a vizsgálatok eredményei szerint 10,3 %-ra adódott.

5.2.2 A brikettálási kísérletek

A brikettálás különböző hőmérsékleteken valamint nyomásokon történt, és a berendezéshez kötött számítógép pedig a kísérletek során mért adatokat gyűjtötte össze, amelyeket a vizsgálat végén kiértékeltem.



5.9. ábra. Különböző nyomáson készült tabletták (140 °C)



5.10. ábra. Különböző nyomáson készült tabletták (120 °C)



5.11. ábra. 200 MPa-on készült tabletta (100 °C)

Az alkalmazott hőmérsékletek a 120 °C és a 140 °C volt, a nyomások pedig 50 MPa, 100 MPa, 150 MPa, 200 MPa, 250 MPa. A 100 °C-on, különböző nyomásokon elvégzett kísérletek sikertelennek bizonyultak, mivel a brikettek megrepedtek. 10 g hulladékból állt minden egyes brikett, az alapanyag előmelegítése az alkalmazott hőmérsékletű szárítószekrényben történt 20 percen át, majd ezt a gépben további 5 perc melegítés követte, ezek után történt a darabosítás. A préselő dugattyú sebessége 20 mm/s volt.

A tabletták 3 másodpercen át voltak kitéve az elért teljes nyomásnak. A kész tabletták paramétereiből (tolómérő segítségével meghatározott magasság, átmérő, ill. tömeg) számoltam a térfogatukat, majd a sűrűségüket. A kiindulási alapanyagok légszárazak voltak.

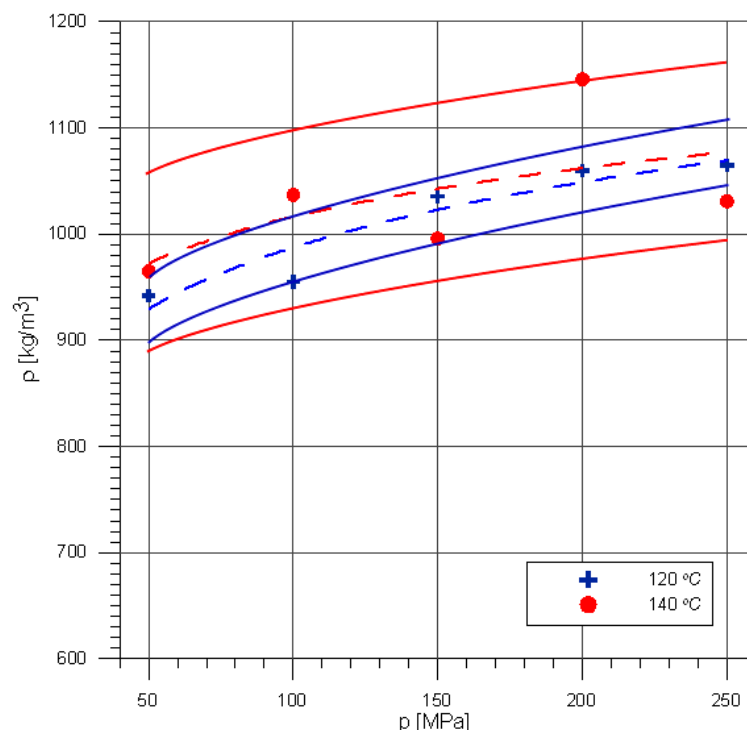
5.2.3 Sűrűség nyomás kapcsolata

Minden nyomáson 3 db tabletta készült, a különböző paraméterek mellett gyártott tabletták átlag sűrűségeit az 5.15. táblázat tartalmazza.

5.15. táblázat. A brikettek átlag-, és relatív (zárójelben) sűrűségei különböző paraméterek mellett

Nyomás/ Hőmérséklet	50 MPa	100 MPa	150 MPa	200 MPa	250 MPa
140 °C	964 kg/m ³ (1)	1037 kg/m ³ (1,0748)	996 kg/m ³ (1,0325)	1146 kg/m ³ (1,1883)	1031 kg/m ³ (1,0694)
120 °C	942 kg/m ³ (1)	955 kg/m ³ (1,0142)	1036 kg/m ³ (1,0997)	1060 kg/m ³ (1,1255)	1065 kg/m ³ (1,1305)
100 °C	Nem áll össze tabletta				

120 °C-on megfigyelhető az, hogy a préselési nyomás növelésével nőtt a tabletták átlagsűrűsége. Azonban 140 °C esetén, az értékek szórása nagy, ami a mintában lévő nagy műanyagtartalommal és annak ingadozásával magyarázható. Ilyen szemcseméretű minta és dugattyú átmérő esetén (az ipari gyakorlatban sem várhatók más arányok) nem biztosítható a teljesen homogén adagolás, így bizonyos esetekben több olyan műanyag kerülhetett a tablettába, ami jó kötőanyagként viselkedett lágyuláspontjából kifolyólag.



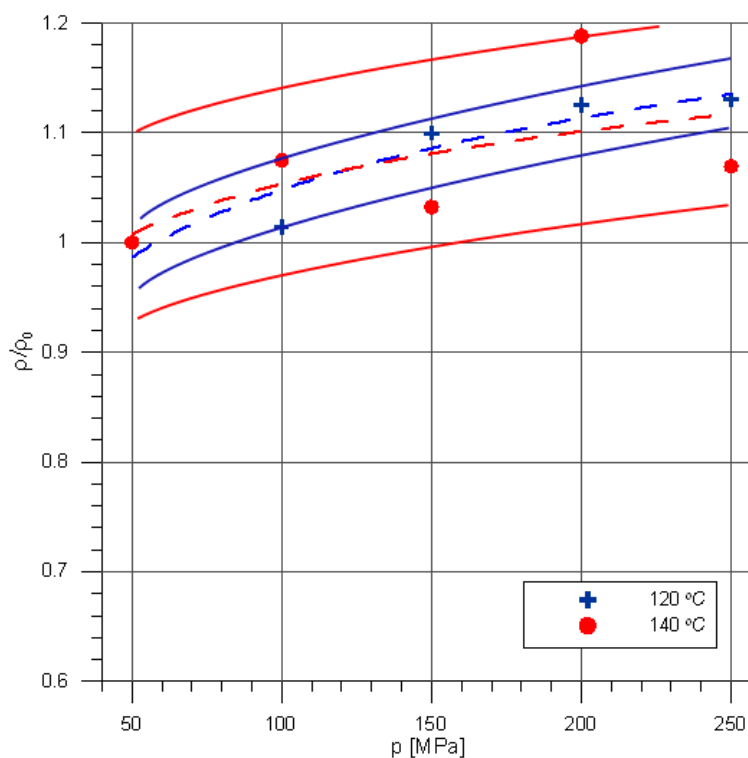
5.12. ábra. A különböző hőmérsékleten készített brikettek sűrűségei az alkalmazott nyomás függvényében

Az illesztett hatványfüggvények (szaggatott görbék) egyenleteit és paramétereit az 5.16. táblázatban ismertetem. A vizsgált jellemzők függvénykapcsolata nagy relatív szórást mutat, gyakorlatilag csak tendencia állapítható meg. A nagy relatív szórás miatt tartományokat (folytonos görbékkel határolt sáv) adok meg, melyek magukba foglalják az összes pontot, és határaik a pontokra illesztett görbétől az Y-tengely mentén pozitív és negatív irányban azonos távol helyezkednek el. 140 °C esetén a tartomány határai $\pm 8,8$ -%, 120 °C esetén $\pm 3,2$ %-ra adódnak.

5.16. táblázat: A brikettek sűrűségértékeire illesztett görbék egyenletei

Johanson összefüggés (hatványfüggvény)		
Hőmérséklet	Illesztett görbe	
120 °C	$\rho = 661,61 p^{0,086918}$ $\kappa = 11,5$	$R^2 = 0,885308$ $\sigma = 19,5$ $V_s = 1,93 \%$
140 °C	$\rho = 759,11 p^{0,063313}$ $\kappa = 15,7$	$R^2 = 0,386328$ $\sigma = 54,5$ $V_s = 5,27 \%$

A préselési nyomás függvényében ábrázoltam a relatív sűrűségeket is (5.14. ábra). A Johanson-féle összefüggéssel leírt kapcsolat az 5.17. táblázatban látható. A nagy relatív szórás miatt ebben az esetben is tartományokat adok meg, melyek határai az illesztett görbéhez képest 140 °C esetén $\pm 8,9$ -ra, 120 °C esetén $\pm 3,0$ %-ra adódnak.



5.13. ábra. A különböző hőmérsékleten készített brikettek relatív sűrűsége az alkalmazott nyomás függvényében

5.17. táblázat: A brikettek relatív sűrűségértékeire illesztett görbék egyenletei

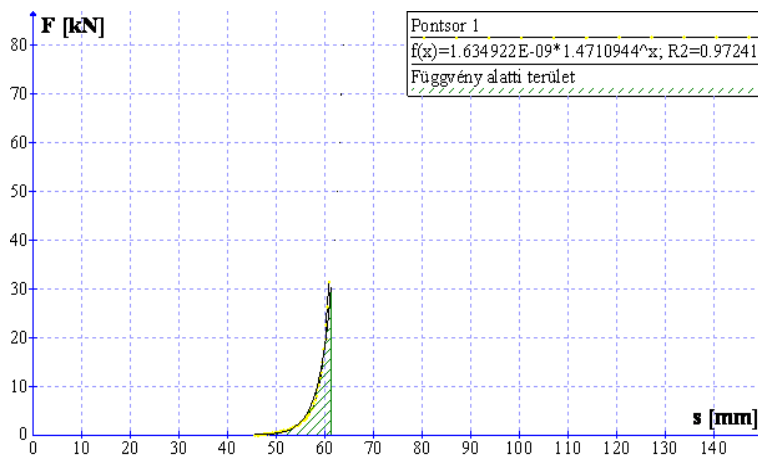
Johanson összefüggés (hatványfüggvény)		
Hőmérséklet	Illesztett görbe	
120 °C	$\rho = 0,702551 p^{0,086875}$ $\kappa=11,5$	$R^2 = 0,886695$ $\sigma = 0,0206$ $V_s = 1,91 \%$
140 °C	$\rho = 0,784883 p^{0,063860}$ $\kappa=15,7$	$R^2 = 0,390722$ $\sigma = 0,0564$ $V_s = 5,26 \%$

A κ értékei 11,5 ill. 15,7 közt változnak a hőmérséklet függvényében. A hulladék préselése során meghatározott κ értékek a rideg szemcsés SiC-től ($\kappa=22,35 \dots 23,7$ 60 % diszperzió tartalom esetén) jelentősen elmaradnak, a papír, és az abból képzett keverékek préseléskor fellépő értékeket (5,14...5,87) meghaladják.

5.2.4 Brikettálási munka

A brikettálás során ebben az esetben is az erő-elmozdulás értékpárookra illesztett segédfüggvény Graph v4.3 programmal s_0 és $s_{\max}$ között történő intergálásával történt a

befektetett munka meghatározása. A nyomás növelésével a befektetett munka nőtt. A továbbiakban példaként 1 tabletta diagramját mutatom be.

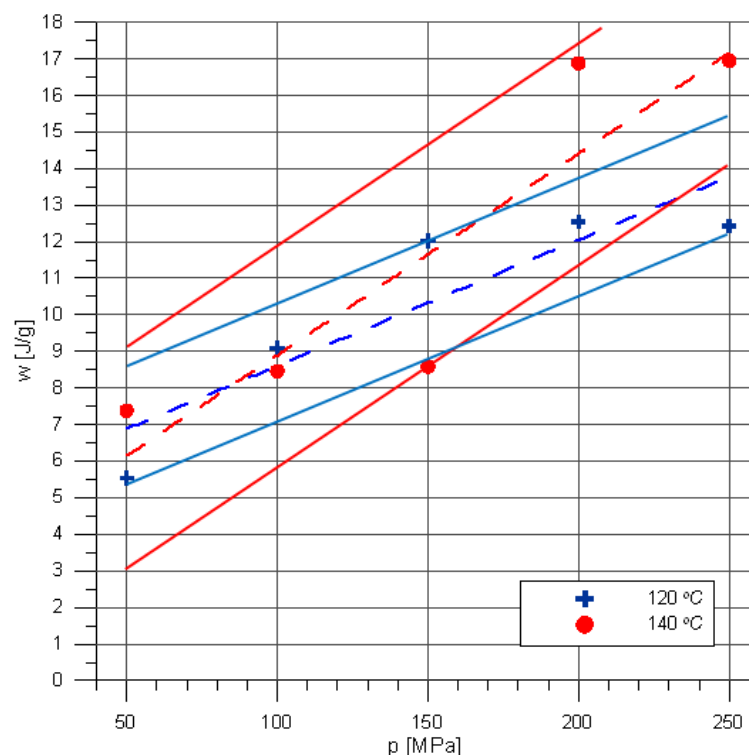


5.14. ábra. Erő-elmozdulás összefüggése 120 °C-on és 150 MPa nyomáson

Az 5.14. ábra a 150 MPa nyomáson készült brikettek készítéséhez szükséges munkát mutatja. Az s_0 ebben az esetben 45,16 mm és az s_{max} pedig 62,36 mm. A két tartomány közötti pontokat ábrázoltam, majd exponenciális segéd függvényt illesztettem rá. A befektetett munkát a görbe alatti terület meghatározásával tudtam kiszámítani.

5.18. táblázat. A befektetett munka nagysága különböző hőmérsékleten és nyomáson

Nyomás/ Hőmérséklet	50 MPa	100 MPa	150 MPa	200 MPa	250 MPa
140 °C	7,4 J/g	8,5 J/g	8,6 J/g	16,9 J/g	16,9 J/g
120 °C	5,5 J/g	9,1 J/g	12,0 J/g	12,6 J/g	12,4 J/g



5.15. ábra. A különböző hőmérsékleten készített tabletták brikettálási munkája a nyomás függvényében

A különböző hőmérsékleteken és nyomásokon készített tabletták befektetett munkaértékeire ebben az esetben egyenest illeszttem, amelynek egyenleteit és paramétereit a 5.19. táblázat mutatja be. A nagy relatív szórás miatt tartományokat is megadok, ezek határai az illesztett egyeneshez képest $\pm 22,8\%$ (120 °C) ill. $\pm 50,0\%$ (140 °C).

5.19. táblázat. A brikettálási munka értékeire illesztett egyenesek egyenletei

Hőmérséklet	Illesztett görbe	
120 °C	$w = 0,03448 p + 5,156$	$R^2 = 0,809635$ $\sigma = 1,34$ $V_s = 12,95\%$
140 °C	$w = 0,05512 p + 3,384$	$R^2 = 0,814836$ $\sigma = 2,08$ $V_s = 17,86\%$

Megállapítható, hogy a préselési nyomás növelésével nőtt a befektetett fajlagos munka. 150 MPa préselési nyomáson a szemcsés, rideg SiC esetén 5,7 J/g, újságpapír ill. keverékei esetén 24,95...36,13 J/g, míg a hulladék esetén 8,6...12 J/g-ot mértem.

5.2.5 Húzószilárdság

A húzószilárdság meghatározása a különböző paraméterrel rendelkező brikettek esetén egytengelyű nyomóvizsgálattal történt, a 3. fejezetben bemutatott hidraulikus törőgép segítségével.



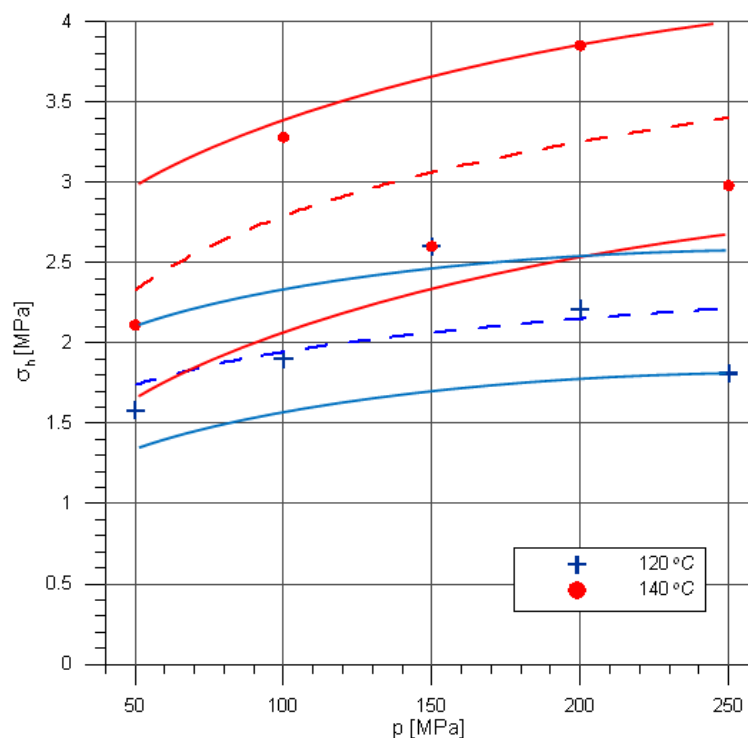
5.16. ábra. Brikett deformálódása és törése

A meghatározott erőkből a húzószilárdság számítható, az eredményeket az 5.20. táblázat mutatja be.

5.20. táblázat. A brikettek húzószilárdsága

Nyomás / Hőmérséklet	50 MPa	100 MPa	150 MPa	200 MPa	250 MPa
120 °C	1,58 MPa	1,90 MPa	2,60 MPa	2,21 MPa	1,81 MPa
140 °C	2,11 MPa	3,28 MPa	2,60 MPa	3,85 MPa	2,98 MPa

A vizsgálat során általában a brikettek deformálódtak, de egyes tablettáknál nagyobb nyomás esetén már törés is felfedezhető volt. Nagyobb hőmérsékleten készült brikettek esetén nagyobb törőerőre volt szükség, ami azt jelenti, hogy a magasabb hőmérséklet esetén szilárdabb tabletták készültek. A maximális húzószilárdsághoz tartozó préselési nyomás 120 °C-on 150 MPa, 140 °C esetén 200 MPa.

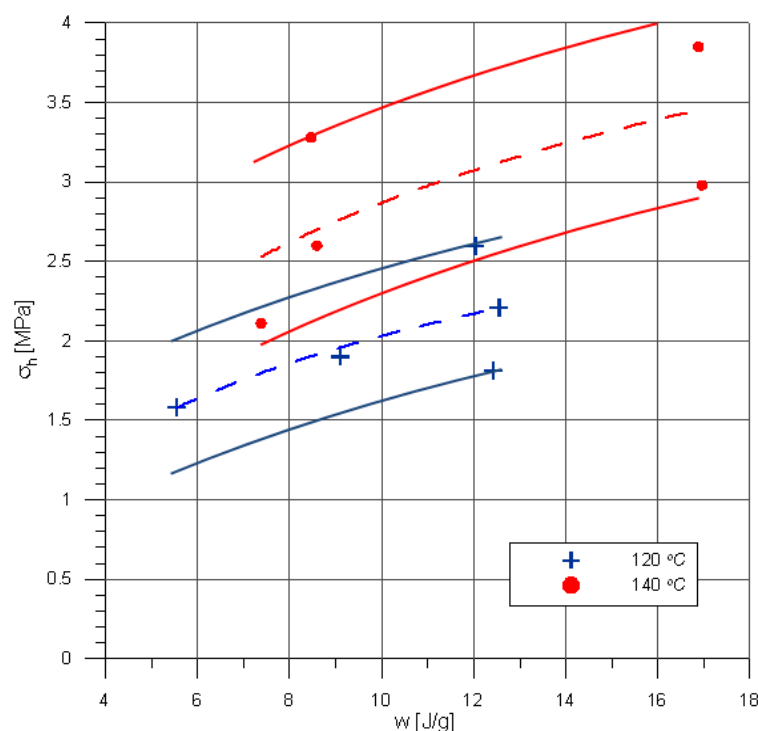


5.17. ábra. A különböző hőmérsékleten készített brikettek húzószilárdsága a nyomás függvényében

A különböző hőmérsékleten készített brikettek törési szilárdságértékeire logaritmikus görbét illesztettem a Grapher program segítségével, amelynek egyenletét és paramétereit az 5.21. táblázat mutatja. A nagy relatív szórás miatt felvett tartományok határai az illesztett görbéhez képest 140 °C esetén $\pm 27,7$ %-ra, 120 °C esetén $\pm 20,0$ %-ra adódnak.

5.21. táblázat. A húzószilárdság értékeire illesztett görbék egyenletei

Hőmérséklet	Illesztett görbe	
120 °C	$\sigma_h = 0,296771 \ln(p) + 0,5749$	$R^2 = 0,227796$ $\sigma = 0,347$ $V_s = 17,19 \%$
140 °C	$\sigma_h = 0,664286 \ln(p) - 0,2708$	$R^2 = 0,408077$ $\sigma = 0,508$ $V_s = 17,15 \%$



5.18. ábra: A különböző hőmérsékleten készített brikettek húzószilárdsága a befektetett fajlagos munka függvényében

Az 5.18. ábra mutatja a húzószilárdság értékeket a befektetett fajlagos munka függvényében. Ebben az esetben a felvett sávok határai az illesztett görbéhez képest 140 °C esetén $\pm 24,8\%$ -ra, 120 °C esetén $\pm 26,5\%$ -ra adódnak.

A húzószilárdság vizsgálatakor számított kis korrelációs együtthatóból látható, hogy a szilárdság a préselési nyomás (ill. befektetett fajlagos préselési munka) mellett mástól is, nevezetesen az adott tabletta anyagi összetételétől függ.

5.22. táblázat: A húzószilárdság-befektetett fajlagos munka kapcsolata

Hőmérséklet	Illesztett görbe	
120 °C	$\sigma_h = 0,7668 \ln(w) + 0,2631$	$R^2 = 0,4616$ $\sigma = 0,290$ $V_s = 14,36\%$
140 °C	$\sigma_h = 1,1137 \ln(w) + 0,3041$	$R^2 = 0,4681$ $\sigma = 0,480$ $V_s = 16,19\%$

A hulladékból készült tabletták húzószilárdsága egy nagyságrenddel meghaladja a SiC-ből készült tablettákét. A hasonló anyagi tulajdonságokkal rendelkező újságpapír és keverékei esetén nagy nyomáson elérhető a 3 MPa-os húzószilárdság, melyet a hulladékból készült tabletták esetén mértem.

5.2.6 Megállapítások

MBH kísérletből származó >75 mm-es hulladék frakcióból különböző préselési nyomásokon és két hőmérsékleten készültek kísérleti tabletták.

- Megállapítható, hogy a brikettálás csak adott hőmérsékleten (120 °C) ill. a fölött volt sikeres. A tabletták sűrűségének ill. húzószilárdságának kapcsolata a préselési

nyomással nagy szórást mutat, összefüggéssel gyakorlatilag nem, ellenben (az illesztett görbékhez igazodó) sávokkal leírhatók. A minta anyagi összetétel elemzéséből látható, hogy közel 50 %-ban tartalmaz műanyagot. Ilyen szemcseméretűre aprított minta és dugattyú átmérő esetén (az ipari alkalmazás során sincsen ez másként) nem biztosítható, hogy minden tabletta összetétele azonos legyen, különös tekintettel arra, hogy a műanyag frakció is több eltérő tulajdonságú (pl.: sűrűség, lágyuláspont) műanyagból áll. Bizonyos műanyagok 140 °C-on lágyulhatnak (pl.: PP, PS), ez által jó kötőanyaggá válva növelik a tabletta sűrűségét ill. szilárdságát. A tabletta paraméterei ebből következően nagyban függnék attól, hogy az ilyen alkotókból mennyit tartalmaz az adott tabletta. A szórás csökkenthető adott mintára azzal, hogy csökkentjük a szemcseméretét, de a gyakorlatban ezt a költséget a folyamat nem viseli el. Az alapanyag (települési szilárd hulladék nagy fűtőértékű frakciója MBH kezelés után) összetétele is változik időben, a műanyag tartalom 30...60 % között is változhat, ami méginkább nagyobb szórást eredményezhet a brikettálás során. Az ilyen brikettek minőségével szemben nem támasztanak nagy elvárásokat (cementgyár, pirolízis üzem, stb.). A legfőbb szempont a felhasználás során a megfelelő adagolhatóság, nem szempont az, hogy minden egyes tabletta adott szilárdságot elérjen.

- Meghatároztam a tablettasűrűségek alkalmazott préselési nyomástól való függőségét, leírására 120 °C-on a Johanson-féle függvény ill. az ahhoz rendelt sávok alkalmasak. A 140 °C hoz tartozó nagyobb κ érték jelzi, hogy a nagyobb hőmérsékleten a préselési nyomás növelését kisebb sűrűségváltozás kíséri. Ez azzal magyarázható, hogy a nagyobb hőmérsékleten a hulladék bizonyos összetevői megolvadnak, így eleve nagyobb abszolút sűrűségek érhetők el, a sűrűség további növelése azonban jelentősebb préselési nyomásnövekedést igényel.
- Meghatároztam a befektetett munka és az alkalmazott préselési nyomás közötti kapcsolatot 120 ill. 140 °C-on, melyet lineáris összefüggés köré illesztett sáv ír le. Megállapítható, hogy a préselési nyomás növelésével nőtt a befektetett fajlagos munka. 150 MPa préselési nyomáson a szemcsés, rideg SiC esetén 5,7 J/g, újságpapír ill. keverékei esetén 24,95...36,13 J/g. Anyagtulajdonságokban az újságpapír keverékeihez hasonlítható leginkább a hulladék (maga is tartalmaz papírt), a fajlagos préselési munka jelentősen kisebb annál (8,6...12,0 J/g), amelyet az anyag préselési hőmérsékleten történő lágyulásával magyarázható.
- A tabletták húzószilárdsága ill. a préselés-nyomás közti összefüggés mindkét hőmérsékleten logaritmikus görbe körüli sávokkal írható le. A hasonló anyagi tulajdonságokkal bíró újságpapír ill. annak keverékeiből nagy préselési nyomáson (250 MPa) készíthető 2,43...3,2 MPa (hulladékéval azonos) húzószilárdságú tabletta. A hulladékból 140 °C-on készült tabletták szilárdsága már 50 MPa nyomáson is meghaladta a 2 MPa-t, szemben az újságpapírral ($p=50$ MPa esetén $\sigma_h=0,69$ MPa), ez a nagy hőmérsékleten kötőanyaggá váló összetevőknek köszönhető. A SiC-ből készült tabletták húzószilárdsága egy nagyságrenddel elmarad a hulladékból készültétől.

5.3 Shredderüzemi ciklonpor brikettálhatóságának vizsgálata

Magyarországon évente kb. 120-130 ezer roncsautó keletkezik. A kézi előbontást követően a roncsautókat shredderezésnek vetik alá, a fém frakció feltárásának és kinyerésének érdekében. A shredderből elszívott port ciklonra vezetik, aminek a durva terméke a ciklonpor. Ennek maximális szemcsemérete a 100 mm-t is meghaladhatja, összetételét

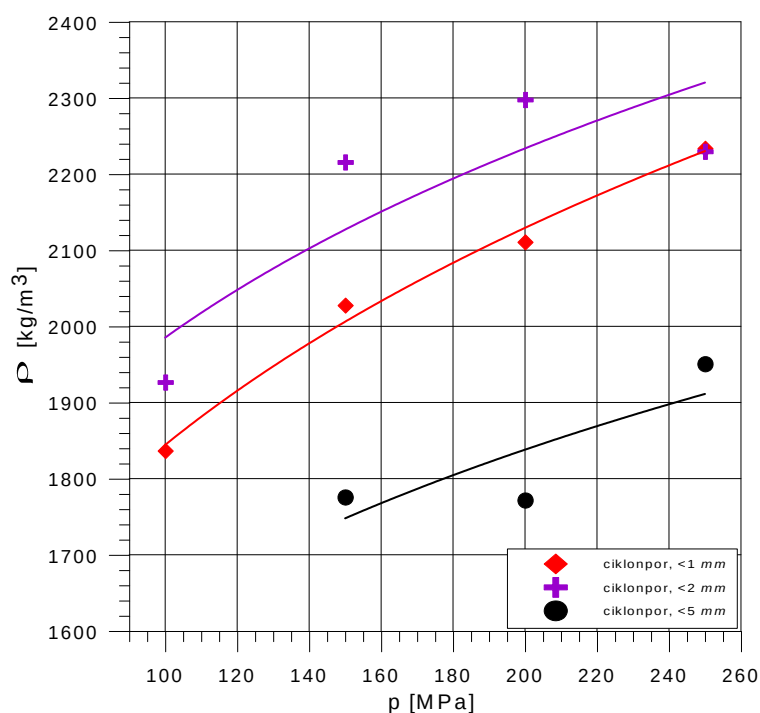
tekintve pedig rendkívül heterogén és időben változó. Jelenleg ez az anyag szinte kizárólag depóniákra kerül. A Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetben kutatómunka (Tech_08_A4/2-2008-0142, RECYTECH) folyik a shredderüzemi maradékanyagok – így a ciklonpor – hasznosíthatóságára vonatkozóan. A ciklonpor finom frakciója – amellyel a vizsgálataim végeztem – lerakásra illetve tüzelőanyag előállításra kerülhet (termokatalitikus eljárás). Mindkét esetben szükséges lehet a ciklonpor ezen frakciójának brikettálása a könnyebb kezelhetőség (jobb szállíthatóság és adagolás, kiporzás csökkentése, lerakási térfogat minimalizálás, stb.) miatt.

5.3.1 Minták

A mintavétel három alkalommal történt 2010. 07. 13. és 26. között a fehérvárcsurgói üzemben az anyagi összetétel változásának figyelemmel kísérése érdekében, ugyanis a ciklonpor összetételét nagyban befolyásolja a shredderre feladott anyag minősége. A por szemcseméreteloszlását meghatároztuk. Szítálás folyamán megfigyelhető volt, hogy, a durvább frakciókban az éghető anyagok dúsulnak fel, míg a finomabb frakciókban a fémek, fém oxidok, illetve festékdarabkák jelenléte a jellemző. A többszöri mintavétel során az x_{50} értéke 3...5 mm, az x_{80} 16...30 mm között változott. A vizsgálatok során a finomabb frakciókat mágnesesen dúsítottuk (<1 ill. <5 mm), a brikettálási kísérletekhez azonban az eredeti ciklonpor < 1, <2 ill. <5 mm-es frakcióit használtam. Ezen frakciók nedvességtartalmai rendre: 1,86 %, 2,15 % és 2,27 %.

5.3.2 Préselési nyomás-tabletta sűrűség kapcsolata

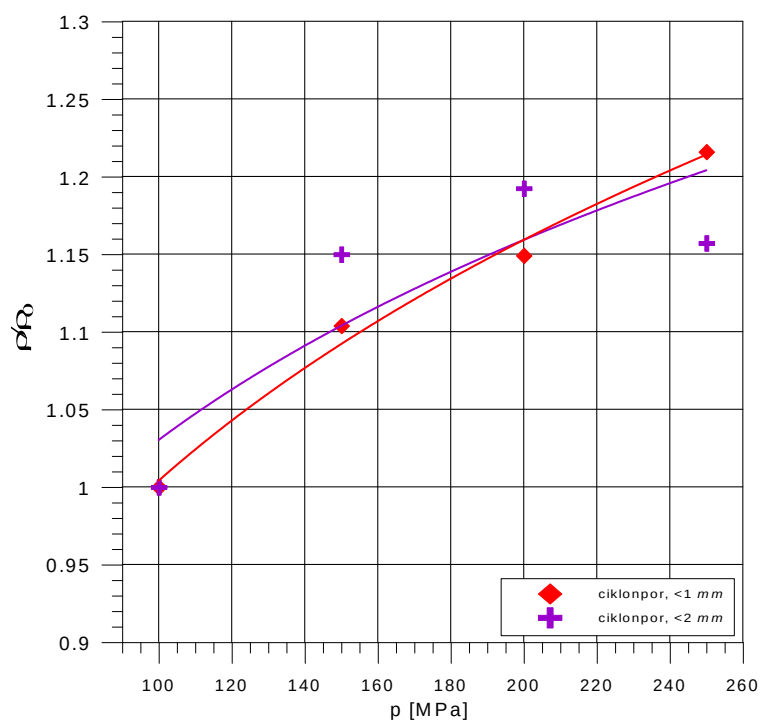
A vizsgálatok során a <1, <2 és <5 mm-es frakciókat tablettáztam. A különböző préselési nyomásokon kialakuló tablettasűrűségek láthatók az ábrán. Minden esetben három tablettát készítettem, azok sűrűségét átlagoltam. Az illesztett Johanson-féle hatványfüggvények egyenletei az 5.23. táblázatban találhatók. A < 5 mm-es frakcióból készült tabletták szilárdsága nem volt kielégítő, ezért a további eredményeket nem közlöm.



5.19. ábra. Tabletta sűrűség a préselési nyomás függvényében

5.23. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Szemcseméret frakció	Illesztett görbe	
<1 mm	$\rho = 709,86 p^{0,207329}$ $\kappa=4,82$	$R^2 = 0,989606$ $\sigma = 17,19$ $V_s = 0,84 \%$
<2 mm	$\rho = 906,90 p^{0,170125}$ $\kappa=5,88$	$R^2 = 0,733319$ $\sigma = 88,63$ $V_s = 4,09 \%$
<5 mm	$\rho = 486,33 p^{0,174923}$ $\kappa=5,72$	$R^2 = 0,665287$ $\sigma = 81,58$ $V_s = 4,45 \%$



5.20. ábra. Tabletta relatív sűrűség a préselési nyomás függvényében

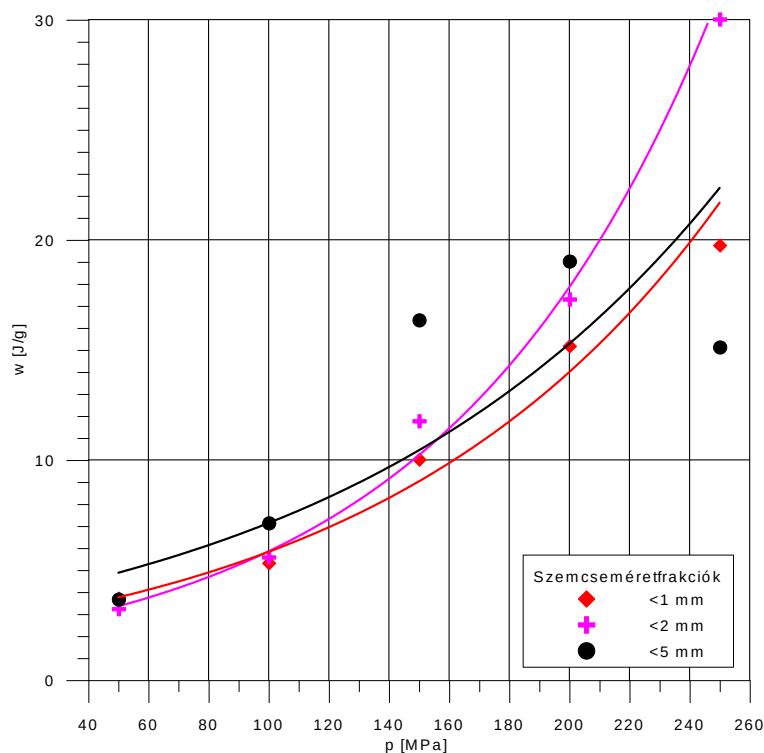
5.24. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Szemcseméret frakció	Illesztett görbe	
<1 mm	$\rho = 0,3864 p^{0,207329}$ $\kappa=4,82$	$R^2 = 0,9896$ $\sigma = 0,0094$ $V_s = 0,84 \%$
<2 mm	$\rho = 0,4707 p^{0,170082}$ $\kappa=5,88$	$R^2 = 0,73309$ $\sigma = 0,0460$ $V_s = 4,09 \%$

A κ értékek szemcsemérettől gyakorlatilag függetlenek: 4,82 ill. 5,88-ra adódtak. Ezek az értékek az eddig vizsgáltak közül gyakorlatilag az újságpapírból és az abból készült keverékekből készül tabletták esetén mért értékekkel egyeznek meg.

5.3.3 Préselési nyomás befektetett munka kapcsolata

A préselési nyomás fajlagos brikettálási munka értékpárookra exponenciális görbét illesztettem. A görbék egyenleteit az 5.25. táblázat tartalmazza.



5.21. ábra. Befektetett fajlagos munka a préselési nyomás függvényében

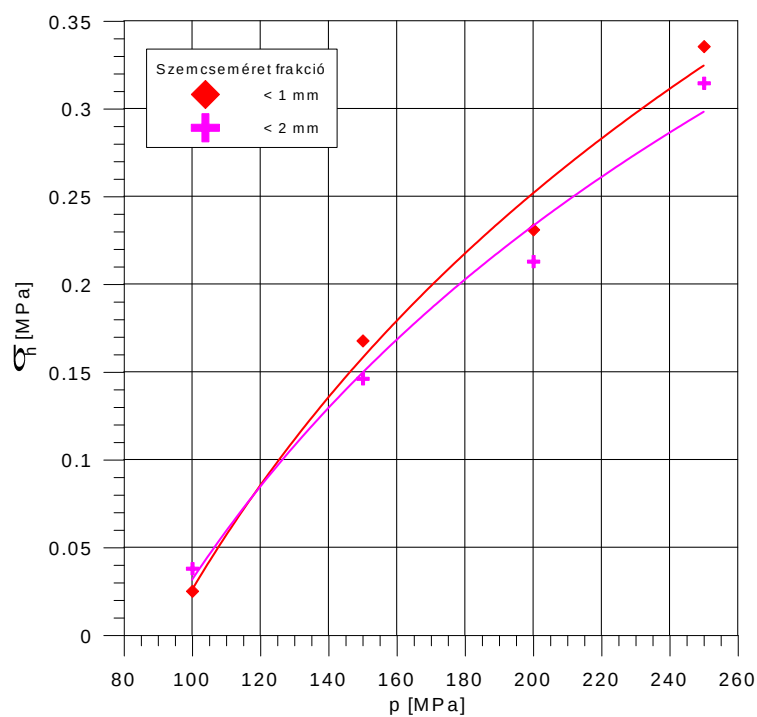
5.25. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Szemcseméret frakció	Illesztett görbe	
<1 mm	$\ln(w) = 0,008764 p + 0,8856$	$R^2 = 0,9824$ $\sigma = 1,26$ $V_s = 11,68 \%$
<2 mm	$\ln(w) = 0,011157 p + 0,6505$	$R^2 = 0,9919$ $\sigma = 1,01$ $V_s = 7,45 \%$
<5 mm	$\ln(w) = 0,007615 p + 1,2033$	$R^2 = 0,7506$ $\sigma = 5,07$ $V_s = 41,31 \%$

A préselési nyomás növelésével a befektetett munka is nőtt, szemcsemérettől és nyomástól függően 3,2...30 J/g. Nagyobb szemcseméret gyakorlatilag nagyobb befektetett fajlagos munkát eredményezett azonos préselési nyomáson.

5.3.4 Préselési nyomás húzószilárdság kapcsolata

Az elkészített tabletták húzószilárdságát vizsgáltam a <1 ill. <2 mm-es frakciók esetén. Az eredmények az 5.22. ábrán, ill. 5.26. táblázatban láthatók, az illesztett függvények logaritmikusak. A kisebb szemcseméret (<1 mm) nagyobb húzószilárdságot eredményezett. A σ_h értékek nagyságrendileg a SiC esetén mértékekkel egyeznek meg.

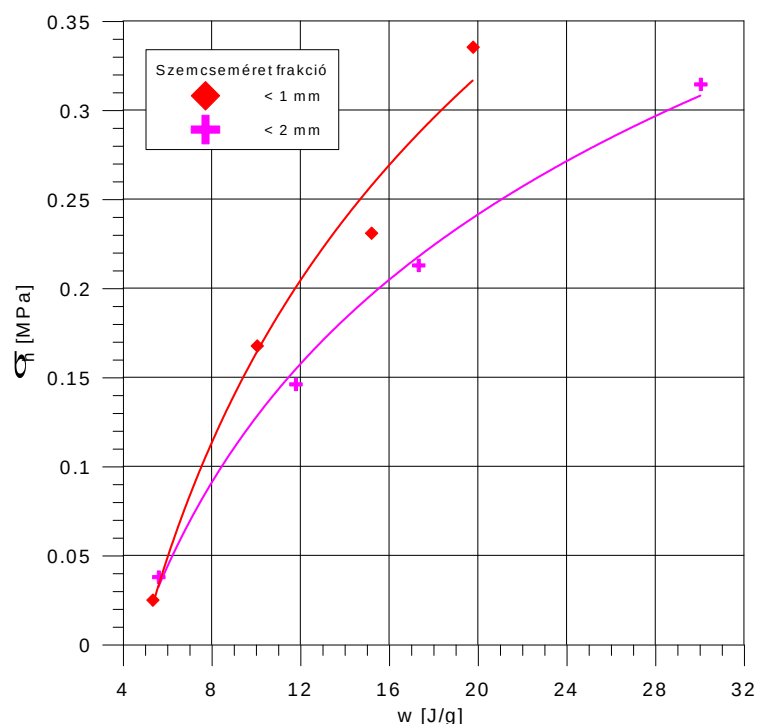


5.22. ábra. Húzószilárdság a préselési nyomás függvényében

5.26. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Logaritmikus (Higuchi)		
Szemcseméret-frakció	Illesztett görbe	
<1 mm	$\sigma_h = 0,3260 \ln(p) - 1,4756$	$R^2 = 0,987285$ $\sigma = 0,015$ $V_s = 7,72 \%$
<2 mm	$\sigma_h = 0,2910 \ln(p) - 1,3088$	$R^2 = 0,981942$ $\sigma = 0,016$ $V_s = 8,77 \%$

Ábrázoltam a húzószilárdságot a befektetett fajlagos munka függvényében (5.23. ábra).



5.23. ábra. Húzószilárdság a befektetett fajlagos munka függvényében

5.27. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Logaritmus		
Szemcseméret-frakció	Illesztett görbe	
<1 mm	$\sigma_h = 0,224859 \ln(w) - 0,3544$	$R^2 = 0,978788$ $\sigma = 0,019$ $V_s = 9,95 \%$
<2 mm	$\sigma_h = 0,164234 \ln(w) - 0,2507$	$R^2 = 0,995932$ $\sigma = 0,007$ $V_s = 4,16 \%$

5.3.5 Értékelés

Az alábbi megállapítások tehetők:

- A préselési nyomás emelésével minden szemcseméret frakció esetén a sűrűség nőtt. A legnagyobb sűrűséget a <2 mm-es frakcióval tudtuk előállítani. <2 ill. <5 mm-es frakció esetében az 1 mm frakció esetén fennálló összefüggéshez (Johanson-féle hatványfüggvény) képest jelentősebb relatív szórás mutatkozott (4,09 % ill. 4,45 %), ami a minta heterogén összetételének, és a nagyobb szemcseméret-tartományban előforduló vezető szálaknak, rugalmas anyagoknak (szivacs, PUR-hab darabok stb.) köszönhető. A <5 mm-es frakcióból készült tabletták szilárdsága nem volt kielégítő. A κ értékek szemcsemérettől gyakorlatilag függetlenek, az újságpapírból és az abból készült keverékekből készül tabletták esetén mért értékekkel egyeznek meg.
- A befektetett munka-húzószilárdság értékpárok logaritmusos összefüggéssel írható le, nagyobb szemcsemérethez nagyobb befektetett munka szükséges.

- A σ_h a < 1 mm ciklonporból készült tabletták esetén meghaladta a nagyobb szemcseméretű alapanyagból készült tablettákét. A húzószilárdság abszolút értékei az SiC tablettáéival egy nagyságrendbe esnek, feltehetően azért, mert sok rideg, szemcsés anyagot tartalmaz a ciklonpor e frakciója.

5.4 Brikettálási kísérletek komposztált szennyvíziszappal

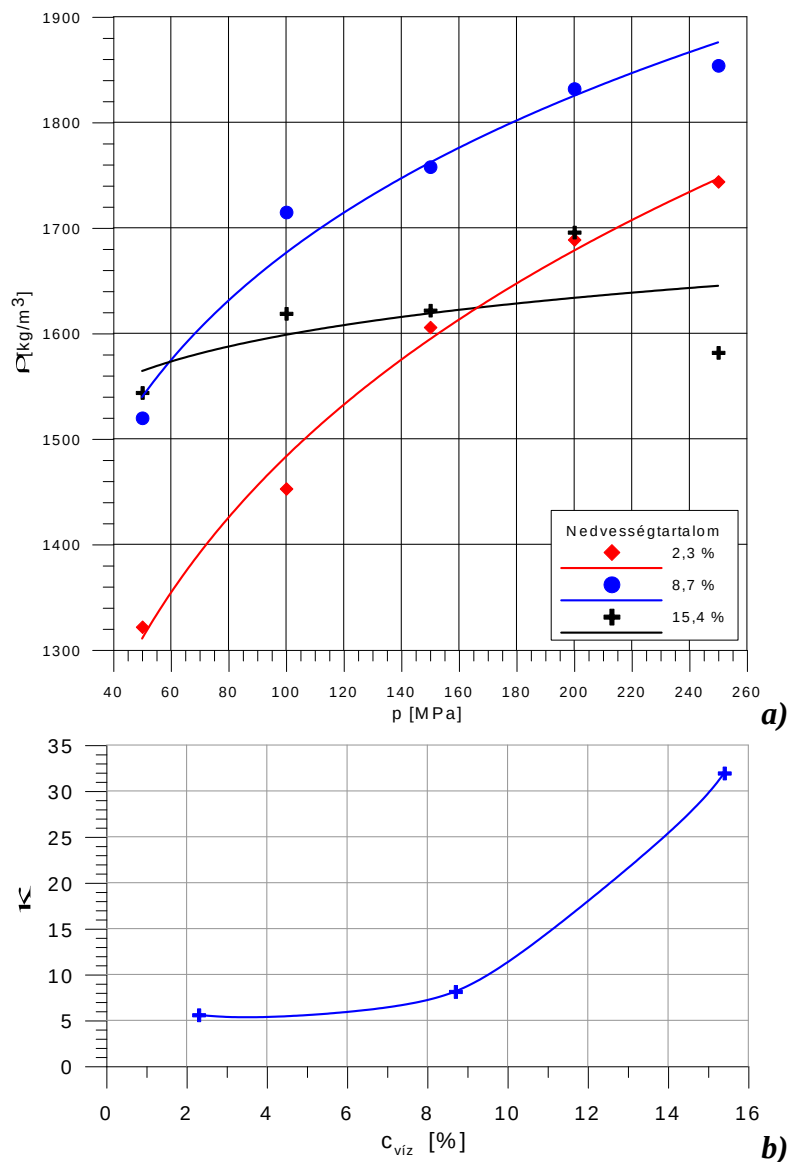
A kommunális szennyvíztisztítás során nagy mennyiségű szennyvíziszap keletkezik, melynek elhelyezése, hasznosítása szükségszerű. Nagy szervesanyag tartalma miatt megfelelő kezelés után (pl. komposztálás) elégethető, tüzelőanyag állítható elő belőle. A tüzelőanyag kezelhetőségének javítása érdekében célszerű a további felhasználás előtt agglomerálni. Az AVE Miskolc kft. bocsátott rendelkezésemre a Hejőpapi I telepükön komposztált szennyvíziszapot a brikettálhatósági kísérletek elvégzéséhez. Az így kapott szennyvíziszapból a kavicsok eltávolítása, majd kalapácsos törővel történő aprítást követően < 2 ill. < 5 mm-es frakciók kerültek előállításra [27]. Célom a brikettálhatóság szempontjából megengedhető maximális nedvességtartalom meghatározása, így minimalizálható a szárításba fektetett energia.

5.4.1 Préselési nyomás sűrűség kapcsolata

A kísérletek során < 2 mm és < 5 mm-re aprított alapanyagból készültek tabletták a dugattyús prés segítségével, 5 különböző nyomáson, minden nyomáson legalább 3 db tablettát. A kísérleti tabletták < 2 mm szemcseméret esetén: 2,3 %, 8,7 %, 15,4 % és 28,9 %-os nedvességtartalmú alapanyagból készültek. A préselési nyomás 50, 100, 150, 200, 250 MPa volt, a dugattyúsebesség itt is 20 mm/s, a megfelelő halmazsűrűség elérése érdekében a tabletták 2 s-ig a beállított maximális nyomás alatt voltak. Ebben az esetben is 10 g anyagból készült egy tablettát. A tabletták sűrűség mérésekor a 28,9 % és a 30,1 % nedvességtartalmú briketteknel az volt megfigyelhető, hogy a magas nedvességtartalom miatt a tabletták nem álltak össze teljesen, préselés közben nedvesség távozott belőlük, repedések keletkeztek rajtuk a préselés után, így a sűrűség pontos meghatározása nem volt lehetséges, ahogyan azt az 5.28. táblázatban kapott értékek szórása is mutatja, nem ad pontos és használható értéket. Ezeket az adatokat a további diagramokban nem használtam fel. A pontokra Johanson-féle hatványfüggvényt illesztettem.

5.28. táblázat. Tabletták sűrűségei és relatív sűrűségei (zárójelben) különböző nedvességtartalmak esetén

Préselési nyomás [MPa]	Nedvességtartalom [%]			
	2,3	8,7	15,4	28,9
50	1322 kg/m ³ (1)	1520 kg/m ³ (1)	1544 kg/m ³ (1)	1381 kg/m ³
100	1453 kg/m ³ (1,0991)	1715 kg/m ³ (1,1283)	1619 kg/m ³ (1,0486)	1380 kg/m ³
150	1606 kg/m ³ (1,2148)	1758 kg/m ³ (1,1566)	1622 kg/m ³ (1,0505)	1263 kg/m ³
200	1689 kg/m ³ (1,2776)	1832 kg/m ³ (1,2053)	1696 kg/m ³ (1,0984)	1427 kg/m ³
250	1744 kg/m ³ (1,3192)	1854 kg/m ³ (1,2197)	1582 kg/m ³ (1,0246)	1384 kg/m ³



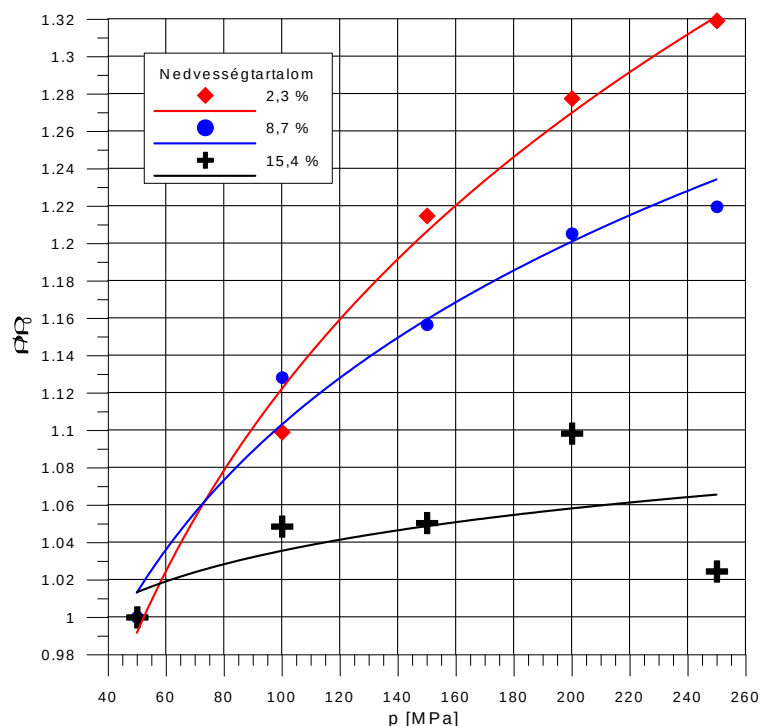
5.24. ábra.

- a) Tabletta sűrűségek a préselési nyomás függvényében komposztált szennyvíziszap esetén
 b) Kompresszibilitási tényező a nedvességtartalom ($c_{\text{víz}}$) függvényében

5.29 táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Johanson		
Nedvességtartalom [%]	Illesztett görbe	
2,3	$\rho = 652,3461 p^{0,178364}$ $\kappa=5,61$	$R^2 = 0,988636$ $\sigma = 17,97$ $V_s = 1,15 \%$
8,7	$\rho = 952,8136 p^{0,122671}$ $\kappa=8,15$	$R^2 = 0,966575$ $\sigma = 22,54$ $V_s = 1,30 \%$
15,4	$\rho = 1384,1046 p^{0,031277}$ $\kappa=31,97$	$R^2 = 0,326016$ $\sigma = 45,54$ $V_s = 2,82 \%$

A relatív sűrűségeket az 5.25. ábra mutatja.



5.25. ábra. Tabletta relatív sűrűségek a préselési nyomás függvényében komposztált szennyvíziszap esetén

5.30 táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Johanson		
Nedvességtartalom [%]	Illesztett görbe	
2,3	$\rho/\rho_0 = 0,493472 p^{0,178355}$ $\kappa=5,61$	$R^2 = 0,988647$ $\sigma = 0,014$ $V_s = 1,15 \%$
8,7	$\rho/\rho_0 = 0,626867 p^{0,122666}$ $\kappa=8,15$	$R^2 = 0,966523$ $\sigma = 0,015$ $V_s = 1,30 \%$
15,4	$\rho/\rho_0 = 0,896524 p^{0,031256}$ $\kappa=31,99$	$R^2 = 0,325837$ $\sigma = 0,030$ $V_s = 2,82 \%$

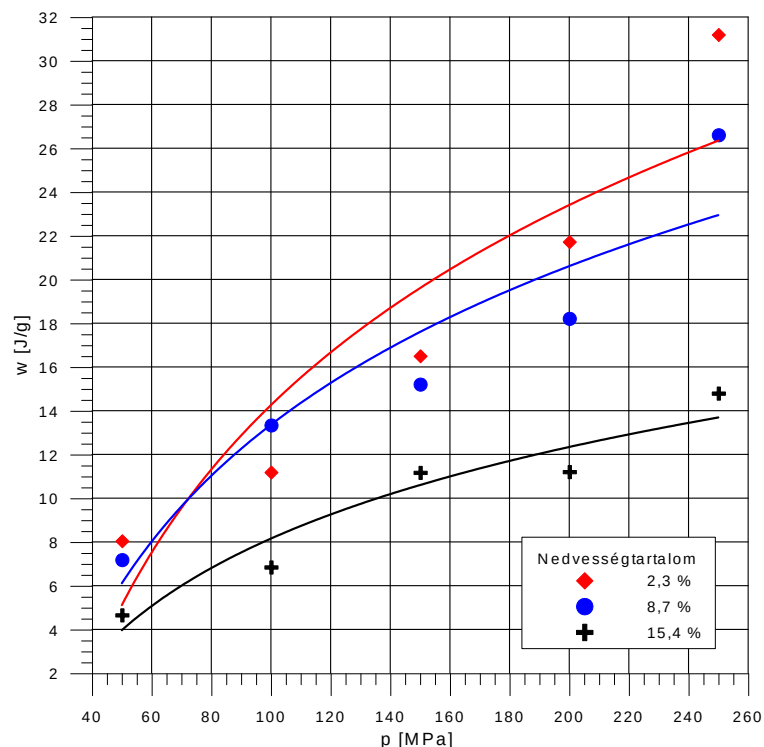
A kapott κ értékek jelentősen függenek a nedvességtartalomtól (5.24. ábra/b). 2,3 % nedvesség esetén az újságpapír, ill. ciklonpor esetén mért értékekkel azonos, 15,4 % nedvesség esetén meghaladja a SiC esetén mért értékeket is.

5.4.2 Brikettálási munka vizsgálata

Az préselés során felvett erő-elmozdulás értékpárookra segédfüggvényt illesztve meghatározható a görbe alatti terület, melyből a befektetett munka számítható.

5.31. táblázat. Fajlagos brikettálási munka különböző nedvességtartalmak esetén

Préselési nyomás	Nedvességtartalom [%]			
	2,3	8,7	15,4	28,9
50 MPa	8,1 J/g	7,2 J/g	4,7 J/g	3,0 J/g
100 MPa	11,2 J/g	13,4 J/g	6,9 J/g	5,1 J/g
150 MPa	16,5 J/g	15,2 J/g	11,2 J/g	5,4 J/g
200 MPa	21,7 J/g	18,2 J/g	11,2 J/g	11,9 J/g
250 MPa	31,2 J/g	26,6 J/g	14,8 J/g	20,4 J/g



5.26. ábra. Fajlagos brikettálási munka a préselési nyomás függvényében

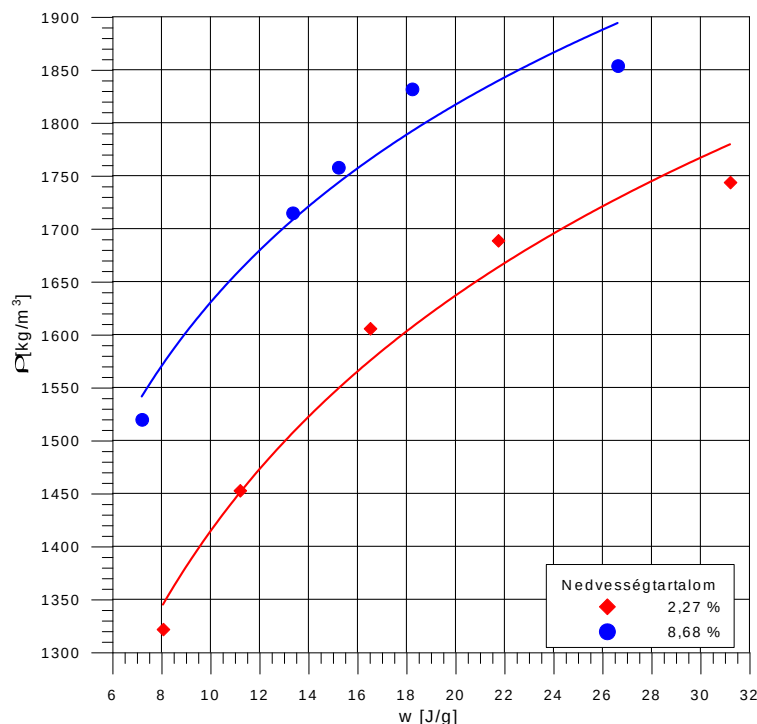
5.32. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Logaritmus		
Nedvességtartalom [%]	Illesztett görbe	
2,3	$w = 13,1946 \ln(p) - 46,51$	$R^2 = 0,83895$ $\sigma = 3,69$ $V_s = 20,78 \%$
8,7	$w = 10,46 \ln(p) - 34,81$	$R^2 = 0,871592$ $\sigma = 2,50$ $V_s = 15,49 \%$
15,4	$w = 6,041 \ln(p) - 19,67$	$R^2 = 0,921583$ $\sigma = 1,06$ $V_s = 10,82 \%$

A pontokra logaritmusos görbét illesztettem. A 15,4 % nedvességtartalmú mintánál 50 MPa nyomást alkalmazva 46,7 J munkát kell befektetnem, hogy egy 10 g tömegű tabletta elkészüljön, míg ugyanezt a nyomást alkalmazva a 2,3 % nedvességtartalmú mintánál már 80,6 J befektetett munkára volt szükség. ahogyan az várható volt, a nyomás növekedésével

a befektetett tablettázási munka növekedett. A víz a préselés során a szemcsék közt fellépő súrlódást csökkenti (kenőanyag funkció).

Ábrázoltam a 2,3 ill. 8,7 % nedvességtartalom esetén a befektetett brikettálási munka függvényében a sűrűséget.



5.27. ábra. Tabletta sűrűség a fajlagos brikettálási munka a függvényében

5.33. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Logaritmikus		
Nedvességtartalom [%]	Illesztett görbe	
2,3	$\rho = 321,02 \ln(w) + 675,06$	$R^2 = 0,971841$ $\sigma = 26,63$ $V_s = 1,90 \%$
8,7	$\rho = 269,54 \ln(w) + 1009,54$	$R^2 = 0,944422$ $\sigma = 29,51$ $V_s = 1,70 \%$

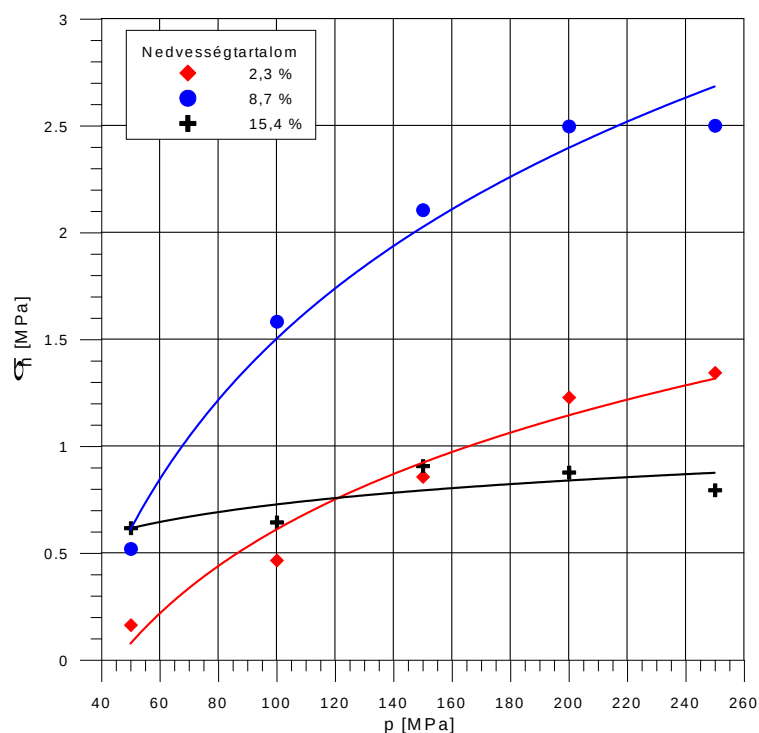
Mindkét nedvességtartalmú brikettnél növekvő befektetett munkával nő a tabletta sűrűsége is. A pontokra logaritmikus görbét illesztettem. Az 5.27. ábra alapján arra lehet következtetni, hogy nagyobb nedvességtartalomnál a szemcsék közötti hézagokban több víz található, ezért tartozik nagyobb sűrűség a nagyobb nedvességtartalmú tablettákhoz.

5.4.3 Húzószilárdság vizsgálata

A brikettek húzószilárdságának megállapítása a 3. fejezetben bemutatott hidraulikus törőgéppel történt, a berendezés az összenyomó erőt az elmozdulás függvényében rögzítette. A diagramokról a maximális törőerőket leolvastva, és a három értéket átlagolva kaptam meg a húzószilárdság értékeket, melyeket az 5.34. táblázat, a préselési nyomás húzószilárdság kapcsolatát az 5.28. ábra és az 5.35. táblázat mutatják.

5.34. táblázat. Húzószilárdság különböző nedvességtartalmak esetén

Préselési nyomás	Nedvességtartalom		
	2,3 %	8,7 %	15,4 %
50 MPa	0,1643 MPa	0,5209 MPa	0,6182 MPa
100 MPa	0,4669 MPa	1,5841 MPa	0,6452 MPa
150 MPa	0,8581 MPa	2,1061 MPa	0,9085 MPa
200 MPa	1,2294 MPa	2,4979 MPa	0,8784 MPa
250 MPa	1,3450 MPa	2,5011 MPa	0,7953 MPa



5.28. ábra. Húzószilárdság a préselési nyomás függvényében.

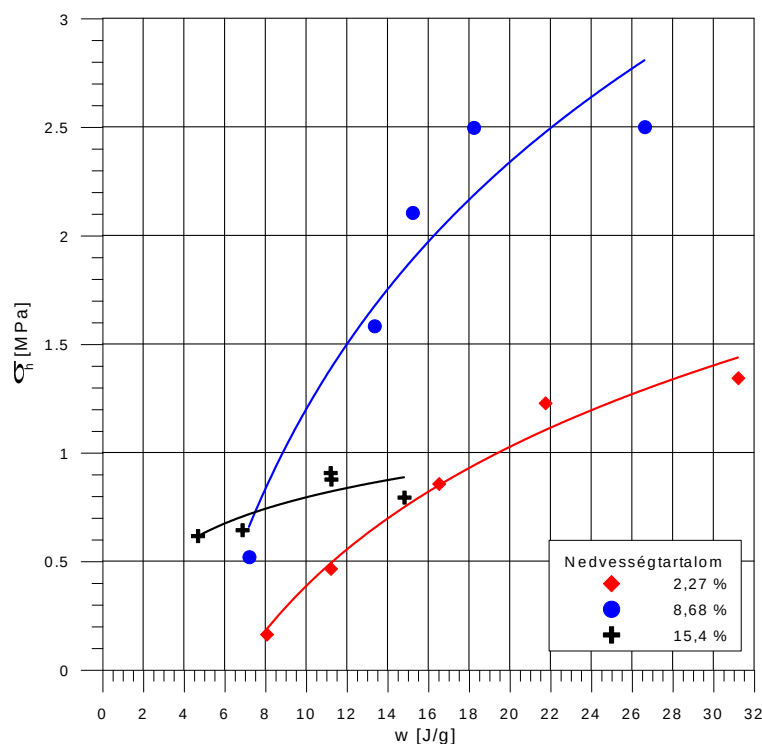
5.35. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

Logaritmikus		
Nedvességtartalom [%]	Illesztett görbe	
2,3	$\sigma_h = 0,7703 \ln(p) - 2,9381$	$R^2 = 0,959421$ $\sigma = 0,101$ $V_s = 12,39 \%$
8,7	$\sigma_h = 1,2884 \ln(p) - 4,4317$	$R^2 = 0,976452$ $\sigma = 0,119$ $V_s = 6,48 \%$
15,4	$\sigma_h = 0,1615 \ln(p) - 0,0172$	$R^2 = 0,600136$ $\sigma = 0,084$ $V_s = 10,89 \%$

Az ábráról leolvasható, hogy 8,7 % nedvességtartalmú brikett szilárdabbnak bizonyul, mint a 2,3 % nedvességtartalmú brikett, mert a nedvességtartalom nagyrészt folyadék-híd formájában jelenik meg a szemcsék között, ezáltal is elősegítve a kötést. A 8,7 % nedvességtartalom esetén több szemcse közt épül ki folyadék-híd, ezért eredményez

nagyobb szilárdságot a 2,3 % nedvességtartalmú tablettáknál. 15,4 % nedvességtartalom esetén a víz egy része kitölti a szemcsék közti teret, nem képez folyadékhidat, a szilárdság romlik.

Az 5.29. ábra mutatja a húzószilárdság változását a befektetett munka növelésével.



5.29. ábra. Húzószilárdság a fajlagos préselési munka függvényében.

5.36. táblázat. Illesztett görbék egyenletei

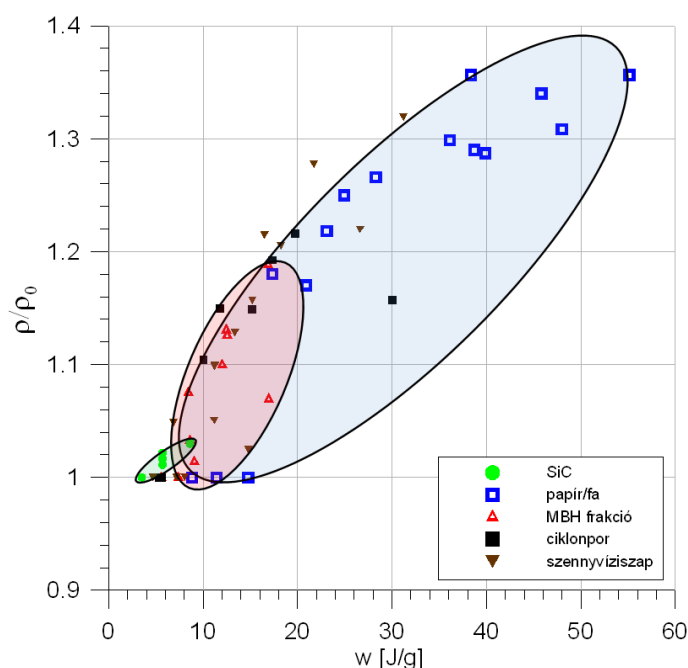
Logaritmikus		
Nedvességtartalom [%]	Illesztett görbe	
2,3	$\sigma_h = 0,9249 \ln(w) - 1,745$	$R^2 = 0,974389$ $\sigma = 0,081$ $V_s = 9,95 \%$
8,7	$\sigma_h = 1,6426 \ln(w) - 2,5838$	$R^2 = 0,903239$ $\sigma = 0,250$ $V_s = 13,57 \%$
15,4	$\sigma_h = 0,236 \ln(w) + 0,2502$	$R^2 = 0,672762$ $\sigma = 0,076$ $V_s = 9,88 \%$

Megállapítható, hogy a befektetett munka növelésével nagyobb húzószilárdságú brikettek állíthatók elő.

6 A különböző hulladékok brikettálhatóságának összehasonlítása

A vizsgált hulladékok brikettálás során fellépő viselkedésének jobb összehasonlíthatóságának érdekében diagramokon ábrázolom az összes hulladék relatív sűrűségét és húzószilárdságát a befektetett fajlagos munka függvényében.

A 6.1. ábra tartalmazza a befektetett fajlagos préselési munka függvényében a relatív sűrűségeket az összes vizsgált hulladék esetén. A különböző vizsgált hulladékok jól elkülöníthető tartományokban helyezkednek el.



6.1. ábra. Relatív sűrűségek a befektetett préselési munka függvényében

A κ értékei (6.1. táblázat) a rideg, szemcsés SiC esetén (60 % diszperzió a kötőanyagban) 22,35...23,7 közt adódtak, elegendő kötőanyag mellett ($c_k > 4$ %) gyakorlatilag függetlenek a c_k -tól.

A κ értékei újságpapír és keverékei esetén 5,14...5,87 közt változnak. Az alacsonyabb κ esetén adott préselési nyomás érték változást nagyobb sűrűségnövekedés követ, az újságpapír keverékek esetén a szemcsék alakváltozása miatt érhető el nagyobb sűrűségnövekedés, szemben a rideg, szemcsés SiC-vel.

Az MBH technológiából származó hulladék κ értékei 11,5 ill. 15,7 közt változnak a préselési hőmérséklet függvényében. A hulladék préselése során meghatározott κ értékek a rideg szemcsés SiC-től jelentősen elmaradnak, a papír, és az abból képzett keverékek préselésekor fellépő értékeket meghaladják.

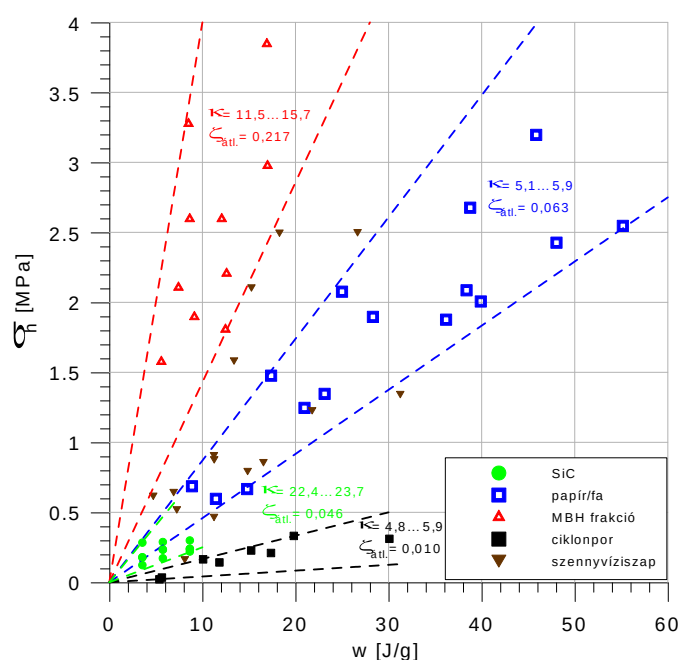
A ciklonpor esetén κ értékek szemcsemérettől gyakorlatilag függetlenek: 4,8 (<1 mm) ill. 5,9-re (<2 mm) adódtak. Ezek az értékek az eddig vizsgáltak közül gyakorlatilag az újságpapírból és az abból készült keverékekből készül tabletták esetén mért értékekkel egyeznek meg.

Komposztált szennyvíziszap esetén a kapott κ értékek jelentősen függenek a nedvességtartalomtól. 2,3 % nedvesség esetén az újságpapír ill. ciklonpor esetén mért értékekkel azonos, 15,4 % nedvesség esetén meghaladja a SiC esetén mért értékeket is.

Az anyagok vizsgálata során kapott σ_h - w értékpárokat pontfelhőként ábrázolva, az anyagok az origóból kiinduló egyenesekkel csoportosíthatók jól (6.2. ábra). Bevezetem a húzószilárdság préselési munka arányát:

$$\zeta = (\sigma_h/w),$$

amely a tartomány határoló egyenesek iránytangense (6.1. táblázat) és jellemző a különböző anyag típusokra. Az arány kifejezi az egységnyi fajlagos munkával elérhető húzószilárdság értéket, minél nagyobb, annál nagyobb szilárdságú brikett gyártható azonos befektetett munkával adott körülmények (c_k , T , stb.) közt.



6.2. ábra. Húzószilárdság a befektetett préselési munka függvényében, és a tartományokra jellemző κ és átlagos ζ értékek

6.1. táblázat: A vizsgált hulladékok anyagjellemzői

Anyag neve	κ	σ_h/w [MPa g J ⁻¹]
szilícium karbid	22,4...23,7	0,025...0,081
újságpapír	5,1...5,9	0,046...0,087
MBH frakció	11,5...15,7	0,143...0,400
ciklonpor	4,8...5,9	0,004...0,017
szennyvíziszap	5,61 ($n=2,3$ %) 8,15 ($n=8,7$ %) 31,99 ($n=15,4$ %)	0,021...0,143

Az SiC-ről és a hulladékról elmondható, hogy a használt préselési nyomás tartományban kis fajlagos munkát igényel a brikettálásuk, azonban a hulladék esetén ez jelentősen nagyobb szilárdságot eredményez.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

7.1 Szilícium karbid brikettálása

Az általánosan használt vízbázisú polimerek közül (diszperziós falfesték, csemperagasztó, faragasztó) az előzetes vizsgálatok alapján a csemperagasztóból kivont diszperzió bizonyult a leghatékonyabb kötőanyagnak.

Megállapítható, hogy mind 40 mind 60 % polimer-koncentrációjú kötőanyag esetén a kompresszibilitás leírására a Johanson által meghatározott hatványfüggvény, és a Walker által felírt összefüggés a vizsgált tartományban alkalmas. Célszerű a széles körben alkalmazható Johanson-összefüggést használni a különböző anyagok brikettálhatóságának összehasonlíthatósága érdekében.

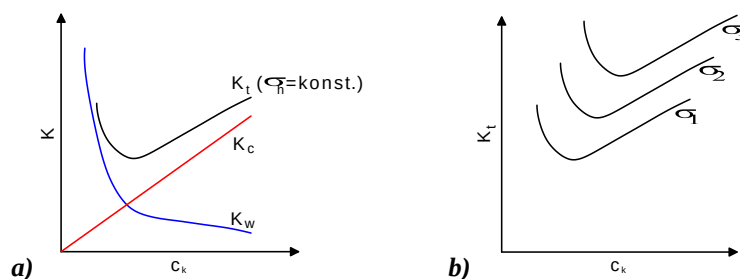
Az azonos préselési nyomáson, ásványos hulladékból polimer kötőanyaggal készült tabletták abszolút és relatív sűrűségei –és ebből következően kompresszibilitási tényezőjük is– egy meghatározott minimális kötőanyagtartalom felett (60 % diszperziótartalom és $c_k > 2\%$ esetén) gyakorlatilag függetlenek a kötőanyag tartalomtól. Megállapítható, hogy a polimer kötőanyaggal készült tabletták préseles hatására azonos módon viselkednek, kompresszibilitásuk azonos tényezőjű Johanson-összefüggéssel ($\kappa = 23,24$ konst.) írható le a kötőanyagtartalomtól függetlenül.

Ábrázoltam a sűrűséget és a húzószilárdságot a befektetett fajlagos munka függvényében. A munka egységesítő szerepet tölt be ebben az ábrázolásmódban, mivel mind az erőt, mind a térfogatcsökkenést magában foglalja.

Megállapítható, hogy mind 40 mind 60 % polimer-koncentrációjú kötőanyag esetén a tömöríthetőség ($\sigma(p)$) leírására a Higuchi által meghatározott logaritmikus függvény alkalmas. A 40 % polimer-koncentrációjú kötőanyag esetén mutatózó nagyobb szórás mutatja, hogy nincs elegendő kötőanyag a rendszerben.

Ásványos hulladékok polimer kötőanyaggal történő brikettálása esetén egy előírt agglomerátum szilárdság többféle módon elérhető, nevezetesen nagyobb munkával és kisebb kötőanyagfelhasználással, és fordítva nagyobb kötőanyag felhasználással kisebb befektetett munkával. Gazdasági szempontból fontos annak a vizsgálata, hogy milyen munkával, milyen kötőanyag tartalommal célszerű előállítani a brikettet. A tervezési módszer az alábbi lépésekben és összefüggésekkel történik. A húzószilárdság: $\sigma_h = f(w, c_k) = a c_k + b$, ahol $a = f(w)$ és $b = f(w)$. Amennyiben ismert az adott berendezés által gazdaságosan bevezethető munka, az a ill. b konstansok meghatározásával felírható adott befektetett munkára a $\sigma_h = f(c_k)$ összefüggés, az elérni kívánt brikettszilárdsághoz szükséges kötőanyagtartalom meghatározható.

A fenti összefüggésekkel végzett szimulációval, valamint a szimulációs alappontokhoz a munka (energia) (K_w) és kötőanyag költség (K_c) megállapításával, ill. összegzésével ($K_t = K_c + K_w$, 4.2 ábra) a költségminimum helye, azaz a kívánt brikettminőség optimális előállítási körülményei meghatározhatók az alábbiak szerint.



4.2. ábra. Költségfüggvények a kötőanyag koncentráció (c_k), a munka (w) ill. σ_h előírt brikettszilárdság függvényében

K költség,
 K_C a kötőanyag költsége,
 K_W a munka költsége és
 K_t a teljes költség.

7.2 Újságpapír brikettálása

A brikettált újságpapír ill. annak fűrészporral és faforgáccsal kevert változatai esetén a kompresszibilitás a Johanson-féle hatványfüggvénnyel írható le legjobban a vizsgált tartományban. A legnagyobb sűrűség tiszta papír esetén érhető el. A κ értékei 5,14...5,87 közt változnak (átlagban $\kappa_{\text{átl}}=5,54$), míg SiC esetén a κ jelentősen nagyobb: a papír, és az abból képzett keverékek esetén a préselési nyomás érték változást nagyobb sűrűségnövekedés követi. A Walker-összefüggés is alkalmazható a jelenség leírására.

Ábrázoltam a relatív sűrűséget is –Johanson szellemében– a préselési nyomás függvényében (5.2. ábra), a kompresszibilitás jobb összehasonlíthatósága érdekében, hiszen a keverék alkotóinak sűrűsége is eltér egymástól. Az újságpapírra és az újságpapír keverékeire az ρ/ρ_0 -p (relatívsűrűség) Johanson-féle hatványfüggvénnyel leírható összefüggés gyakorlatilag megegyezik, ugyanaz az a hatványfüggvény illeszthető.

Tiszta papír esetén a papír szemcsemérete (12 ill. 6 mm-es szitaráccsal üzemelő malom) nem befolyásolta a tabletták sűrűségét.

A tömöríthetőség logaritmikus (Higuchi) és hatvány függvényekkel (Newton és Grant) írható le, legnagyobb húzószilárdság tiszta papír esetén érhető el, a fűrészpor és a faforgács csökkentették a szilárdságot, a fűrészpor kevésbé, mert jobban be tudott épülni a papír mátrixba.

7.3 MBH technológiából származó fűtőanyag brikettálása

A rendkívül inhomogén szilárd települési hulladékból kinyert másodtüzelőanyag, amelynek fő komponensei műanyagok, papír, fa, textil, gumi, 100...140 °C hőmérséklet tartományban, kötőanyag nélkül különböző nyomással (100...250 MPa) végzett brikettálási kísérletei alapján megállapítottam, hogy a vizsgált jellemzőkre vonatkozó függvénykapcsolatok ($\rho^*=f(w)$ és $\sigma_h=f(w)$) nagy szórást mutatnak, összefüggéssel gyakorlatilag csak tendenciaként egy függvénysávval írhatók le.

Megállapítható, hogy a brikettálás csak adott hőmérsékleten (120 °C) ill. a fölött volt sikeres. A tabletták sűrűségének ill. törési szilárdságának kapcsolata a préselési nyomással

nagy szórást mutat, összefüggéssel gyakorlatilag nem írható le, csak tartományokkal. A minta anyagi összetétel elemzéséből látható, hogy közel 50 %-ban tartalmaz műanyagot. Ilyen szemcseméretű minta és dugattyú átmérő esetén (az ipari alkalmazás során sincsen ez másként) nem biztosítható, hogy minden tablettá összetétele azonos legyen, különös tekintettel arra, hogy a műanyag frakció is több eltérő tulajdonságú (pl.: sűrűség, lágyuláspont) műanyagból áll. Bizonyos műanyagok 140 °C-on lágyulhatnak (pl.: PP, PS), ez által jó kötőanyaggá válva növelik a tablettá sűrűségét ill. szilárdságát. A tablettá paraméterei ebből következően nagyban függenek attól, hogy az ilyen alkotókból mennyit tartalmaz az adott tablettá. A szórás csökkenthető adott mintára azzal, hogy csökkentjük a szemcseméretét, de a gyakorlatban ezt a költséget a folyamat nem viseli el. Az alapanyag (települési szilárd hulladék nagy fűtőértékű frakciója MBH kezelés után) összetétele is változik időben, a műanyag tartalom 30...60 % között is változhat, ami méginkább nagyobb szórást eredményezhet a brikettálás során. Az ilyen brikettek minőségével szemben nem támasztanak nagy elvárásokat (cementgyár, pirolízis üzem, stb.)

7.4 Autóshredderüzemi ciklonpor brikettálása

Megállapítható, hogy a préselési nyomás emelésével minden szemcseméret frakció esetén a sűrűség nőtt. A <5 mm-es frakcióból készült tabletták szilárdsága nem volt kielégítő. A legnagyobb sűrűséget a <2 mm-es frakcióval tudtuk előállítani. <2 ill. <5 mm-es frakció esetében az 1 mm frakció esetén felálló összefüggéshez (Johanson-féle hatványfüggvény) képest jelentősebb szórás mutatkozott, ami a minta heterogén összetételének, és a nagyobb szemcseméret-tartományban előforduló vezető szálaknak, rugalmas anyagoknak (szivacs, PUR-hab darabok, stb.) köszönhető. A κ értékek szemcsemérettől gyakorlatilag függetlenek.

A fajlagos préselési munka a nyomás függvényében exponenciális összefüggéssel írható le. Logaritmikus (Higuchi) összefüggés alkalmazható a tömöríthetőségre, és a húzószilárdság – fajlagos munka kapcsolatára. A σ_h a < 1 mm ciklonporból készült tabletták esetén meghaladta a nagyobb szemcseméretű alapanyagból készült tablettákét.

7.5 Komposztált szennyvíziszap brikettálása

Megállapítottam, hogy a kompresszibilitás, ahogy a relatív sűrűség – préselési nyomás összefüggése a Johanson-féle hatványfüggvénnyel írható le a vizsgált tartományban (szobahőmérséklet, különböző neveltség tartalom mellett ($c_{viz}=2,3...29\%$), kötőanyag nélkül 100...250 MPa nyomástartományban).

A fajlagos munka - préselési nyomás, tablettasűrűség – fajlagos munka logaritmikus összefüggéssel írható le.

A tömöríthetőség a Higuchi összefüggéssel (logaritmikus) jellemezhető, ahogy a húzószilárdság – fajlagos munka kapcsolata is.

A 8,7 % nedvességtartalmú brikett szilárdabbnak bizonyul, mint a 2,3 % nedvességtartalmú brikett, mert a nedvességtartalom nagyrészt folyadék-híd formájában jelenik meg a szemcsék között, ezáltal is elősegítve a kötést. A 8,7 % nedvességtartalom esetén több szemcse közt épül ki folyadék-híd, ezért eredményez nagyobb szilárdságot a 2,3

% nedvességtartalmú tablettáknál. 15,4 % nedvességtartalom esetén a víz egy része kitölti a szemcsék közti teret, nem képez folyadékhidat, a szilárdság romlik.

A kompresszibilitási tényező a nedvességtartalom függvénye: $\rho=f(c_{\text{víz}})$ ill. $\kappa=f(c_{\text{víz}})$, $\kappa=5,61\dots31,99$. A brikettszilárdság szintén függ a nedvességtartalomtól, és a vizsgált minta esetében a nedvességtartalom legkedvezőbb értéke 8,7 %. A >29 % nedvességtartalom mellett a komposztált szennyvíziszap nem brikettázható.

7.6 A vizsgált hulladékok brikettálhatóságának összevetése

Ábrázoltam a vizsgált hulladékok relatív sűrűségét és húzószilárdságát a befektetett fajlagos munka függvényében egy diagramon. A σ_h -w diagramon a különböző hulladékok egymástól jól elkülönülnek, az origóból kiinduló különböző meredekségű egyenesekkel határolt tartományokban helyezkednek el. Bevezettem a $\zeta = \sigma_h/w$ arányt, amely kifejezi az egységnyi fajlagos munkával elérhető húzószilárdság értékét, dimenziója MPa g J^{-1} .

8 SUMMARY

Fine disperse materials and products have to be briquetted in lot of industry, because the agglomerated form has many advantages against bulk form.

One of the main quality parameter of briquettes is the breaking strength, which has to be set according to the further utilisation of briquettes. The briquettes have to be easily transportable and feedable, during the utilisation they have to fall apart by a given stress (e.g.: firebox, furnace, etc.). Important parameter is during the production the applied briquetting pressure, binder content and temperature. The equipments should be designed for these parameters. By higher pressure, the parts of the equipments are more demanded. The great mechanical strength and heatproof design increases the initial costs of the equipment.

Exceedingly important is during the agglomeration the specific work and the pressing temperature because of the production costs. The production of the briquettes should be so designed, that the needed briquette quality (strength, abrasion, etc.) should be ensured, with the lowest specific work, temperature and adhesive content. The exact knowledge of the effect of production parameters on briquette quality is crucial. The briquetting of different materials can be well modelled in piston press. In the frame of the dissertation I examine the briquetability of different waste materials and by-products. The main problem of this subject is that the wastes are quite different, and heterogenic. These were the aspects during the selection of sample materials.

Silicone carbide

By briquetting of silicone carbide with binder I established that the $\rho=f(p)$ correlation can be described by the Johanson function. This relation is actually independent from the binder content ($\kappa=23,24$ konst.). The relation of density – briquetting work is also independent from the binder content.

The compactibility $\sigma_h=f(p)$ can be described in the investigated ranges by the Higuchi formula. Contrary to density – briquetting work correlation the strength of briquette depends on binder content (c_k) and specific briquetting work (w).

A method was developed for the calculated planning of briquette quality. According to the above mentioned correlations the tensile strength of the briquettes can be achieved in two different ways: with higher work and less binder or with more binder and less work.

Paper and wood

It was established, that the Johanson function and the relative density - briquetting work relationship are appropriate for describing the binderless briquetting process of wood, paper and the mixture of them. The briquetting phenomena (volume reduction) is similar: $\kappa=5,14...5,87$ konst., average $\kappa_{\text{átl}}=5,54$. Related to briquette strength it was established, that the strength of paper is higher than the strength of the mixture, and in the case of pure paper the particle size (two examined cases: < 6 mm and < 12 mm) does not affect the tablet density.

Refuse derived fuel (RDF) fraction

It was established, that in the case of binderless briquetting of the extremely inhomogeneous refuse derived fuel originated from municipal solid waste, the functions $\rho^*=f(w)$ and $\sigma_h=f(w)$ shows high deviation (with temperature range: $100...140$ °C; with briquetting pressure: $100...250$ MPa). This relation can be described only with a tendency or function interval.

The basic phenomena (volume reduction) correspond to Johanson function. For the briquetting of this material minimum 120 °C and 100 MPa are necessary. The strength of briquetting increases significantly as function of briquetting pressure (work).

Shredder light residue from automotive shredder plant

The density of tablets was increased with the briquetting pressure by all examined particle fractions (< 1 mm, < 2 mm and < 5 mm). The tensile strengths of tablets made from < 5 mm fraction were not appropriate. The Johanson formula describes the compressibility.

The compactibility and the tensile strength – specific work relation are describable by the Higuchi (logarithmical) formula. The tablets made of < 1 mm fraction have the highest σ_h values.

Composted wastewater sludge

The material was briquetted binderless at 20 °C with different moisture contents ($c_{viz}=2,3\dots29\%$) at 100...250 MPa pressure. It was considered, that the Johanson formula is also valid for this raw material, but the compressibility coefficient depends on the moisture content: $\rho=f(c_{viz})$ and $\kappa=f(c_{viz})$, $\kappa=5,61\dots31,99$. The strength of the briquette is also changes with the moisture content. The optimal moisture content within the examined range is 8,7 %, over 29 % the material is not briquettable.

Comparison of briquettability

The relative density and tensile strength of the examined wastes were plotted against specific briquetting work. The $\sigma_h - w$ values plotted as point distribution can be grouped well with lines starting from origin. The ratio of tensile strength and briquetting work was introduced: $\zeta=(\sigma_h/w)$. This ratio shows the tensile strength per unit briquetting work, the unit of it is $MPa\ g\ J^{-1}$.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az értekezés a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

Az értekezésben a ciklonpor brikettálhatóságára irányuló vizsgálatok a Nemzeti Technológia Program *„Roncsautók és elektronikai hulladékok szerves anyagainak hasznosítására szolgáló technológiák fejlesztése a jövőbeli deponálás elkerülésére”* c. (RECYTECH/Tech_08_A4/2-2008-0142) projekt keretén belül történtek. A projekt a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség támogatásával valósult meg.

Köszönetet mondok témavezetőimnek, különös tekintettel Prof. Dr. habil Csőke Barnabásnak, amiért lehetőséget biztosított munkám sikeres elvégzéséhez, az értekezésem megírásához. Köszönöm segítőkész támogatását és disszertációm többszöri alapos és kritikus átnézését.

Hálával tartozom továbbá Dr. Faitli Józsefnek és Antal Gábornak, akik a mérés technika területén nyújtottak sok segítséget, Dr. Gombkötő Imrének és Dr. Mucsi Gábornak, akik az értekezés összeállításában segítettek tanácsaikkal.

Köszönöm Dr. Böhm József intézetigazgató segítségét az értekezés elkészítésében.

Köszönetet mondok az intézetben dolgozó valamennyi munkatársnak a kísérleti munka során felvetődött gyakorlati problémák megoldásában nyújtott segítségükért és a sok nélkülözhetetlen kísérleti eszköz elkészítéséért.

Köszönettel tartozom a Legát Kft.-nek (különös tekintettel Dr. Lengyel Atillának), az AVE Miskolc Kft.-nek valamint az Alcufer Kft.-nek a munkámhoz szükséges minták és információk biztosításához, valamint azért, hogy engedélyezték a kísérletek lefolytatását.

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

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] H. Schubert: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1984
- [2] Stiess: Mechanische Verfahrenstechnik 2, Springer Lehrbuch 1993
- [3] SME Mineral Processing Handbook, Society of Mining Engineering of the American Institute of Mining Metallurgical and Engineers
- [4] Tarján G.: Ásványelőkészítés II, TK 1989
- [5] Csöke B.: Előkészítéstechnika. Intézeti jegyzet, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet, 2004.
- [6] Schubert: Mechanische Verfahrenstechnik I, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1977.
- [7] Rumpf, H.: Grundlagen und Methoden des Granulierens. Chemie-Ing.Techn. 30 Jahrgang 1958/Nr.3
- [8] Dr. Bai Attila: A biomassza felhasználása; Szaktudás Kiadó Ház, 2002
- [9] Kacz K.-Neményi M.: Megújuló energiaforrások; Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 1998
- [10] H. Rieschel: Gegenwärtiger Stand der Eisenschwammbrickettierung unter Berücksichtigung der Bindemittelauswahl, Stahl und Eisen, Heft 24/1980
- [11] Beőr Nikolett: Szilícium karbid por brikettálása polymer kötőanyaggal, diplomamunka, ME-NyKE, 2009.
- [12] SiC porok agglomerálása: Kutatási részjelentés, ME-NyKE 2008.
- [13] Michael Temmerman: Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes, Biomass and Bioenergy 30 (2006) 964–972
- [14] Bodnár Zoltán: Papír hulladék darabosítására irányuló kísérletek, szakdolgozat, ME-NyKE, 2010.
- [15] N. Chevanan: Bulk density and compaction behavior of knife mill chopped switchgrass, wheat straw, and corn stover. Bioresource Technology 101 (2010) 207–214
- [16] B. CLAÜß: Beitrag zur Kompaktierung von unzerkleinertem Halmgut für die energetische Nutzung. Disszertáció (Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Chemnitz), 2001
- [17] Phani Adapaa, Lope Tabila, Greg Schoenau: Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. Biosystems Engineering 104 (2009) p335-344.
- [18] Jorn M. Sonnergaard: Quantification of the compactibility of pharmaceutical powders. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics 63 (2006) p270-227.
- [19] S. Emami, L.G. Tabil: Friction and compression characteristics of chickpea flour and components. Powder Technology 182 (2008) p119-126.
- [20] Maghussian: Chemical Bonding of Silicon Carbide. Journal of European Ceramic Society 19 (1999) p2815-2821.
- [21] S. Mani: Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. Canadian Biosystems Engineering Volume 46 (2004) p3.55-3.61.
- [22] Sudhagar Mani: Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. Biomass and Bioenergy 30 (2006) p648-654.
- [23] Technical Research Centre of Finland: Wood pellets in Finland – Technology, economy and market; OPET Report 5, 2002
- [24] Szilícium karbid brikettálhatóságának vizsgálata. Kutatási jelentés, megbízó: LEGÁT Kft., 2008.
- [25] RECYTECH részbeszámoló, ME-NyKE, 2009 és 2010. évek

- [26] Cseppely Vivien: Mechanikai biológiai stabilizálásból származó másod-tüzelőanyag frakció nemesítése, szakdolgozat, ME-NyKE, 2010.
- [27] Pokorni Zsófia: Komposztált szennyvíziszap energetikai hasznosításának lehetősége, különös tekintettel a brikettálásra, szakdolgozat, ME-NyKE, 2010.
- [28] Beőr Nikolett: Szilícium karbid por brikettálása. TDK dolgozat, ME 2008
- [29] Dusik Ákos: Kötőanyagtartalom és brikettálási sebesség hatásának vizsgálata szilícium karbid por tablettázásának esetében. Szakdolgozat, ME, 2009.
- [30] WEIMA Amerika cég honlapja Letöltve: 2008. 10.15
<http://www.weimaamerica.com/english/products/briquetting-presses/th200.htm>
- [31] Stefan Mähler: Kompaktieren feindisperser Schüttgüter in Walzenpressen. VTP Schriftenreihe der Verfahrenstechnik, Universität – GH Paderborn, Band 10, 1999. ISBN 3-8265-7631-4
- [32] Por alakú anyagok adagolása és kompaktálása nagyteljesítményű hengerprésben. Kutatási jelentés, Miskolci Egyetem Eljárástechnikai tanszék, 1994.
- [33] P. Jonsén: Tensile strength and fracture energy of pressed metal powder by diametral compression test. Powder Technology 176 (2007), p. 148-155.
- [34] J. T. Fell: Determination of Tablet Strength by the Diametral-Compression Test. Journal of Pharmaceutical Sciences, VI., 59, No. 5, May 1970, p.688-691.
- [35] Somosvári Zsolt: Geomechanika, ISSN: J 14-1625, Tankönyvkiadó, Budapest 1989.
- [36] Csőke, B.: Zerkleinerung von thermohärtenden Kunststoffabfällen, TU for Heavy Industry, Miskolc Series A. Mining. Vol. 46 (1990), pp. 63-83.
- [37] D.P. Debrincat, C.B. Solnordal, J.S.J Van Deventer: Influence of particle properties on the size of agglomerated metallurgical powders. Int. J. Miner. Processes. 87 (2008) p17-27
- [38] V. Singh, S. M. Rao: Study the effect of chromite ore properties on pelletisation processes. Int. J. Miner. Processes. 88 (2008) p13-17
- [39] Juhász Éva, Lelkesné Erős Mária: Felületaktív anyagok zsebkönyve. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1979. ISBN: 963 10 2470 9
- [40] Bárány Sándor: Polimerek diszperz rendszerekben. Egyetemi jegyzet, Miskolci Egyetem
- [41] Dénes Miklós: Anyagismeret. Miskolci Egyetem (kézirat), Nemzeti Tankönyvkiadó 1993.
- [42] Szalai: Vasbetonszerkezetek, Nemzeti Tankönyvkiadó, 1996
- [43] Gálos – Vásárhelyi: Közettestek osztályozása az építőmérnöki gyakorlatban. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem kiadványa, 2006
- [44] Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium: Hulladékgazdálkodás online anyag: http://www.kvvm.hu/szakmai/hulladeggazd/tervezes_seged/veszhullos/F4fuggelek.htm
- [45] Sulinet Digitális Tudásbázis: <http://sdt.sulinet.hu>
- [46] Dr. Zsuga Miklós: Makromolekuláris Kémia. Egyetemi jegyzet, Debreceni Egyetem, Alkalmazott Kémiai Tanszék, 2006.
- [47] Dr. Bodor Géza: A polimerek szerkezete. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982. ISBN: 963 10 4321 5
- [48] Jan P. Lampke, Sandra Weyrauch, Steffen Silge: Qualitätssteigerung von Roh- und Reststoffen durch Anwendung von Pelletierverfahren. Technical Solutions – Fest und kompakt - AT International - Mineral Processing, 2011/3. p.54-61. ISSN 1869-1811
- [49] Roman T. Dec, ntonios Zavaliangos, John C. Cunningham: Comparison of various modeling methods for analysis of powder compaction in roller press. Powder Technology 130 (2003) p.265-271

- [50] Osmo Antikainen, Jouko Yliruusi: Determining the compression behaviour of pharmaceutical powders from the force-distance compression profile. *International Journal of Pharmaceutics*, 252 (2003) p253-261
- [51] C. Bacher, P. M. Olsen, P. Bertelsen, J. Kristensen, J. M. Sonnergaard: Improving the compaction properties of roller compacted calcium carbonate. *International Journal of Pharmaceutics*, 342 (2007) p115-123
- [52] St. Palzer: Agglomeration of pharmaceutical, detergent, chemical and food powders – Similarities and differences of materials and processes. *Powder Technology* 206 (2011) p2-7
- [53] L. Grossmann, J. Tomas, D. Herold, K. Sommer: Experimentelle Untersuchung der Verdichtung von kohäsiven Schüttgütern mit einer Walzenpresse. *Aufbereitungs Technik* 47 (2006) Nr.6 p.22-29
- [54] W. Pietsch: Agglomeration methods in particle engineering. *Proceedings of the XXI. International Mineral Processing Congress (A4)*, Rome, July 23-27 2000.
- [55] M. A. Schiavon, E. Radovanovic, I. V. P. Yoshida: Microstructural characterisation of monolithic ceramic matrix composites from polysiloxane and SiC powder. *Powder Technology* 123 (2002) p.232-241
- [56] G. Göll, H. Knöbel, D. Espig: Einfluss der Korngrößenverteilung auf Dichte und Festigkeit pyrotechnischer Tabletten. *Aufbereitungs Technik* 47 (2006) Nr 7. p36-49
- [57] Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet; Paderborni Egyetem: Feeding and Compacting of Powders in High-Performance Roll Presses (U/No CIPACT93-0151). *Kutatási jelentés*, 1998.
- [58] Faitli, J., Csöke, B., Nagy, S.: Dry agglomeration of hazardous waste incineration plant fly ash, *MicroCAD 2005*, International Scientific Conference Miskolc, 10-11 March 2005. (Publ.: University of Miskolc, ISBN 963 661 646 9ö , ISBN 946 661 647 7), 25-30.
- [59] Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet: A hazai szénbrikettgyártás megalapozását szolgáló kutatás-fejlesztés. *Kutatási jelentés* (2005) (NKFP-pályázat (OM). ENE-00007/03.)