

Doktori (PhD) értekezés  
Nyugat-magyarországi Egyetem  
Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar  
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola  
Vezető: Prof. Dr. Tolvaj László egyetemi tanár

Doktori program: Fafeldolgozási technológiák  
Programvezető: Kovács Zsolt egyetemi tanár, CSc  
Tudományág: anyagtudomány és technológiák

**A FA SZEMCSÉS HALMAZOK TÖMÖRÍTÉSÉNEK RHEOLÓGIÁJA ÉS  
ENERGETIKÁJA A PELLETTÁLÁSI TARTOMÁNYBAN**

Készítette: Kocsis Zoltán

Témavezető(k): Prof. Dr. Varga Mihály egyetemi tanár  
Prof. Dr. Csanády Etele egyetemi tanár

Sopron

2014

**A FA SZEMCSÉS HALMAZOK TÖMÖRÍTÉSÉNEK RHEOLÓGIÁJA ÉS  
ENERGETIKÁJA A PELLETTÁLÁSI TARTOMÁNYBAN**

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében  
a Nyugat-Magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori  
Iskolája Fafeldolgozási technológiák programja

Írta:  
Kocsis Zoltán

Készült a Nyugat-Magyarországi Egyetem Cziráki József Doktori Iskola Fafeldolgozási  
technológiák programja keretében

Témavezető(k): Prof. Dr. Varga Mihály  
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

Prof. Dr. Csanády Etele  
Elfogadásra javaslom (igen / nem)

.....  
(aláírás)

.....  
(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton ..... % -ot ért el,

Sopron, .....

.....  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr. ....) igen /nem  
(aláírás)

Második bíráló (Dr. ....) igen /nem  
(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr. ....) igen /nem  
(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján.....% - ot ért el

Sopron,.....

.....  
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....  
Az EDHT elnöke

## TARTALOMJEGYZÉK

<b>1. BEVEZETÉS .....</b>	<b>6</b>
<b>2. A TÉMA IDŐSZERŰSÉGÉNEK INDOKLÁSA.....</b>	<b>7</b>
2.1.    MAGYARORSZÁG EU-S KÖTELEZETTSÉGVÁLLALÁSA A MEGÚJULÓ ENERGIATERMELÉS KAPCSÁN .....	7
2.2.    A PELLETTYÁRTÁS HELYZETE ÉS FEJLŐDÉSI IRÁNYAI .....	10
<b>3. A PELLETTYÁRTÁS TECHNOLÓGIÁJA .....</b>	<b>14</b>
3.1.    A PELLETTYÁRTÁS ENERGIAMÉRLEGÉNEK ELEMZÉSE.....	18
<b>4. A DOLGOZAT TÉMÁJÁVAL ÖSSZEFÜGGŐ SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....</b>	<b>22</b>
4.1.    A FAANYAG ANATÓMIAI FELÉPÍTÉSE .....	22
4.2.    A FAANYAG, MINT VISZKOELASZTIKUS ANYAG, RHEOLÓGIA ALAPOK.....	23
4.3.    A FAANYAG, MINT VISZKOELASZTIKUS ANYAG RHEOLÓGIA ÖSSZEFÜGGÉSEI .....	27
<b>5. ÁLTALÁNOS RHEOLÓGIA MODELLEK ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK KÉRDÉSEI A POR-FORGÁCS HALMAZOK TÖMÖRÖDÉSI FOLYAMATAIVAL ÖSSZEFÜGGÉSben .....</b>	<b>30</b>
5.1.    A PLASZTIKUS DEFORMÁCIÓ LEÍRÁSA A POR-FORGÁCS HALMAZOK NAGY NYOMÁSON TÖRTÉNŐ TÖMÖRÖDÉSI FOLYAMATINÁL .....	37
5.2.    A TÖMÖRÍTÉSI FOLYAMATOK ÁLTALÁNOS TÖRVÉNYSZERŰSÉGEI A PELLETTÁLÁSSAL ÖSSZEFÜGGÉSben.....	41
5.3.    A PELLETTÁLÁS NYOMÁSVISZONYAI.....	47
<b>6. CÉLKITŰZÉS .....</b>	<b>48</b>
<b>7. KUTATÁSI MÓDSZER, TEMATIKA.....</b>	<b>49</b>
7.1.    A MÉRÉSI PARAMÉTEREK MEGVÁLASZTÁSA .....	61
<b>8. KUTATÁSI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE .....</b>	<b>63</b>
8.1.    A FAFAJ ÉS A SZEMCSEMÉRET HATÁSA A PELLETT TÖMÖR SŰRŰSÉGÉRE.....	64
8.2.    A PRÉSELÉSI SEBESSÉG HATÁSA A PELLETT TÖMÖR SŰRŰSÉGÉRE.....	67
8.3.    A FAFAJ ÉS A SZEMCSEMÉRET HATÁSA A PELLETT SŰRŰSÉGRE .....	69
8.4.    AZ ALAPANYAG NEDVESSÉGTARTALMÁNAK HATÁSA A PELLETT SŰRŰSÉGRE .....	73
8.5.    A HŐMÉRSÉKLET HATÁSA A PELLETT SŰRŰSÉGRE .....	78
8.6.    A POR-FORGÁCS HALMAZOK RELAXÁCIÓS ÉS KÚSZÁSI TULAJDONSÁGAINAK A VIZSGÁLATA.....	88
8.7.    A RELATÍV FALSÚRLÓDÁS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA, A PELLETTÁTMÉRŐ HATÁSA .....	94
8.7.1. <i>A kitolási erő közelítő modellezése.....</i>	<i>100</i>
8.7.2. <i>A nyomástartáshoz szükséges préscsatornahossz közelítő meghatározása .....</i>	<i>105</i>
8.8.    A DIMENZIÓ NÉLKÜLI SZÁMOK ALKALMAZÁSA A POR-FORGÁCS HALMAZOK TÖMÖRÍTÉSI FOLYAMATINÁL.....	107
8.8.1. <i>A nyomástartáshoz szükséges préscsatornahossz dimenzió nélküli ábrázolása.....</i>	<i>118</i>
<b>9. ÖSSZEFOGLALÁS.....</b>	<b>120</b>
<b>10. TÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA .....</b>	<b>122</b>
<b>11. IRODALOMJEGYZÉK.....</b>	<b>123</b>
<b>12. A DOLGOZAT TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK .....</b>	<b>126</b>
<b>13. A KUTATÁS TÉMÁJÁVAL ÖSSZEFÜGGŐ PUBLIKÁCIÓKRA TÖRTÉNŐ FÜGGETLEN HIVATKOZÁSOK ...</b>	<b>128</b>
<b>14. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....</b>	<b>128</b>
<b>15. FÜGGELÉK.....</b>	<b>129</b>
15.1.    MÉRÉSEI PARAMÉTERTÁBLÁZAT .....	129
15.2.    FENYŐ ÉS AKÁCS SZEMCSÉK ALAKI MEGHATÁROZÁSA ELEKTRONMIKROSKÓPOS FELVÉTEL SEGÍTSÉGÉVEL .....	130

## A FA SZEMCSÉS HALMAZOK TÖMÖRÍTÉSÉNEK RHEOLÓGIÁJA ÉS ENERGETIKÁJA A PELLETTÁLÁSI TARTOMÁNYBAN

### KIVONAT

A disszertáció a faalapú por-forgács halmazok nagynyomáson történő tömörödésének folyamatait mutatja be a pelletálással összefüggésben lucfenyő (*Picea abies*), tölgy (*Quercus sp.*) és akác (*Robinia pseudoacacia*) fafajokon. A nagy nyomáson előállított pellet mechanikai tulajdonságai számos tényezőtől függnnek. A legfontosabb tényezők a fafaj, a szemcseméret, a nedvességtartalom, a préselési nyomás, a préselési sebesség, a deformáción tartási idő, a nyomófej átmérő és a préselési hőmérséklet. A dolgozat ezen tényezők befolyásoló hatását megvizsgálta, majd következtetéseket tett. A por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörítése során bekövetkező mechanikai változások, a  $\sigma$ - $\varepsilon$  viszony leírása a nem-lineáris rheológia módszerével történik, mivel a faanyag nem-lineáris viszkoelasztikus tulajdonsággal rendelkezik. Ebből adódóan a tömörítés folyamata alatt a faanyaghalmoz rugalmassági modulusa nagymértékben növekszik, majd a folyamat végén a kialakult pellet maradó deformációt szenved. A maradó deformáció mértéke határozza meg a pellet tulajdonságát, elsősorban a sűrűségét. A disszertáció kiemelten fontosnak tartja az egyes befolyásoló tényezők a por-forgács halmazok tömörítési folyamataira gyakorolt hatásának teljes körű vizsgálatát, majd a kapott eredmények alapján új mechanikai modellek, elméleti összefüggések kidolgozását. Ezek alapján kidolgozásra került a relatív falsúrlódással összefüggő kitolási erő-, és a segítségével levezetett nyomástartáshoz szükséges préscsatornahossz közelítő mechanikai modellezése, illetve dimenzióanalízis módszerével megalkotásra került a préselési energiaszükséglet számítására egy olyan dimenzió nélküli kritériumegyenlet, amely univerzálisan (fafajtól függetlenül) jellemzi a faalapú por-forgács halmazok nyomás-sűrűség változását a tömörítési munka és a préshőmérséklet függvényében különböző pelletátmérők mellett adott szemcseméret tartományban. A kutatás eredményei a gyakorlat számára hasznosíthatók és nagyban hozzájárulnak a faalapú por-forgács halmazok tömörödésével összefüggő elméleti ismeretek bővítéséhez.

## THE COMPRESSION RHEOLOGY AND ENERGETICS OF WOOD PARTICLE SETS AT PELLETTING RANGE

### ABSTRACT

This Ph.D. thesis presents the process of high pressure compression of wood chips and dust sets in the context the pelleting spruce (*Picea abies*), oak (*Quercus sp.*) and acacia (*Robinia pseudoacacia*) species. The mechanical properties of high pressure produced pellets depend on many factors. The most important factors are wood species, particle size, moisture content, compression pressure, the speed of compression, the holding time on deformation, the diameter of ram and the temperature of pressing. The dissertation examined the influence of these factors, and then made conclusions. Description of resulting mechanical changes during high pressure compression of wood chips and dust sets ( $\sigma$ - $\varepsilon$  relationship) happen by non-linear rheological methods, whereas the wood has non-linear viscoelastic property. Consequently, during the compression process greatly increases the elastic modulus of wood chips and dust set, and the resulted pellet at the end of the process suffers residual deformation. The rates of residual deformation determine the properties of pellet, especially density. The dissertation considers it highly important, examining the impact of influencing factors at compression process of wood chips and dust sets and then the development of new mechanical models based on the received results. In this connection, the extend force and the required length of press channel approximate mechanical modelling has been developed which are related to the relative wall friction. Well as we created a dimensionless criterion equation which is generally characterized (independently wood species) pressure and density changes of wood sets in the function of compression work and press temperature at different pellets diameters and specific particle size range. I also proved with measurement the derived theoretical correlations. The obtained results are useful for practice and contribute greatly to the expanding the theoretical knowledge of wood chips and dust sets.

*„Az ember legjobb barátja a Földön a fa. Amikor a fát tisztelettel és gazdaságosan használjuk, miénk a Föld egyik legnagyobb erőforrása.”  
/Frank Lloyd Wright/*

## 1. BEVEZETÉS

A gyakorlatban manapság egyre nagyobb arányban terjed az egyes mezőgazdasági és faipari anyagok pelletálása, amelynél a nyomás eléri vagy meghaladja az 1000 bar értéket. A fapellettek esetén kiemelt követelmény a tömörödés vizsgálata, hiszen fontos, hogy a pellet állékony, tartós legyen, vagyis szállítás közben ne essen szét. Az állékonyságot a szemcsék méretének eloszlásán túl főként azok nedvességtartalma, az elért sűrűség és a préseelési hőmérséklet befolyásolja. A por-forgács halmazok tömörödési vizsgálatainak, tehát nagy gyakorlati jelentősége van mind a pelletálási-, mind pedig a brikettálási technológiák területén egyaránt. A tömörítési folyamatok hatására a faanyag halmaz kisebb térfogatú lesz, sűrűsége növekszik. A pellet kiinduló sűrűsége elsősorban a szemcsék méretelosztásától, valamint a szemcsék anyagának szilárdságától, sűrűségétől függ. A faanyagok - mint bonyolult felépítésű biomechanikai rendszerek - viselkedése nem jellemezhető néhány fizikai állandóval, mint pl. a fémek esetében. Mechanikai tulajdonságai nem állandóak, hanem számos tényezőtől függenek. Ezek a tényezők egyrészt a fa saját tulajdonságaiban keresendők (pl. termőhely, nedvességtartalom, sűrűség, életkor, stb.), másrésztől, pedig a külső erőhatásokkal szemben kifejtett ellenállásából és viselkedéséből adódnak (NILSSON et al., 2002). Az ebből fakadó számos változó miatt a faanyagok különböző külső és belső erőhatásokkal összefüggő viselkedése ma még sok kérdést vet fel, ezért az alapkutatások jelentősége felértékelődött. A faanyagok bonyolultságának következménye, hogy a mechanikai tárgyalások során viszonylag sok feltételezéssel kell élnünk, és a kapott eredmények csak az adott feltételek mellett érvényesek. Gyakran kell empirikus módszerekhez folyamodnunk, hogy az észlelt jelenségeket leírassuk. Mivel a tisztán elméleti megfontolások ritkán vezetnek használható eredményhez ezért a kísérleti vizsgálatoknak különösen fontos szerepük van. A vizsgálatok értékeléséhez nagyon fontos, hogy az anyag minden jellemzőjét (fafaj, nedvességtartalom, szemcseméret, sűrűség, terhelés, stb.), amelyek az eredményt befolyásolják, pontosan rögzítsük. A pelletálással összefüggésben a faalapú por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörítési folyamatival összefüggő hazai és külföldi kutatások hiányosak. Ahhoz, hogy a pellet, mint megújuló energiahordozó szekvenciális felhasználását elősegítsük, szükség van egyrészt egy megfelelően kidolgozott állami támogató és ösztönző rendszerre, másrészt pedig célzott alapkutatásokra. Az alapkutatások segítségével meghatározhatjuk azokat a befolyásoló tényezőket, melyek akár a pelletek anyagával illetve a technológiával vannak összefüggésben. Ahhoz, hogy a pellet versenyképességét növelni tudjuk az energiaszektorban, az állami támogató rendszeren túlmenően szükség van a gyártási költségek csökkentésére is. Ezek egyrészt logisztikai, másrészt pedig technológiai költségekből tevődnek össze. A dolgozat éppen ezért rheológia-, és energetikai oldalról is vizsgálja a faalapú por-forgács halmazok tömörödési folyamatait és hozzájárul az elmélet illetve a gyakorlat hasznára.

## 2. A TÉMA IDŐSZERŰSÉGÉNEK INDOKLÁSA

A dolgozat a fapellet készítés rheológia és energetikai összefüggéseivel, kérdéseivel foglalkozik. Ahhoz, hogy a kutatási témát időszerűnek igazoljam, szükség van az EU-s energetikai célkitűzések és azon belül a Magyarországi megújuló energia helyzetének rövid áttekintésére, értékelésre, hiszen az energiastratégiában megfogalmazott célok között jelentős szerepe van a fapellet racionális felhasználásának, hasznosíthatóságának. A megújuló energiaforrások elterjedésének és azon belül a pellet gazdaságos felhasználásának elengedhetetlen fontossága a K+F+I tevékenységek támogatása. Ezzel összefüggésben jelentősen kiterjedt a megújuló energiákkal kapcsolatos EU-s pályázati források köre és azon belül kiemelt szerepet kapnak a célzott alapkutatások. A következő alfejezetek központi témája tehát az energiastratégia és azon belül a pelletgyártás helyzete és fejlődési irányainak helyzetértékelése különös tekintettel a pellet felhasználás növekedésének magyarországi korlátaira és a kitorési lehetőségekre.

### 2.1. MAGYARORSZÁG EU-S KÖTELEZETTSÉGVÁLLALÁSA A MEGÚJULÓ ENERGIATERMELÉS KAPCSÁN

Az egyre fokozódó energiaigények hosszú távon a természeti erőforrások kimerüléséhez vezetnek. Ezért alapvető energiagazdálkodási cél, hogy a kimerülőben lévő fosszilis energiahordozókat részben helyettesítsük és az energia ellátás biztonságát növeljük, a megújuló energiaforrások részarányának növelésével. A rendelkezésünkre álló nagy mennyiségű megújuló energiahordozók megfelelő hatékonysággal történő felhasználása nagymértékben elősegíti az energiahatékonyság növelését. A legújabb közösségi direktíva a megújuló témakörben a 2009/28/EK 58. irányelv, mely elsőként foglalta át a megújuló témakörben a 2009/28/EK irányelv<sup>1</sup> és EU2020 stratégia a klímaváltozás és energiahatékonyság területén elfogadott uniós célkitűzés három célértéket fogalmazott meg 2020-ra:

- a megújuló energiaforrások részarányának 20 százalékra növelését a primerenergia-felhasználáson belül,
- a teljes energiafelhasználás 20 százalékos mérséklését,
- valamint az üvegházhatású gázok kibocsátásának 20 százalékos csökkentését (az 1990-es bázisévhez képest).

Magyarország ugyanakkor az EU2020 Stratégiai és Nemzeti Intézkedési tervében (NIT) 2020-ra 14,65%-os megújuló energiatermelés részarány teljesítését tűzte ki célul. Nem tűnik nagynak Magyarország 14,65 %-os vállalása, ugyanakkor a jelenlegi (2013. évi) ~9,5%-os felhasználásról történő elmozdulás sürgős intézkedéseket indokol.

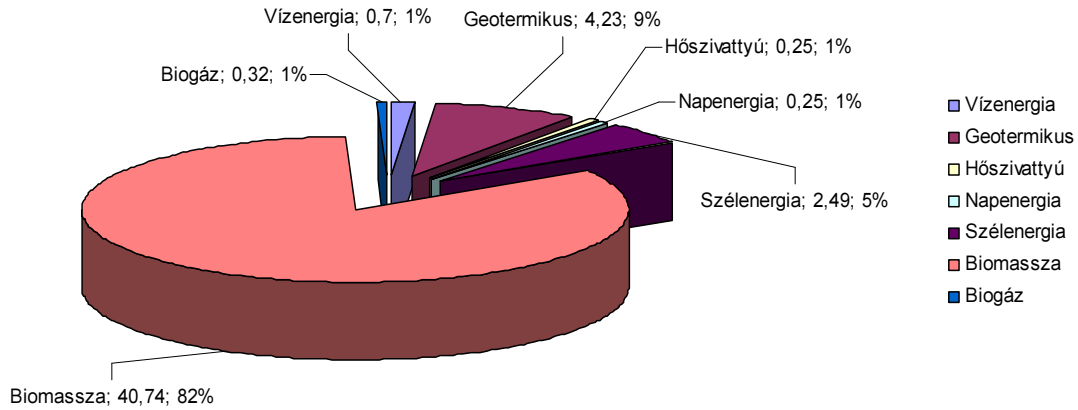
Két kulcsfontosságú fogalmat kell itt ezzel kapcsolatosan megemlíteni:

- *Energiatakarékosság*: Felesleges energiafelhasználás csökkentése
- *Energiahatékonyság*: Az igények kielégítése kevesebb energiával

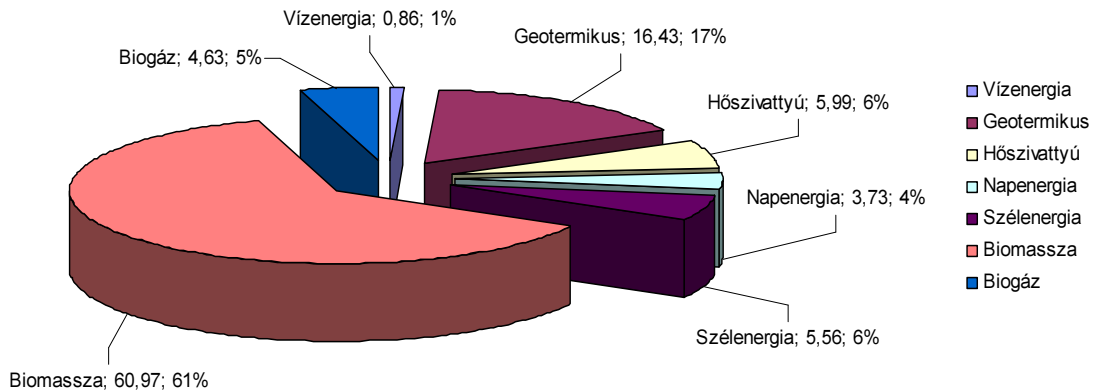
A referencia forgatókönyv szerinti 2020. évi országos primerenergia igény 1130 PJ/év prognosztizálható. Ez az érték gyakorlatilag a 2008. évi fogyasztás mértékével egyezik meg (1126 PJ). A fő cél tehát az, hogy a 2013-as ~1000 PJ hazai primer energia felhasználás

<sup>1</sup> Az Európai Parlament és a Tanács 2009/28/EK irányelve (2009. április 23.) a megújuló energiaforrásból előállított energia támogatásáról, valamint a 2001/77/EK és a 2003/30/EK irányelv módosításáról és azt követő hatályon kívül helyezéséről.

legfeljebb 15 százalékkal növekedjen 2030-ig, azaz ne haladja meg az 1150 PJ értéket. Mindez a fosszilis energiahordozók felhasználásának és a CO<sub>2</sub> kibocsátás csökkenése mellett fog megvalósulni. Politikai és szakmai célkitűzés a 10 százalékos energiatakarékosság elérése, amely érdekében az elkövetkező években, évtizedben több jelentős energiatakarékossági program elindítása tervezett.

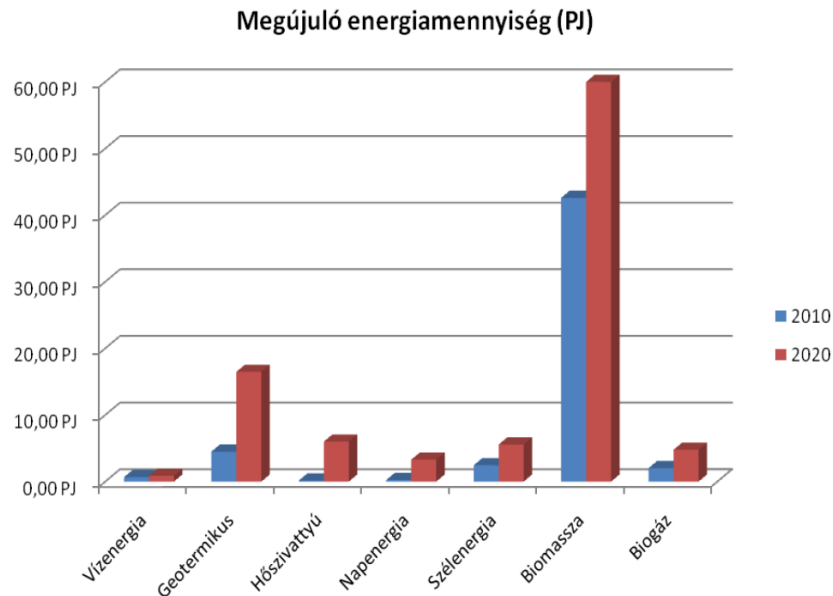


**1. ábra.** A hazai megújulóenergia-felhasználás összetétele 2010-ben [PJ]  
(NCST, 2010)



**2. ábra.** A hazai megújulóenergia-felhasználás tervezett összetétele 2020-ban [PJ]  
(NCST, 2010)





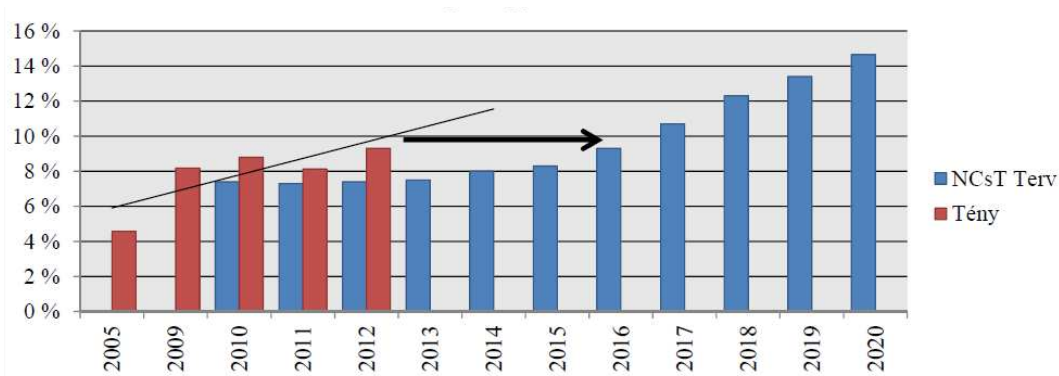
**3. ábra.** A Megújuló energia hasznosítási cselekvési tervében megfogalmazott irányértékek (NCST, 2010)

Az 1-3. ábrákon jól látszik, hogy a jövőben mely területekre kell a hangsúlyt fektetni és mely területek azok, melyek cselekvési tervét és támogatási rendszerét megalapozottan, átgondoltan kell kezelni. Látható, hogy a megújuló energiák között a biomassza felhasználása jelentős szerepet képvisel (40 PJ-ról 60 PJ-ra történő növekedés figyelhető meg). Az egyre növekvő biomassza igényt a jelenlegi erdei választék - még az apadék fokozottabb begyűjtése mellett is - csak részben lesz képes kielégíteni 2020-ra. Ezért indokolt egy „biomassza mix” összeállítás, amely az adottságok, lehetőségek és igények figyelembevételével egy olyan egyensúlyi összetételre tesz javaslatot, ami képes biztosítani a szükséges biomassza mennyiséget (1. táblázat). A növekvő megújuló energia igények kielégítéséhez 2020-ig becslések szerint évi 7,8–8 millió tonna biomassza mennyiség szükséges. Ennek előteremtéséhez a jelenlegi erdőállományokra, új telepítésekre, az ezekből kikerülő tűzifára, az apadékra, mezőgazdasági melléktermékekre, lágyszárú (szántóföldi) energianövényekre és fászszerű energiaültetvényekre, melléktermékekre és hulladékokra kell támaszkodni. Ennek a mennyiségnek a jelentős része Magyarország állami- és magánerdőiben rendelkezésre áll.

**1. táblázat.** Becsült biomassza-mix 2020-ra  
(Megújuló energiák hasznosítása, 2010)

Biomassza típusa	Volumen [ezer t/év]	Megoszlás [%]
Erdészeti termék	2 114	27,17 %
Fafeldolgozás energia célra hasznosított melléktermékek	231	2,97 %
Energianövények	1 914	24,6 %
Mezőgazdasági melléktermék-hulladék	3 522	45,26 %
<b>Összesen</b>	<b>7 781</b>	<b>100 %</b>

A Cselekvési terv alapján a megújuló energiaforrásokból előállított energiával kapcsolatos jelenlegi és a 2020-ra tervezett célkitűzések ütemterveit a következő ábrán láthatjuk (4. ábra).

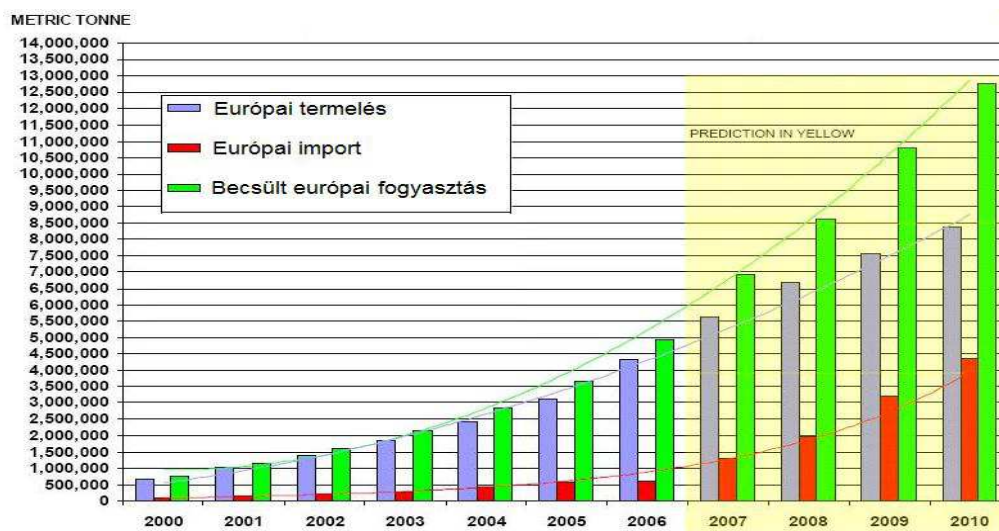


**4. ábra.** A megújuló energiaforrások részaránya a teljes bruttó energiafogyasztásban (HORVÁTH, 2013)

Az Energiastratégiában megfogalmazott fő célok eléréséhez jelentős és hatékony energiahatékonysági és energiatakarékosági ösztönző programokat kell megvalósítani. A kitűzött cél (2020-ra 14,65%) érdekében nemcsak gazdasági és politikai oldalról kell megtenni a szükséges intézkedéseket, hanem társadalmi szinten is bizonyos változások, életmódváltások szükségesek. A társadalmi szerepvállalás (pl. energiatudatosság, pazarlások visszaszorítása, stb.) nélkül ez az irányérték nem vagy csak nagyon nehezen, bizonyos feltételek árán lesz teljesíthető.

## 2.2.A PELLETTYÁRTÁS HELYZETE ÉS FEJLŐDÉSI IRÁNYAI

A pellet mint tüzelőanyag először Észak-Amerikában jelent meg. Európában a kilencvenes évek elején kezdett komolyabbnak mondható terjedésbe Svédországban, Dániában és Ausztriában. Napjainkban a megújuló fűtőanyagok között a pellet és a brikett komoly gazdasági jelentőséggel bír. Az utóbbi 8-10 évben Európa-szerte újabb és újabb pelletgyárak épültek. A pellet fogyasztás 2000-2010 között több mint tízszeresére nőtt az EU-ban (5. ábra) (NIELSEN, 2010). A 2012-es évre jellemző európai pellet termelés közel 10 százalékkal növekedett a 2010-es évhez képest. Az európai pellet üzemek száma 2012-es adatok alapján kb. 700 db ([www.mapellet.hu](http://www.mapellet.hu))



**5. ábra.** Az európai pelletpiac helyzete (BURJÁN, 2009)

Magyarországon is az elmúlt 10 évben megnövekedett az igény a pellet iránt. A pelletfűtés sajnos hazánkban még nem elterjedt, ezért a működő gyártó üzemek termelésük komoly hányadát (70-80%) egyelőre külföldi piacokon értékesítik. Magyarországon jelenleg 1-2 tonna/óra kapacitású pelletüzemek működnek rentábilisan. A Magyar Pellet Egyesület tagjainak száma 2012-es adatok alapján 35 körülre tehető. Ezek között találunk pelletgyártókat, pelletgépsor és készülék gyártókat, szakértőket, civil szervezeteket. A hazai pelletgyártók száma 2009-ben 11 körül alakult, 2012-2013-ban ez a szám 12-15-re változott. A magyar pellet termelés 2010-ben 161800 tonna volt, amelynek alapanyaga 95%-ban fapellet, a maradék 5%, pedig agripellet. A 2012-es évre jellemzően, mintegy 10%-os növekedést figyelhetünk meg a fapellet termelésben a 2010-es évhez képest, az agripelletek mennyiségének aránya viszont nagyobb ütemben növekedett, mintegy 15%-kal. Ahhoz, hogy a pellet felhasználás nagyobb mértékű növekedésnek induljon hazánkban, meg kell vizsgálnunk a jelenlegi piaci helyzetet, korlátokat és a lehetséges kitörési pontokat. Bevezetéképen tekintjük át a pellet felhasználásának előnyeit és hátrányait.

A pellet felhasználás előnyei:

- Környezetbarát,
- Energiahatékony,
- Csökkentheti az ország tüzelőanyag importját,
- Gazdaságnövelő és munkahelyteremtő hatás,
- Segíti az EU-s célkitűzések teljesítését,
- CO<sub>2</sub> semleges,
- Előállítása könnyen automatizálható,
- Komfortfokozata közelít a földgázéhoz.

A pellet felhasználás hátrányai:

- A pellet előállításához primer oldalon energiát kell bevinnünk,
- Speciális tüzelőberendezést és égőfejet igényel (növekvő műszaki követelmények),
- Logisztikai költségek (be-, és kiszállítás költségei) magasak,
- A pellet ára a folyamatos rezsicsökkentés hatására alulról közelít a földgázéhoz,
- A pellet ára a tűzifa árának akár a kétszerese is lehet (2. táblázat),
- Nincsen megfelelő támogatási és ösztönző rendszere.

A következő táblázatban (2. táblázat) láthatjuk összehasonlítás képpen az egyes energiahordozók fajlagos árait. Ez a táblázat a 2012-es évre jellemző egységárak figyelembe vételével készült.

**2. táblázat.** Néhány energiahordozó energiatartalomra vonatkoztatott fajlagos ára  
(Forrás: Dr. Németh Gábor 2012. évi felmérések alapján)

Energiahordozó	Energiatartalomra vonatkoztatott fajlagos ár [Ft/MJ]	"Felhasználási" fűtőérték	Megjegyzés
Tűzifa	1,5-1,9	<12 MJ/kg	U>25-30 %
Apríték (erőművek esetén)	0,8-1,1	<12 MJ/kg	U>25-30 %
Fa brikett	2,5-3,5	17-18 MJ/kg	U<10 %

Energiahordozó	Energiatartalomra vonatkoztatott fajlagos ár [Ft/MJ]	"Felhasználási" fűtőérték	Megjegyzés
Fa pellet	2,6-4,5	17-18 MJ/kg	U<10 %
Szén (barnaszén)	1,9-2,3	18-28 MJ/kg	-
Földgáz	~3,8	34 MJ/m <sup>3</sup>	-
Benzin*	13-14	32-33 MJ/m <sup>3</sup>	-
Gázolaj*			

\*A táblázatban a benzint és gázolajat kizárólag összehasonlítás, érdekesség miatt szerepelttük!

2013. január 1-jével mintegy 10%-kal csökkent a villamos energia, a földgáz és távhő lakossági végfelhasználói ára, aminek hatására gáz ára közelít a pelletez (3. táblázat).

**3. táblázat.** Az árcsökkenés hatása az egyes energiahordozókra (saját számítás: 2013.01.01. után)

2013. januári állapot szerint	Átlagosan (Ft/MJ)	Átlagosan (Ft/kWh)
Gáz	4,18	15,05
Áram	12,5	45
Tűzifa	1,7-2,2	6,1-7,9
Pellet	3,8	13,68

Az előzetes intézkedési tervek szerint 2013. november 1-jétől újabb mintegy 10%-os rezsicsökkentés történt a lakossági villany, gáz és távhő végfelhasználói áraknál. Emellett tervezik csökkenteni a tűzifa és a szén lakossági árát is. Ezzel a gáz ára szinte a pellet árával lesz azonos, vagyis a 2012-es évre jellemző Energia Klub által prognosztizált 20%-os pellet felhasználási árelőny megszűnik a lakossági szektorban. A leírtak alapján láthatjuk, hogy jelentős korlátai vannak a pellet versenyképességének Magyarországon. A főbb kitörési lehetőségeket a következőkben foglalom össze JANCSÓ, 2013 alapján:

- Versenyképes ár a közületi szektorban
- Távfűtő művek részbeni átállása pellet tüzelésre
- Fapellet, agripellet, torrifikált pellet K+F+I támogatása
- Munkahelyteremtő intézkedések (pl. közmunka programok, melyek segítségével elérhetővé válhatnak egyes nyersanyagok)
- Gazdaságélénkítő, beruházásösztönző hatás biztosítása

A lehetséges fejlődési irányok JANCSÓ, 2013 alapján a következők:

**4. táblázat.** A pellet versenyképességének növekedését célzó lehetséges fejlődési irányok (JANCSÓ, 2013.)

Jelenlegi trendek	Lehetséges irányok
Gyengülő aktivitás	Beruházási környezet optimalizálása
Lassú fejlődés	Célzott finanszírozás
Nyersanyag és pelletgyártási problémák fennmaradása	Önkormányzati szerepvállalás
Forráshiány	K+F+I erőteljesebb támogatása
	Gyors ágazatfejlődés

Látható, hogy elég jelentős szerepet kap a megoldások kezelésében az állami támogató és ösztönző rendszer kialakítása, valamint a K+F tevékenységek támogatása. A továbbiakban bemutatom, hogy hogyan ítélik meg a hazai gazdasági szereplők a pelletálással összefüggő K+F tevékenységek fontosságát. Ezzel összefüggő marketingkutatások 2010-ben a TAMOP 4.2.1/B pályázat keretén belül valósultak meg, melyeket a témával összefüggésben a következőkben ismertetek röviden PAKAI, 2010 alapján.

*A kutatás módszere:* kvantitatív online kérdőíves megkérdezés és kvalitatív interjúk. A minta alapsokaságát tesztpiacként a faipari vállalkozások és azokkal kapcsolatban lévő szolgáltatók (üzletviteli tanácsadók, szakmai oktatással foglalkozók, szoftverfejlesztők, energetikában érintett vállalkozások, megújuló rendszerek forgalmazói) jelentették. A mintanagyság 146 vállalkozás. A minta területi megoszlása 16 megyére kiterjedt. A KKV-k aránya a mintában 85,9%. A hazai tulajdonú nagyvállalatok aránya 3%, a multinacionális cégeké pedig 11,1%. A válaszadók 40%-a Nyugat-dunántúli, 28%-a Pest megyében tevékenykedik.

**5. táblázat.** Az energetikai, környezetvédelmi kutatások fontossága (PAKAI, 2010)

	N	min.	max.	fontossági átlag	szórás	variancia
<b>II. Energetika-környezetvédelem</b>						
Cementkötésű hulladék	102	1	5	3,28	1,54	2,36
Gipszkötésű rost termékek	99	1	5	3,27	1,50	2,24
<b>Pelletálással összefüggő K+F kutatások támogatása</b>	109	1	5	<b>3,66</b>	1,45	2,12
Pelletálás, alapanyagok házasítása	99	1	5	3,48	1,42	2,01
Faforgácsolás energetikája	100	1	5	3,83	1,37	1,88
Napenergia hasznosítás	105	1	5	3,71	1,47	2,17

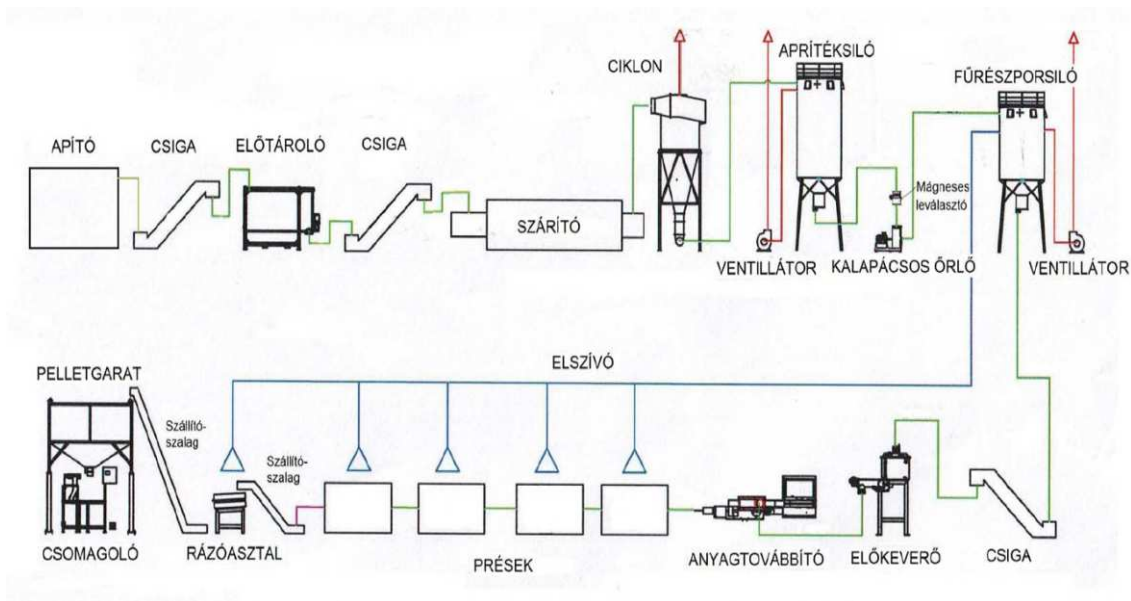
Látható, hogy a pelletálással összefüggő K+F tevékenységeket a hazai vállalatok (109 vállalat) a kiemelkedően fontos 5 pontból átlagosan 3,66 pontra (fontosnak) értékelték. *Érzelhető tehát, hogy nemzetközi és hazai szinten egyaránt fontosak a pelletálással összefüggő kutatások azon belül is a célzott alapkutatások.*

### 3. A PELLETTYÁRTÁS TECHNOLÓGIÁJA

Mielőtt rátérnék a pelletgyártás technológiájára fogalmazzuk meg, hogy mi is a pellet! Az irodalmak mind-mind sajátos definícióval jellemzik a pelletet, ezért egységes definíciót nem találunk rá. A főbb jellemzőket összefoglalva így is definiálhatjuk: *A pellet megfelelően aprított fa-, illetve mezőgazdasági anyagokból saját kötőanyag (lignin) felhasználásával nagy nyomáson préselt granulátum (saját meghatározás)*. Ez a definíció elsősorban a klasszikus értelemben vett fa- és mezőgazdasági alapú pelletekre vonatkozik. Mivel a pellet fogalmat a gyakorlatban ennél kiterjedtebben is alkalmazzák, ezért ez a meghatározás általánosabban így is megfogalmazható például helyesen az Idegen Szavak Gyűjteménye alapján: *„A pellet nagy nyomáson préselt szálak, rostos anyag, amelyet vagy saját anyaga, vagy belekevert kötőanyag tart össze. (pl. nyúltap)”*. A pelletgyártás technológiájának ismerete elengedhetetlen fontosságú az alapkutatások során kapott eredmények gyakorlatba történő átültetéséhez, értelmezéséhez. Az alapkutatásokból kapott eredmények képezik ugyanis az alapját a további alkalmazott kutatásoknak, melyre építhető egy adott technológia. A pelletgyártás technológiájának ismertetése után a saját korábbi kutatási eredményeimre hivatkozva a hazai pelletgyártásra jellemző általános energiamérleget is elkészítettem. Az energiamérleg alapján bemutatom azokat a helyeket a technológián belül, melyeknek jelentős az energiafelhasználása. Az eredmények alapján látni fogjuk, hogy az aprítás a préselés és esetenként a szárítás képezi ezeket a nagy energiafogyasztású helyeket, ezért a dolgozat témájával összefüggő alapkutatás fontossága energetikailag is meghatározó szerepet tölt be.

A pelletgyártás technológiáját az alábbi ábrán láthatjuk (6. ábra). A 6. ábrán egy komplett pelletáló gépsort mutatok be. A technológia első lépcsője az **aprító**, itt történik az alapanyag (anyagában már tovább nem hasznosított faanyag) aprítása, általában 50 mm élhosszúság alatti darabokra. Innen egy **csigás szállító** továbbítja a nedves, aprított alapanyagot az **előtárolóba**, ahonnan szabályozott módon kerül a szárítóba. A **szárító** a technológia egyik legfontosabb része, mivel a jó minőségű pellet előállításának egyik alapfeltétele az alapanyagtól függően 10-12 %-os nedvességtartalom beállítása. A szárítót elhagyó alapanyag nedvességtartalmát a szárító hőmérsékletével, illetve a bemeneti alapanyag tömegáramával lehet szabályozni.

A folyamatábrán bemutatott szárító direkt rendszerű, vagyis a szárítót fűtő kazán forró füstgáza közvetlenül érintkezik a nedves alapanyaggal, elpárologtatva belőle a nedvességet. A szárítón keresztül együtt áramló alapanyag és füstgáz a **ciklonba** jut, ahol a hirtelen lelassuló áramlás miatt szétválnak; a füstgáz távozik a rendszerből, a nehezebb száraz alapanyag a ciklon aljába kerül, ahonnan az **aprítéksilóba** jut. A silóból továbbhaladó anyaghalmoz átjut egy **mágneses leválasztón**, majd egy **kalapácsos utánaprító** megfelelő (0,5-1,5 mm) finomságú frakciókra aprítja a faanyaghalmozot. Ezután a pelletálásra alkalmas szemcseméretű apríték a fűrészporsilóban kerül. A következő művelet a **kondicionálás** (előkeverő), ahol szükség esetén adalékokat kevernek az alapanyaghoz, illetve ~70°C-os vízzel vagy gőzzel kondicionálják a jobb préselhetőség érdekében. Az előkeverőben homogenizált alapanyagot az anyagtovábbító a **présekhez** (matricákhoz) jutítja (BURJÁN, 2009).



**6. ábra.** A pelletgyártás technológiája (BURJÁN, 2009)

Közvetlenül a présgéphez jutás előtt általában még lehetőség van a nedvességtartalom finombeállítására, majd ezek után következik a pelletálás. Egy speciális szerszámon ún. matricán (7. ábra) préseljük át az alapanyagot. A matricán való átpréselés során keletkező magas nyomás (800-900 bar) és hőmérséklet (80-90°C) hatására a fa természetes kötőanyaga a lignin meglágyul, és a matricákba fűrt préslyukak alakjára és méretére formázza a pelletet. Jó minőségű pellet a szükséges présnyomás, és a megfelelő matricahőmérséklet elérése után állítható elő, így a gépeket lehetőség szerint folyamatosan kell üzemeltetni. Gyakran előfordul, hogy hirtelen leállás esetén a pellet „beesül” a matricába, és újraindításkor már nem tud kijutni belőle. Ilyenkor le kell állni és matricát cserélni, vagy kifűrni a beesült pelletet. Abban az esetben, ha a leállás (aminek feltétele, hogy tervezhető legyen) előtt természetes alapú olajat kis mennyiségben juttatunk a pellethez, akkor elkerülhető a besülés, ugyanis a pellet nem tud a nedvesség hatására beledagadni a „csőbe”, mert az olaj hatására hidrofób tulajdonsággal bír. Ezt a műveletet általában a műszak végi leállításkor alkalmazzák.



**7. ábra.** Pelletáló berendezés alapegysége: matrica és a görgők  
(Forrás: Bal oldali ábrarész: [BURJÁN, 2009]; a jobb oldali ábrarész: [NÉMETH et al., 2012])

A matricák leggyakrabban gyűrűs kialakításúak (7. ábra) vízszintes tengellyel, de léteznek függőleges tengelyű, korong kialakítású síkmatricákkal dolgozó pelletprések is. A matricát elhagyó forró pelletet egy kés a kívánt méretre darabolja (20-40 mm hosszúságúra). A

préségp elhagyása után a pelletet **hűteni** kell, hogy megfelelően szilárd legyen (ne törjön, ne morzsolódjon). A gyártás során keletkező morzsalékot, port egy elszívórendszer összegyűjti, és visszajuttatja a fűrészpor silóba. A lehűlt pellet áthalad egy **rázóasztalon**, ahol a port és a könnyen leváló morzsalékot kiszítálják a pelletalmazból. Innen a már a kész pellet a **csomagolóba** kerül, ahol 15-25 kg-os, vagy Big-bag (500-1000 kg) zsákokba csomagolják, esetleg ömlesztve továbbítják.

A következő táblázatban (6. táblázat) összefoglalóan láthatjuk a fapellet általános fizikai jellemzőit az előírt követelményeknek megfelelően.

**6. táblázat.** A fapellet általános jellemzői  
(Forrás: saját feldolgozás)

Méretek	átmérő: 6-10 mm hosszúság: 20-40 mm
Fűtőérték (energiatartalom):	16,5-18 MJ/kg (4,7-5,0 kWh/kg) kb. 3 MWh/ ömlesztett m <sup>3</sup>
Nedvességtartalom:	10-12%
Hamutartalom:	<1% alatt
Alapanyagok:	fűrészpor, faforgács
Ömlesztett sűrűség:	600-650 kg/m <sup>3</sup>
Pellet sűrűség:	1050-1200 kg/m <sup>3</sup>
Helyigény:	kb. 1,5 m <sup>3</sup> /t
Összehasonlítás más fűtőanyagokkal közelítőleg:	1 m <sup>3</sup> könnyű fűtőolaj ~ 2,1 t pellet 1 t könnyű fűtőolaj ~ 2,5 t pellet 1 m <sup>3</sup> ömlesztett faapríték ~ 0,28 m <sup>3</sup> pellet ~ 0,18 t pellet 1 m <sup>3</sup> földgáz ~ 2 kg pellet

A táblázatban összefoglalt adatok szabványokban (pl. ÖNORM, DINplus, ENplus) és tanúsítási rendszerekben előírt követelmények alapján kerültek meghatározásra. A következőkben tekintjük át a teljesség igénye nélkül a fontosabbnak ítélt pelletekkel összefüggő szabványokat és tanúsító rendszereket.

- MSZ EN 14778: Szilárd bio-tüzelőanyagok. Mintavétel
- MSZ EN 14780: Szilárd bio-tüzelőanyagok. Minta előállítás
- MSZ EN 14961-1:2010: Szilárd bio-tüzelőanyagok. Tüzelőanyag-előírások és -osztályok – 1. rész: Általános követelmények
- MSZ EN 14961-2:2010: Szilárd bio-tüzelőanyagok. Tüzelőanyag-előírások és -osztályok – 2. rész: fapellet nem ipari használatra
- MSZ EN 15103: Szilárd bio-tüzelőanyagok. A térfogatsűrűség meghatározása.
- MSZ EN 15210-1: Szilárd bio-tüzelőanyagok. A pelletek és brikettek mechanikai hatással szembeni ellenálló képességének meghatározása - 1. rész: Pellet
- MSZ EN 15234-1: Szilárd bio-tüzelőanyagok. A tüzelőanyagok minőségbiztosítása – 1. rész: Általános előírások
- MSZ EN 15234-2: szilárd bio-tüzelőanyagok. A tüzelőanyagok minőségbiztosítása – 2. rész: Fapelletek nem ipari használatra
- MSZ EN 16127: Szilárd bio-tüzelőanyagok. A pelletek hosszúságának és átmérőjének meghatározása



- EN 14588: Szilárd bio-tüzelőanyagok. Terminológia, fogalom meghatározások és kulcsszavak leírások
- ISO 3310-1 (2000): Vizsgálósziták. Műszaki követelmények és vizsgálatok. - 1.rész: Fémhuzal szövetű vizsgálósziták
- ISO 3310-2 (2000): Vizsgálósziták. Műszaki követelmények és vizsgálatok. - 2.rész: Perforált lemezes vizsgálósziták
- ÖNORM M 7135 (2000): Természetes állapotú tömörített fa és kéreg - Fapellet. Követelmények és vizsgálati specifikációk
- ÖNORM M 7136 (2002): Természetes állapotú tömörített fa - Fapellet. Szállítás és tárolás minőségbiztosítási területei.
- ÖNORM M 7137 (2003): Természetes állapotú tömörített fa - Fapellet. Fogyasztókat érintő pellet tárolási követelmények
- ENplus (2011): Európai Pellet Tanács. Fűtés céljára szolgáló fapellet tanúsítási eljárásának kézikönyve

Látható, hogy a fapelletek esetén Európában és hazánkban számos szabvány (például az MSZ EN 14961-2, mely a fapellet nem ipari felhasználásáról szól) és tanúsítási rendszer (ilyen a pellet minőségi tulajdonságait lefektető ENplus, mely az EN 14961-2 szabványon alapul ugyan, de számos pelletáláshoz és annak tulajdonságához köthető szabványon is megjelenik benne) fogalmazódott meg.

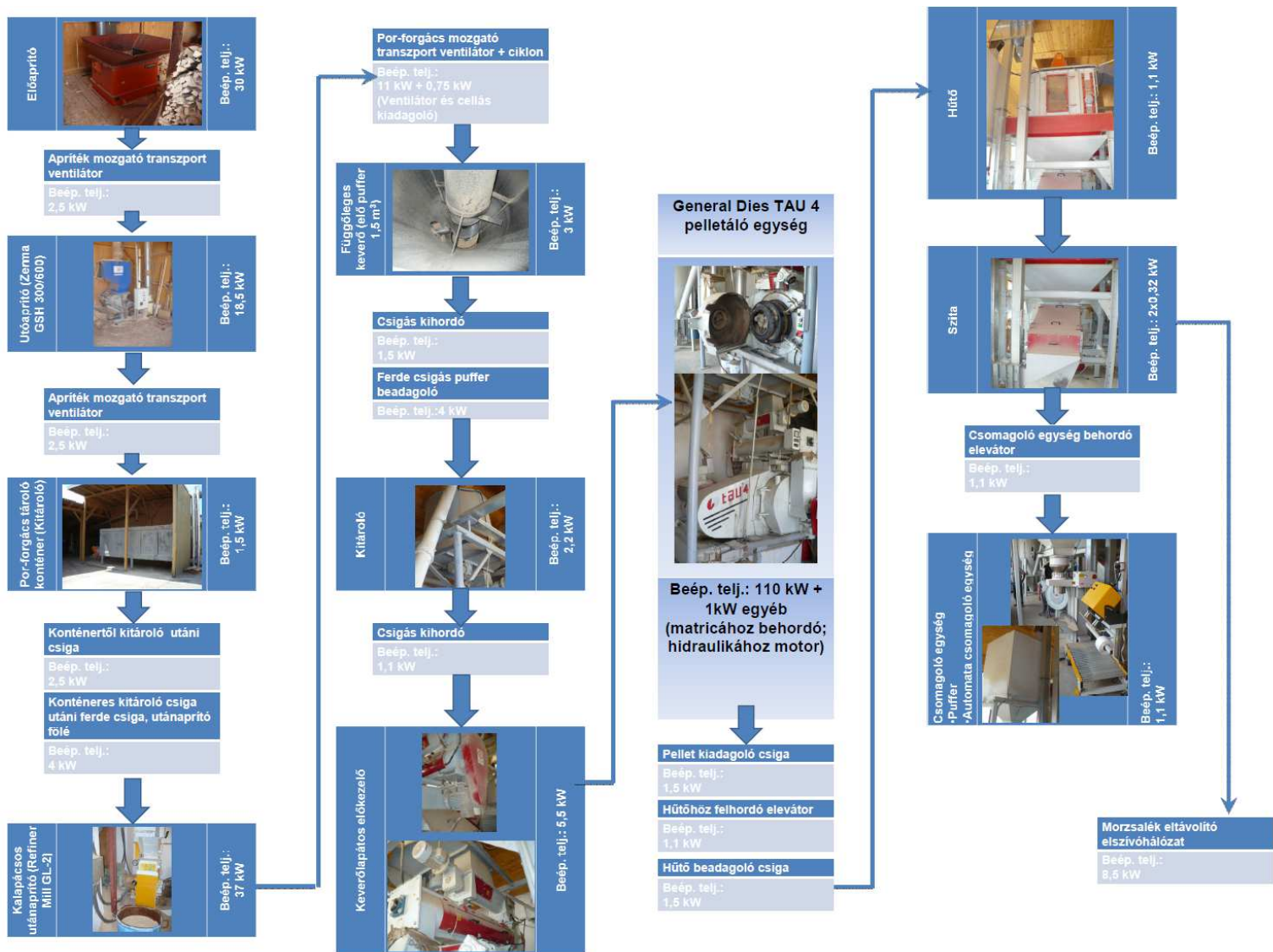
*A dolgozatnak nem célja az egyes szabványok elemzése, értelmezése ezért nem foglalkozik tovább a pellet EU-s platformra illesztett tanúsítási rendszerével. Azt viszont megállapíthatjuk, hogy az egyre szigorodó követelmények nehezebb feladatokat rónak a gyártókra, ami negatívan hat a pellet piaci versenyképességére.*

### 3.1.A PELLETTYÁRTÁS ENERGIAMÉRLEGÉNEK ELEMZÉSE

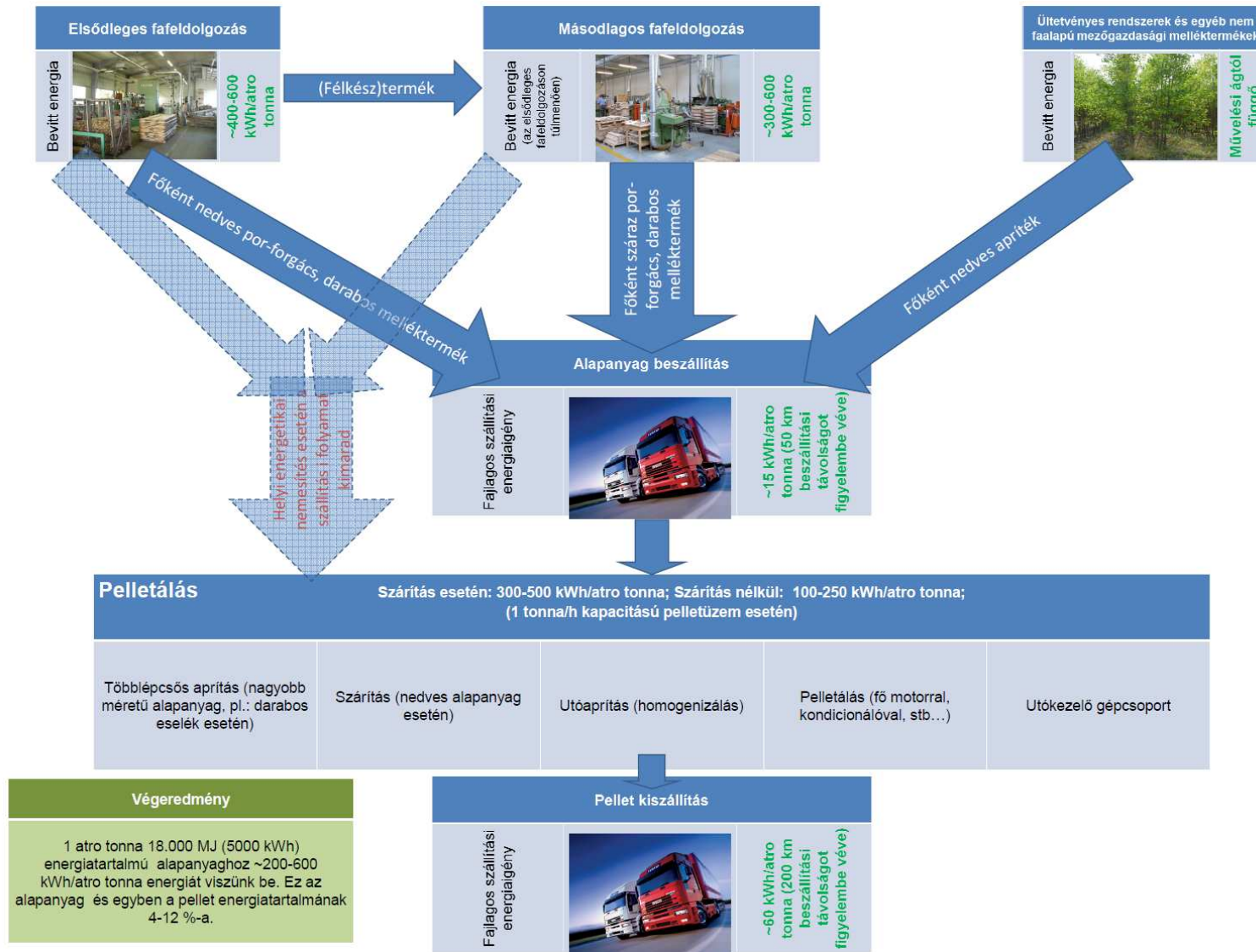
Mint láthattuk a különböző biomassza hulladékokból nagy nyomáson történő tömörítési eljárásokkal, kötőanyag nélkül állíthatunk elő nagy fűtőértékű, a tűzifánál nagyobb energiasűrűségű energetikai alapanyagot, pelletet. A leggyakoribb alapanyagoknak a faalapú por-forgácsok tekinthetők. A gyártás során természetesen energiát kell bevinnünk az egyes technológiai berendezések működtetése miatt. A bevitt energiát nagymértékben befolyásolja többek között az alapanyag fajtája, nedvességtartalma és az alapanyag szemcseösszetétele. *Ezzel összefüggésben a korábbi kutatásai eredményeinket a következőkben ismertetem röviden.*

A pelletálás átlagos villamos energiaszükséglete kutatásaink alapján (NÉMETH et al., 2012) 100-250 kWh/tonna (360-900 MJ/tonna). Szárítás esetén ez természetesen kiegészül a szárítási hő előállításához szükséges energiával. Abban az esetben, ha például 30-35%-os nedvességtartalmú alapanyagot kell leszáritani 10-12%-ra, akkor ehhez 250-300 kWh/tonna (900-1080 MJ/tonna) hőmennyiség szükséges, melyet például földgáz vagy saját apríték felhasználással állíthatunk elő. Ha az alapanyag nedvességtartalma 50% körül van, akkor ehhez mintegy 600-660 kWh/tonna villamos energiafelhasználás társul (2160-2380 MJ/tonna). Nagyon fontos a pelletálásra kerülő frakciók helyes nedvességtartalmának (10-12%) a beállítása, különben az alábbi problémákkal kell szembenéznünk: Magas nedvességtartalom esetén ( $u > 14\%$ ) a préseles után felhasad a pellet palástja, töredezett lesz. Amennyiben alacsony a nedvességtartalom ( $u < 8\%$ ) nem tud összeállni a pellet, könnyen morzsolódik. Természetesen ezekhez a költségekhez adódik még egyéb rezsiköltség, karbantartási költség, bérköltség, logisztikai költség, stb. Pelletálás esetében a tonnánkénti termelési önköltség elérheti a 20-28.000 forintot is, mely a gazdaságos termelési minimum (1-2 tonna/óra) előállítás esetén igaz (természetesen alapanyagár, energiaárak és energiafelhasználások jelentősen módosíthatják a kiadásokat). A gyártási költségek csökkenthetők oly módon, ha saját faipari termelésünkből rendelkezésre áll az alapanyag, hiszen ilyen esetben értelemszerűen nem kell az alapanyagot megvásárolni, és ha pl. bútorigipari melléktermékünk van, akkor azt szárítanunk sem kell. A logisztikai költségek is mérsékelhetők, ha egy optimális távolságú (30 km) alapanyag beszerzési körzetet tudunk biztosítani. A gazdaságossági kérdésekkel kapcsolatosan nem szabad elfeledkeznünk a 2.2. fejezetben leírtakról sem.

A következőkben a saját kutatási eredményeinként közölt általános folyamatábrákon mutatom be egy hazai 1 tonna/óra termelési kapacitású példán keresztül a pelletgyártásra jellemző technológiai és logisztikai folyamatokat és azok költségvonzatait. Hangsúlyozni kell, hogy az itt bemutatott folyamatmodellekben szereplő technológiai részegységek változhatnak a különféle pelletgyártással foglalkozók körében, de az értékelés szempontjából nem befolyásolják jelentősen a kapott eredményeket. Ilyen termelési volumen mellett az energiafelhasználási arányokat jól tükrözi a következőkben bemutatott folyamatmodell. *A témával összefüggő további publikációk megtekinthetők a dolgozat végén lévő publikációs jegyzékben (KOC SIS, 2013; KOC SIS, 2012; NÉMETH, 2012)*



8. ábra. Magyarországi 1 tonna/óra kapacitású pelletgyártásra jellemző általános technológiai folyamatára (NÉMETH et al., 2012)



9. ábra. Magyarországi 1 tonna/óra kapacitású pelletgyártásra jellemző általános logisztika folyamatára (NÉMETH et al., 2012)

**7. táblázat.** Egy hazai pelletgyártó technológiai egységeinek beépített teljesítmény igénye 1 tonna/óra termelési kapacitás mellett (Forrás: Saját kutatási eredmények)

Technológiai egység megnevezése	Beépített teljesítmény (kW)	Megoszlás (%)
Előaprító	30	11,87
Apríték mozgató transzport ventilátor	2,5	0,99
Utánaprító	18	7,12
Apríték mozgató transzport ventilátor	2,5	0,99
Por-forgács kitároló csigasor	8	3,16
Kalapácsos utánaprító	37	14,64
Por- forgács mozgató transzport ventilátor	11	4,35
Bolygatómű + csigás kiadagoló	8,5	3,36
Kitároló + csigás kiadagoló	3,3	1,31
Keverőlapátos előkezelő (kondicionáló)	5,5	2,18
<b>Pelletprés</b>	<b>110</b>	<b>43,51</b>
Kiadagoló csigasor	1,5	0,59
Hűtőkörhöz felhordó elevátor	1,1	0,44
Hűtőkörhöz beadagoló csigasor	1,5	0,59
Hűtő	1,1	0,44
Rázóasztal	0,6	0,24
Csomagoló egységhez behordó elevátor	1,1	0,44
Automata csomagoló egység	1,1	0,44
Morzsalék eltávolító elszívó hálózat	8,5	3,36
<b>ÖSSZESEN</b>	<b>252,8</b>	<b>100</b>

A 7. táblázatban összefoglalva láthatjuk a 8. ábrán bemutatott technológiai egységek beépített villamos teljesítmény igényeit. Természetesen ezek maximális beépített teljesítmény értékek, amelyek a terhelés (motorok kiterheltség) és a működési idő függvényében változnak, tehát az 1 tonna/óra termelési kapacitásra jellemző villamos energiaigény technológiától függően felméréseink alapján 100-250 kWh között változik a gyakorlatban. Látható, hogy a villamos energia felhasználáson belül a préseles energiaigénye első helyen van. Ha a logisztikai költségeket (beszerzési és szállítási költségek) is figyelembe vesszük (9. ábra) akkor a pelletgyártási folyamatra jellemző összköltség 55-65%-át is kitehetik. A 2013. novemberi adatok alapján egy 10 tonna/műszak (200 tonna/hó) kapacitású pellet üzem esetében 1 kg fapellet átlagos ára nettó 55 Ft. Ehhez mintegy nettó 30 Ft logisztikai költség társul. A fennmaradó 25 Ft-ból kell a termeléssel összefüggő költségeket fedezni, ami átlagosan 20 Ft-ba kerül. Tehát ilyen termelési volumen mellett mintegy 5 Ft/kg haszonnal lehet kalkulálni.

Fajlagos mutatók meghatározása:

1. Az eredményeket a könnyebb összehasonlítás végett vonatkoztatassuk át tonnára: Tehát 1 átro tonna (abszolút száraz) 18.000 MJ (5000 kWh) energiatartalmú alapanyaghoz ~200 (szárítás nélkül) - 600 (szárítással) kWh/átro tonna energiát viszünk be. Ez a pellet energiatartalmának csupán a 4-12 %-a (EROEI szám<sup>2</sup>: 8-25). Azok az állítások, tehát, hogy több energiára van szükség az előállításához, mint amennyit tartalmaz a pellet, igencsak távol állnak a valóságtól, még akkor is, ha az

<sup>2</sup> EROEI (Energy Returned On Energy Invested) szám: A kinyert-, és a bevitt energia hányadosából meghatározott érték. Minél nagyobb ez a szám, annál kedvezőbb az energiamérleg.

alapanyag beszállítás, és a késztermék kiszállításának energiaköltségét is figyelembe vesszük, ésszerű határokon belül (max. 200 km).

#### 4. A DOLGOZAT TÉMÁJÁVAL ÖSSZEFÜGGŐ SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A faanyagok a különböző technológiai folyamatok során (feldolgozás, aprítás, pelletálás, brikettálás stb.) szinte minden esetben mechanikai erőhatásnak vannak kitéve. Ebből következik, hogy az alkalmazott technológiáknál az anyagok mechanikai szilárdsága (nyomó, húzó- és nyírószilárdság) fontos szerepet játszik. A faanyagok ún. viszkoelasztikus anyagok, amelyek különböző képen viselkednek statikus húzó-, vagy nyomóerők, dinamikus terhelés vagy ismétlődő dinamikus terhelés (vibráció) hatására (CARLOS, 2010). A faanyagok összenyomásának energiaszükséglete is változik, attól függően, hogy az erőhatás statikus vagy dinamikus. A viszkoelasztikus anyagoknál a feszültség és a deformáció között nincs egyértelmű kapcsolat, mivel a deformáció függ az időtől is (kúszás). Az anyagok rugalmassági modulusa nem állandó, hanem általában a deformációval csökken, tömörítéskor pedig növekszik (SITKEI, 1994). A faanyagok esetében a deformáció és a kúszás nemcsak az erőhatástól (feszültségtől) függ, hanem az időtől is. Az ilyen anyagokat rheológiai anyagoknak nevezzük. A rheológia tárgya tehát az anyagok erő hatására bekövetkező deformációjának a vizsgálata, az időhatás figyelembevételével. A faanyag viselkedését ebben az esetben három változó határozza meg: a feszültség ( $\sigma$ ), a deformáció ( $\varepsilon$ ) és az idő ( $t$ ) (TÓTH, 2000). A faanyag sajátossága, anatómiai felépítése is jelentős hatással van a  $\sigma - \varepsilon - t$  viszony mechanikai és rheológiai tárgyalására, mivel a faanyag a fent említetteken kívül egy inhomogén és anizotrop tulajdonsággal is rendelkezik ellentétben pl. a fémekkel. Ezért fontos ismernünk, hogy miből is épül fel ez a csodálatos természet adta anyag, a fa.

*A következő alfejezetben röviden tárgyalom a faanyag anatómiai felépítését, mely ismeretanyag szükséges a későbbiekben tett magyarázatok megértéséhez.*

##### 4.1. A FAANYAG ANATÓMIAI FELÉPÍTÉSE

A faanyag ősidők óta az emberiség egyik legkedveltebb, igen sokoldalúan felhasználható, természetes eredetű anyaga. Az elmúlt évszázadok folyamán, de különösen századunkban sok tudományos ismeret halmozódott fel a természetes faanyaggal és a faalapú anyagokkal kapcsolatban. Ezek azonban sajnos csak igen kis szakmai közösség birtokában vannak, aminek az a következménye, hogy még azok is, akik munkájukat a faanyaggal, faalapú anyagokkal kapcsolatos területeken végzik, általában igen egyszerű, sokszor kezdetleges anyagmodelleket alkalmaznak.

Az élő fa anyaga biológiai növekedés eredménye, így a természetes faanyag fizikai mechanikai tulajdonságai igen sok tényező (genetikai hatások, a növekedés külső és belső körülményei; talaj, éghajlat stb.) együttes hatásának következtében alakulnak ki. A faanyag alapvető tulajdonságait azonban elsősorban az őt alkotó kémiai anyagok szerveződése, struktúrája határozza meg. A faanyag kémiai összetevői, (melyek a sejtfal főbb alkotóelemei) a cellulóz a hemicellulózok (fapoliózok) és a lignin, míg az elemi összetevők a szén, az oxigén és a hidrogén. Az utóbbiak részaránya 50%, 44% és 6% körül alakul fajfajtól függően. A sejtfalat alkotó kémiai elemek részarányában a különböző fajoknál nincs jelentős eltérés. Találhatók ezen kívül igen kis mennyiségben fémek (B, Mn, Cr, Fe) és nemfémek (N, P, S) elemek, extrakt anyagok (sók, olajok), de ezeknek a szilárdságra gyakorolt hatása azonban kicsi. A sejtfalat alkotó elemek bonyolult szerves vegyületeket alkotnak. Ezek két nagy csoportja a poliszacharidok és a lignin. A szilárdítás szempontjából az egyik legfontosabb poliszacharid a cellulóz, amely meghatározza a sejtfal alapszerkezetét. Mennyisége lombos

fáknál 45%, fenyőféléknél 41% körül mozog. A cellulóz a fotoszintézis végtermékeként keletkező glukóz (szőlőcukor) molekulák polimerizációjával jön létre. A sejtfal alkotóelemeinek mintegy 25-30%-át teszi ki a hemicellulóz, amely két fajta szénhidrátból - lombos fáknál pentózokból (főleg xilózból), fenyőféléknél hexózokból (főként mannózból) - épül fel. A hemicellulóz fonalmolekulái rövidebbek a cellulóznál és kémiai ellenálló képessége is kisebb a cellulóznál. A hemicellulóz képes lebomlani az élő növényi szervezetben, ezért tartalék tápanyagként is funkcionál, majd az elfásodás során beépül a sejtfalba. Viszonylag kis mennyisége ellenére fontos szerepe van a sejtek összekapcsolásában, összeragasztásában a pektinnek is. A sejtfal harmadik igen fontos anyaga a lombos fáknál kb. 22%-ot, a tűlevelűeknél kb. 28%-ot kitevő lignin. Ez egy háromdimenziós polimer, amely főként három fajta fenolmolekula változatos összekapcsolódásának eredménye (MOLNÁR, 1999). A lignin a sejtfal mechanikai ellenálló képességét növeli, és alapvetően ez határozza meg a sejtfal mechanikai tulajdonságait. A sejtfalban található ezen kívül még kísérőanyagok (terpének, éterikus olajok, gyantasavak, zsírok, viaszok, cserzőanyagok, alkaloidák stb.), valamint ásványi anyagok, melyek szilárdításra gyakorolt hatása csekély. Ezek mennyisége már erősen fafajfüggő, de általában 2-5% körül van. A cellulóz molekulák által alkotott vázrendszer a betétanyag, amely az amorf szerkezetének tekinthető hemicellulóz és lignin részecskék közé ágyazódik be. A sejtfal összes cellulózájának 60-70%-a alkot kristályos szerkezetet. A kristályos szerkezetű cellulózt *micellának* is nevezik (KOLLMANN, 1951; KOLLMANN, 1959). Amorf jellegű a hemicellulóz és a lignin.

A fatestben a törzs hossz tengelyével párhuzamosan helyezkednek el azok a hosszúra nyúlt sejtek, amelyek a függőleges irányú tápanyag- és vízellátást végzik, fenyőféléknél a tracheidák (Lsd. függelék 119. ábra), lombosoknál főként az edények (tracheák). A függőleges irányú szilárdítás feladatát látják el, fenyőféléknél a tracheidák, lombosoknál elsősorban a libriform rostok (farostok) (Lsd. függelék 114. ábra). Ezek a sejtek teszik ki a fatest anyagának 70-90%-át. Ezeken kívül vannak még raktározó ún. parenchimatikus elemek is (hosszparenchima és bélsugár parenchima).

Összefoglalóan láthattuk a faanyag anatómiai felépítését, vagyis hogy vannak elemi szálak (micellák), melyek egy lignin mátrixba ágyazódnak és közöttük a kapcsolatot a hemicellulóz teremti meg. A faalapú por-forgács halmazok nagynyomáson történő tömörödésének mechanikájában tehát jelentős a szerepe az eltérő szilárdságú faanyagok (fenyő és akác) anatómiai felépítésének. A fának ebből a makro-molekuláris, kristályos és amorf jellegű összetételéből eredeztethetőek ezek a rheológia és mechanikai viselkedések, amelyekkel kapcsolatos kutatási eredményeimet a 8. fejezetben ismertetem.

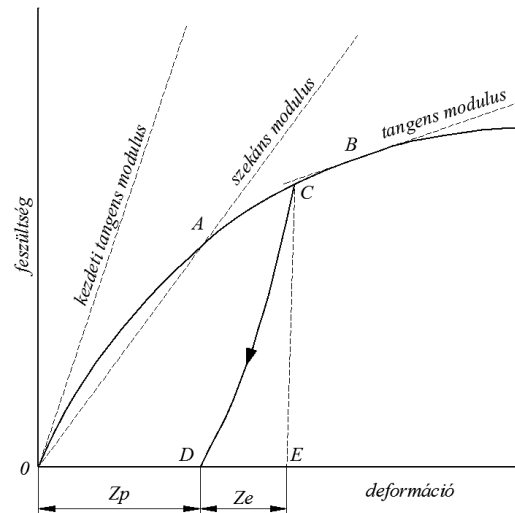
#### 4.2.A FAANYAG, MINT VISZKOELASZTIKUS ANYAG, RHEOLÓGIA ALAPOK

A faanyagok jellegzetes felépítéséből adódóan a rheológiai tárgyaláshoz szükséges néhány fogalom és definíció bevezetése, amelyek a közönséges rugalmas testek mechanikájában nem szokásosak.

*Ezek a következők:*

- *A biológiai folyáspont:* A feszültség-deformáció görbéjének azon pontja, ahol a deformáció növekedésekor a feszültség csökken, vagy állandó marad. Ez a pont azt jelzi, hogy a sejrendszer kis térfogatában kezdeti törés jelentkezik.
- *A töréspont:* A feszültség-deformáció görbe azon pontja, ahol a deformáció növekedésekor feszültség meredeken és jelentős mértékben csökken. A pont azt jelzi, hogy az anyag jelentős térfogatában törés következik be.

- *Merevség:* Az anyag merevségét a feszültség-deformáció görbe kezdeti, többé-kevésbé egyenes szakaszának iránytangensével (meredekségével) jellemzik. Ez nem más, mint a rugalmassági modulus. Amennyiben a görbe kezdeti szakasza sem lineáris, használható a kezdeti tangens modulus, a szekáns modulus és egy adott ponthoz tartozó tangens modulus (10. ábra).



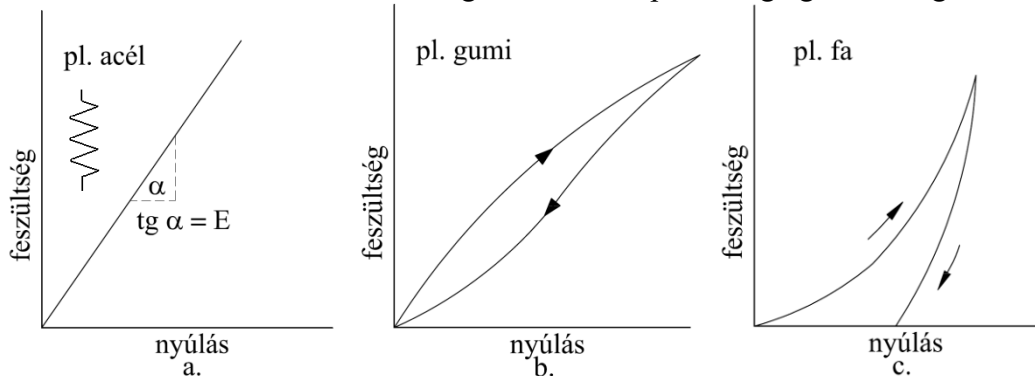
10. ábra. Az alapfogalmakhoz tartozó magyarázóábra (SITKEI, 1981)

- *Rugalmassági fok:* A rugalmas deformáció viszonya a teljes deformációhoz, amikor az anyagot egy bizonyos értékig terhelik, majd tehermentesítik.
- *Szívósság:* A szívósságot a töréspontig befektetett munkával jellemezhetjük ( $\text{Nm/m}^3$ ), amely a görbe alatti területtel azonos.
- *Keményység:* Az anyag ellenálló képessége egy adott nyomófej behatolásával szemben.
- *Deformációs munka:* A faanyag képes deformációs energiát tárolni a rugalmassági tartományban ( $\text{Nm/m}^3$ ). Ha a deformáció rugalmas, akkor a deformációs munkát a feszültség-deformáció görbéje alatti terület adja. Ha a deformáció nem rugalmas, akkor a terhelés-tehermentesítési ciklus felvételével határozható meg. (10. ábra, a CD tehermentesítési görbe alatti terület.)
- *A mechanikai hiszterézis:* Az anyag által abszorbeált (elnyelt) energia a terhelés-tehermentesítési ciklusban. Az elnyert energia egyenlő a görbék közötti területtel. A mechanikai hiszterézis a faanyag csillapítási képességét is jellemzi.
- *Az energia visszanyerés:* A tehermentesítéskor visszanyert energia viszonya a terheléskor befektetett energiához.

A rheológia tárgyalásának megkönnyítése és áttekinthetősége céljából az anyagokat célszerű bizonyos alaptulajdonságok alapján csoportokba osztani. Az anyagok széles körű vizsgálata azt mutatta, hogy az elaszticitás (rugalmasság) a plaszticitás és a viszkozitás a három alapvető tulajdonság, amellyel az anyagok rheológiai viselkedését jellemezni lehet. A három ideális testet, amelyek ezeket a tulajdonságokat mutatják, sorban *Hooke-testnek* (elasztikus tulajdonság), *Saint-Venant-testnek* (plasztikus tulajdonság) és *Newtoni folyadéknak* (viszkózus tulajdonság) nevezzük (MÓZES, 1968). A valóságos anyagok sohasem tökéletesen rugalmasak vagy plasztikusak, ezért a három ideális test, mint etalon, összehasonlítási alapot szolgál esetünkben a faanyagok megítélésékor. Az ideális rugalmas test viselkedését a 11/a. ábra mutatja. A feszültség egyenesen arányos a nyúlással (szimbóluma a Hooke-test rugó elem), amelyet a jól ismert Hooke-törvény fejez ki. A feszültség megszűntetésekor az anyag nyúlása teljesen megszűnik, és a tehermentesítés ugyanazon a vonal mentén történik, mint a terhelés (11/a. ábra). Az ilyen viselkedést *lineáris*



*elaszticitásnak* nevezzük. A gumi a tehermentesítéskor visszanyeri eredeti alakját, azonban a görbe nem lineáris (11/b. ábra). Ebben az esetben *nem-lineáris elaszticitásról* beszélünk. A faanyagok - mint *nem-lineáris viszkoelasztikus anyagok* - kompresszió-vizsgálata azt mutatta, hogy ezek az anyagok még egészen kis nyúlásoknál sem rendelkeznek a Hooke-féle rugalmassági tulajdonságokkal (SITKEI, 1981, TÓTH, 2000). A tehermentesítés végén mindig visszamarad egy bizonyos értékű deformáció (maradó deformáció) (11/c. ábra). A maradó deformáció mértéke határozza meg esetemben a pellet végleges sűrűségét.



**11. ábra.** A testek viselkedése terhelés és tehermentesítés során (SITKEI, 1981)

A rugalmas testekre az alábbi alapvető összefüggések érvényesek. Húzás vagy nyomás esetén a rugalmassági modulus ( $E$ ) a Hooke-törvény értelmében az alábbi alakban írható fel:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

ahol:  $\varepsilon$  a fajlagos alakváltozás (%), kifejezése:  $\varepsilon = \Delta l / l$ . „ $l$ ” a kiindulási hossz (mm); „ $\Delta l$ ” a terhelés hatására bekövetkező méretváltozás (mm).

Csavaró igénybevétel esetén az adott keresztmetszet  $\theta$  szöggel fordul el, és a csúsztató rugalmassági modulus ( $G$ ) értéke:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

ahol:  $\gamma = \text{tg}\theta$ ;  $\tau$  – a nyírófeszültség, ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

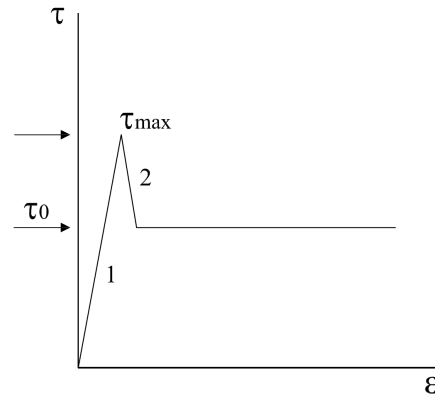
A fenti modulusok között, a *Poisson-tényező* ( $\nu$ ) figyelembevételével, az alábbi összefüggések állnak fenn:

$$E = 2G(1 + 2\nu) \quad (3)$$

A legtöbb anyag *Poisson-tényezője* (oldalnyomás tényezője) 0,2 és 0,5 között változik. A  $\nu=0,5$  érték a folyadékokra és a gumira jellemző, és azt jelenti, hogy zárt térben a vízszintes nyomás a függőleges nyomással azonos. A másik szélső esetben, vagyis amikor  $\nu=0$ , ilyen például a parafa.

Az ideális plasztikus test (Saint-Venant-test) feszültség-deformáció diagramját a 12. ábrán látjuk. Ha a plasztikus testre a  $\tau_0$  határfeszültségnél kisebb hat, akkor alakváltozás nem jön létre. A határfeszültséget elérve az alakváltozás minden határon túl növekszik. Eszerint az anyag mindaddig nem folyik, amíg a nyírófeszültség a folyási feszültséget el nem éri. Ennél nagyobb feszültséget azonban az anyag nem tud felvenni és a feszültség hatására a folyás mindaddig tart, amíg valamilyen zavaró hatás meg nem szünteti. Fontos megjegyezni, hogy a jelenség nem írható le az idő függvényében, ezért a sebesség fogalma itt nem értelmezhető. Az alakváltozás létrejötté csupán a feszültségtől függ. A gyakorlatban a plasztikus test

viselkedését a súrlódó test viselkedéséhez hasonlíthatjuk (pl. plasztikus jelenség a törés a Mohr-féle törési elmélet szerint, vagy a földrengés, mivel nem az idő függvényében zajlik le, ezért időben előre jelezni lehetetlen). A súrlódó felületre helyezett test mindaddig nem mozdul, míg a rá ható erő a statikus súrlódási erőt le nem győzi. Amint a test elmozdul, csak az állandó értékű mozgásbeli súrlódást kell legyőzni. A feszültség megszüntetésekor az anyag folyása megszűnik, eredeti helyzetébe azonban nem tér vissza, hanem ott marad, ahol a feszültség megszűnése pillanatában volt (ZANA, 2009).



**12. ábra.** Ideális plasztikus test viselkedése (ZANA, 2009)

A plasztikus elem szokásos ábrája két olyan szakaszt is tartalmaz, amely nem jellemző a plasztikus viselkedésre.

1. Nullától a maximumig kell növekednie a feszültségnek, hogy a plasztikus folyás elinduljon
2. A plasztikus folyás fenntartásához a feszültségnek vissza kell esnie a  $\tau_0$  határnyíró feszültségre.

Ahhoz, hogy ez valóban csak a plasztikus tulajdonságot fejezze ki, az 1. és 2. ferde szakaszoknak bele kell simulniuk a függőleges tengelybe. Tehát az ábrán látható modell csak akkor válik plasztikussá, ha az  $E_1$  és  $E_2$  rugalmassági modulusok végtelen nagyok válnak.

*Az ideális viszkózus folyadék (Newtoni folyadék) áramlása* rögtön megindul, amint a nyírófeszültség hatása alá kerül. A folyadékokban a deformáció nemcsak a feszültség függvénye, hanem bizonyos mértékben az idő is.

Lamináris áramlásnál a sebesség gradiense ( $dv/dy$ ) a következőképpen fejezhető ki:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{1}{\eta} \tau \quad (4)$$

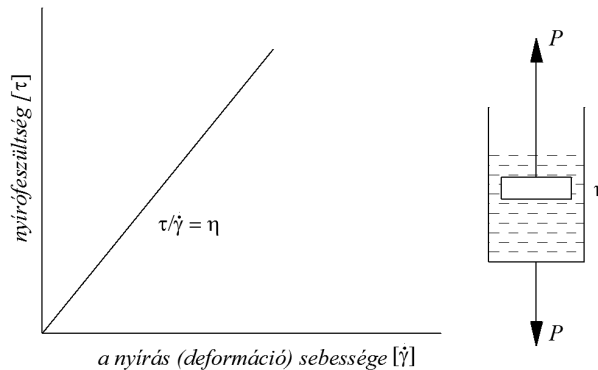
ahol:  $\eta$  – a folyadék dinamikai viszkozitása, (Pa.s)

$\tau$  – a nyírófeszültség, (N/mm<sup>2</sup>)

A sebesség gradiense itt tulajdonképpen a deformáció sebessége. Alkalmazva a  $dv/dy = \dot{\gamma}$  jelölést, a jól ismert Newton-féle összefüggést kapjuk, amelyet grafikusán a 13. ábra is szemléltet:

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta \quad (5)$$

A Newtoni folyadék mechanikai modellje a hidraulikus csillapító elem (lengéscsillapító) (13. ábra), amely hasonlóan viselkedik; a  $P$  erő arányos az elmozdulás sebességével.



**13. ábra.** Az ideális viszkózus test modellje (SITKEI, 1981)

A viszkozitás a hőmérséklettől lényegesen függ és a hőmérséklet növekedésével csökken. A valódi lengéscsillapítóknak áramlási veszteség lép fel, amely a sebesség négyzetével arányos. A viszkózus elem szimbóluma a sebességgel arányos modellre utal (HOFKO, 2008).

#### 4.3.A FAANYAG, MINT VISZKOELASZTIKUS ANYAG RHEOLÓGIA ÖSSZEFÜGGÉSEI

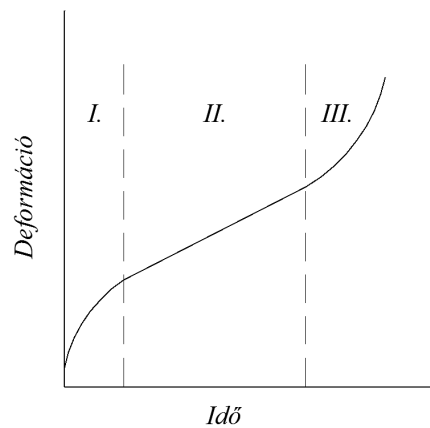
A faanyag viselkedése kisebb vagy nagyobb mértékben mindig eltér az ideális anyagok viselkedésétől. Korábbi kutatások megállapították, hogy a feszültség ( $\sigma$ ) – deformáció ( $\varepsilon$ ) összefüggés a deformáció sebességétől is függ (SITKEI, 1981). Ez azt jelenti, hogy nem két tényező ( $\sigma$ ;  $\varepsilon$ ) között, hanem három tényező ( $\sigma$ ;  $\varepsilon$ ;  $t$ ) között kell összefüggést keresnünk. Az olyan anyagokat, amelyeknél az időhatással is számolnunk kell, *viszkoelasztikus anyagoknak* nevezzük (BIOT, 1954). Ezek az anyagok részben a szilárd testek (Hooke-rugó), részben pedig a folyadékok (Newtoni folyadék) tulajdonságaival rendelkeznek. Egyes anyagoknál és viszonylag kis terheléseknél a feszültség és deformáció viszonya egyedül az idő függvénye, de a feszültség nagyságától nem függ. Az ilyen anyagokat *lineáris viszkoelasztikus anyagoknak* nevezzük (FINDLEY, 1976). A faanyagok esetében azonban a terhelés okozta deformáció nagy része a tehermentesítés során nem nyerhető vissza, vagyis a feszültség-deformáció viszonya az idő mellett a feszültség nagyságától is függ. Ilyenkor *nem-lineáris viszkoelaszticitásról* beszélünk (SITKEI, 1981). A nem-lineáris viszkoelaszticitás általános elmélete ma még nincs kidolgozva, ezért legtöbbször kénytelenek vagyunk feltételezéseket tenni, és a lineáris viszkoelaszticitás elméletét alkalmazni. A viszkoelasztikus anyagok időtől függő viselkedését az anyagtörvény egyenleteivel (*constitutive-egyenletek*) írják le, amelynek változói a feszültség ( $\sigma$ ), a deformáció ( $\varepsilon$ ) és az idő ( $t$ ) (ROLLER, 1980). A viszkoelasztikus anyagok anyagtörvényei felírhatók rheológiai modellek alapján, valamint kísérleti adatok feldolgozása alapján empirikus összefüggések segítségével. A rheológiai modellek érvényességi körét szintén kísérletekkel kell megállapítani. A leggyakrabban alkalmazott kísérleti módszerek a kúszási és relaxációs vizsgálatok.

## KÚSZÁS

Kúszáson az anyagok folyamatos deformációját értjük állandó feszültség hatására. A kúszási folyamatban általában három jellegzetes zónát állapíthatunk meg (14. ábra). A kúszás első fázisában a deformáció csökkenő sebességű (degresszív zóna), a folyamatot elsődleges kúszásnak nevezzük. A második fázisban a deformáció sebessége közel állandó, míg a harmadik fázisban a deformáció sebessége növekszik (progresszív zóna), majd a folyamat töréssel végződik (RÓNAI, 1980; FODOR, 1994).

Tetszőleges  $t$  időpontban a deformáció ( $\varepsilon$ ) a pillanatnyi rugalmas ( $\varepsilon_r$ ) és kúszási deformációból ( $\varepsilon_k$ ) tevődik össze:

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_r + \varepsilon_k \quad (6)$$



14. ábra. A kúszás egyes fázisai (RÓNAI, 1980)

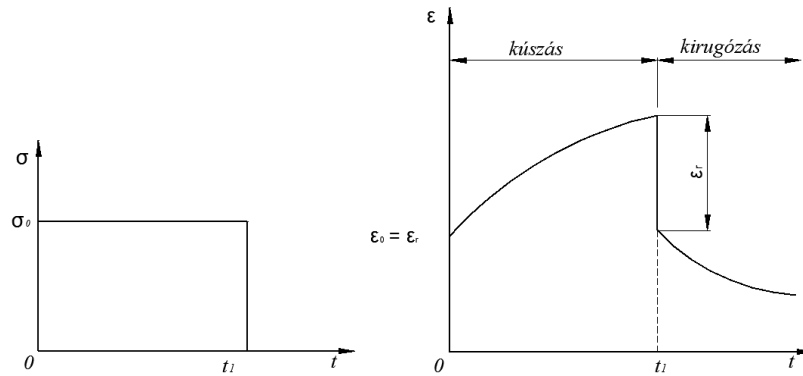
A deformáció sebességét differenciálással kapjuk. Mivel  $\varepsilon_r$ =állandó, a deformáció sebessége:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_k}{dt} = \dot{\varepsilon} \quad (7)$$

A kúszás egyes fázisainak időtartalma döntően függ az anyag szerkezetétől és a feszültségtől. Ezért adott feladat megoldásakor az első lépés annak megállapítása, hogy a kúszási görbe első vagy első és második szakaszával kell-e számolnunk.

## KIRUGÓZÁS

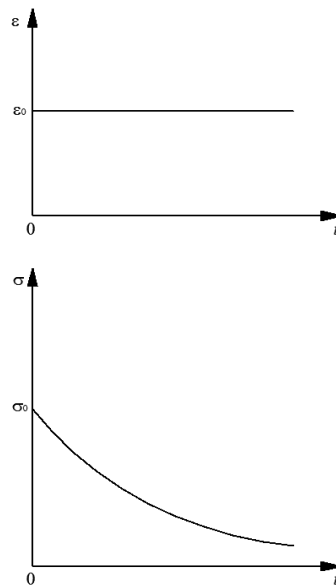
A 15. ábrán látható, hogy ha a kúszási vizsgálat egy adott időpontjában ( $t_1$ ) a terhelést megszüntetjük, ezáltal a rugalmas deformációt ( $\varepsilon_r$ ) hirtelen visszanyerjük, majd egy időbeni kirugózási folyamat indul meg. A kúszási deformáció a kirugózás során nem szűnik meg teljesen még hosszú idő eltelte után sem, így a visszamaradó érték adja a maradó deformációt, ami meghatározza pl. esetünkben a pellet sűrűséget. Az egyes anyagok kirugózási mértékű lehet. Az anyag szerkezeti tulajdonságain felül a terhelés ( $\sigma$ ) lényeges szerepet játszik (SITKEI, 1981).



15. ábra. A kirugózás változása az időben (SITKEI, 1981)

## RELAXÁCIÓ

A viszkoelasztikus anyagok egy másik jellemző tulajdonsága, hogy állandó deformáció esetén a feszültség az idő függvényében fokozatosan csökken (16. ábra). A csökkenés mértéke és sebessége az anyag szerkezetétől és a deformáció nagyságától függ.



16. ábra. A relaxációs folyamat (SITKEI, 1981)

A csökkenő feszültség általában aszimptotikusan tart egy határértékhez. A feszültség lecsengésének sebességét a *relaxációs idővel* jellemezzük, ami azt az időt jelöli, amely alatt a feszültség eredeti értékének  $1/e$ -ed részére (kb. 37%) csökken.

## LINEARITÁS

A viszkoelasztikus anyagok viselkedése akkor lineáris, ha a feszültség és a deformáció viszonya nem függ a terheléstől. A viszkoelasztikus anyagok egy része lineárisan kezelhető, különösen kisebb terheléseknél és rövid ideig tartó terheléseknél (pl. ütközés). Nagyobb terhelések és hosszú ideig tartó terhelések esetén az anyagok zöme eltér a lineáris viselkedéstől, vagyis ilyenkor nem-lineáris anyagokkal van dolgunk (SITKEI, 1981). A nem-lineáris anyagok leírása lényegesen bonyolultabb, mivel nem-lineáris anyagtörvények alkalmazása szükséges.

## 5. ÁLTALÁNOS RHEOLÓGIA MODELLEK ALKALMAZHATÓSÁGÁNAK KÉRDÉSEI A POR-FORGÁCS HALMAZOK TÖMÖRÖDÉSI FOLYAMATAIVAL ÖSSZEFÜGGÉSBEN

A rheológiai modellek tárgyalása során a dolgozatnak nem témája levezetni az egyes modelleket jellemző differenciálegyenleteket, hiszen azok a megjelölt irodalmakban megtalálhatók. Éppen ezért csak a legfontosabbnak ítélt és általánosított modelleket, a hozzájuk kapcsolódó levezetett egyenletekkel együtt mutatom be, majd a témával összefüggésben szakmai értékeléseket végzek (dőlt betűvel kiemelve). Ez a fejezet tájékoztat bennünket arról, hogy az irodalmakban közölt általános rheológia modellek főként lineáris esetekre vonatkoznak, tehát a por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörödési folyamatainak leírására nem alkalmazhatók. Ezért szükségessé vált egy nem-lineáris eseteket leíró általános modell kidolgozása, amely megfelelően jellemzi a por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörítési folyamatait, a pelletálás alatt végbemenő feszültség-deformációs folyamatokat. Mivel a nem-lineáris eseteket leíró modell (lásd 6. fejezet) a lineáris modellek továbbgondolásán alapszik, ezért fontos ismernünk a gyakorlatban elterjedt lineáris eseteket leíró rheológia modelleket.

Mint korábban láttuk, a faanyag viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkezik. A viszkoelasztikus tulajdonságok jól modellezhetők egy Hooke-rugóval (rugalmas viselkedés jellemzése) és egy Newton-féle hidraulikus csillapító elemmel (folyadék viselkedésének jellemzése). A modellekben, tehát a viszkoelasztikus anyagok viselkedését a rugó és a csillapító elem valamilyen kapcsolódási kombinációjával közelítjük meg. Az így kapott mechanikai modelleket *rheológiai modelleknek* nevezzük. A rugó és a csillapító elem két legegyszerűbb kombinációja a soros és a párhuzamos kapcsolás, vagyis a *Maxwell-* és a *Kelvin-modell* (17. ábra). Az említett két modell, különböző deformáció sebességeknél egymástól eltérő feszültség-deformáció összefüggéseket adnak.

A *Kelvin-modellnél* (17. ábra) a rugó és a csillapító elem szabad vége az erő hatására együtt mozog, állandó sebességgel. Ezért a csillapító elem által felvett erő a deformációtól függetlenül egy állandó érték ( $\varepsilon_2$ ), míg a rugó által felvett erő zérus értékről lineárisan növekszik ( $\varepsilon_1$ ). Mint látható, ennél a modellnél a csillapító elem a deformáció sebességétől függően egyszerűen eltolja a rugó lineáris karakterisztikáját. A modellnél az alakváltozások azonosak a feszültségek viszont eloszlanak.

A Kelvin-modell differenciálegyenlete a következő alakban adható meg:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

Mivel az alakváltozás az idő függvényében változik, ezért az időfüggést a következőképpen írhatjuk fel:

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t}\right) \quad (9)$$

Időállandója:

$$\text{A retardációs (késleltetési) idő: } T = \frac{\eta}{E} \quad (10)$$

A retardációs, vagy más néven késleltetési idő azzal az idővel azonos, mely alatt a modell az egyensúlyi deformáció ~63%-át ( $1 - (1/e)$ ) eléri.

A *Maxwell-modellnél* (17. ábra) az első pillanatban az összes feszültséget a rugó veszi fel, és ez határozza meg a görbe kezdeti iránytangensét (meredekségét). A rugó elmozdulásakor a

csillapító elem is elkezd mozogni növekvő sebességgel, s ennek megfelelően növekvő erőhatást vesz fel. Amikor a rugó elérte a legnagyobb összenyomódást, az összes energiát, állandó mozgási sebesség mellett a csillapító elem veszi fel. A görbe vízszintesbe megy át. A modellnél az alakváltozások eloszlanak a két sorba kapcsolt elemi testen, a feszültségek viszont azonosak

A Maxwell-modell differenciál egyenlete a következő alakban adható meg:

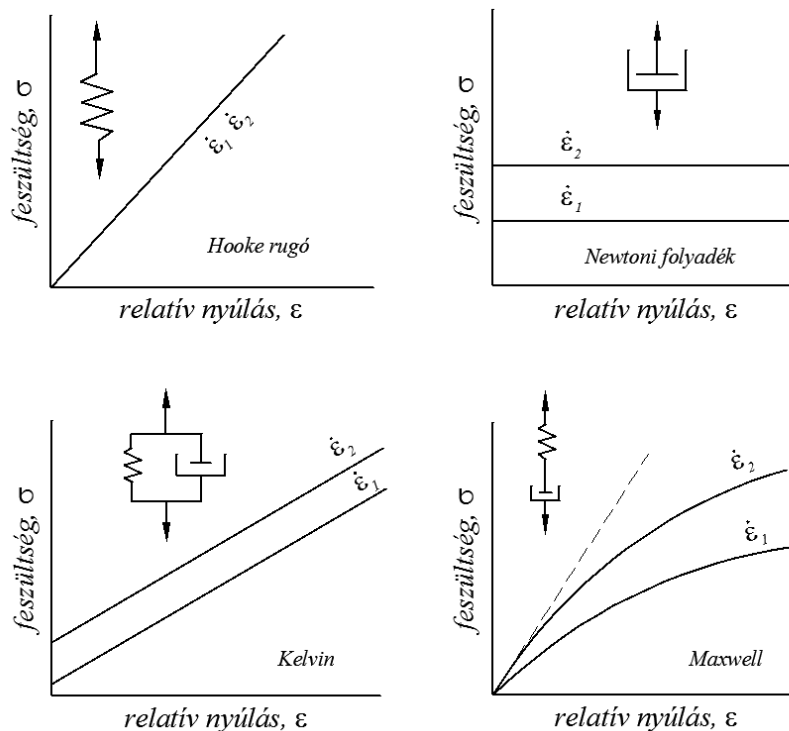
$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (11)$$

Időfüggvénye:

$$\sigma_{(t)} = \sigma_0 e^{-\frac{E}{\eta}t} \quad (12)$$

Időállandója:

$$\text{A relaxációs idő: } t = \frac{E}{\eta} \quad (13)$$

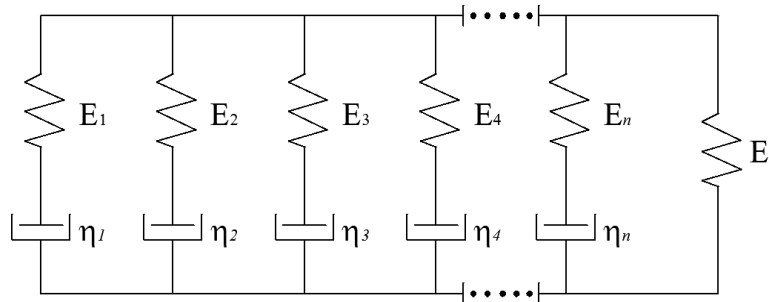


17. ábra. A legegyszerűbb rheológiai modellek és azok jelleggörbéi (SITKEI, 1981)

A mechanikai modellek elektromos modellekkel is helyettesíthetők. Az elektromos modellben a rugót a kapacitással, míg a csillapító elemet ellenállással helyettesítik. A rugó húzásának vagy nyomásának a kapacitás feltöltése vagy kisülése felel meg. A csillapító elemben az energia elnyelése hasonlóan történik, mint az ellenállásban az elektromos energia elnyelése (hővé való átalakítása). A sorosan kapcsolt mechanikai modellt soros kapcsolású elektromos modellel kell helyettesíteni. Az elektromos modellnél a mechanikai feszültségnek az elektromos feszültség, a nyúlásnak pedig az áramerősség felel meg.

A faanyagok esetében korábbi kutatások (RADOK, 1957; MÓZES, 1968; ROLLER, 1980; RÓNAI, 1980; SITKEI, 1981; CREUS, 1985; BERG, 1989; PINTO, 1997; PRONK, 2005; stb.) azt mutatták, hogy elegendően hosszú idő elteltével az anyagban bizonyos rugalmas deformáció marad vissza, amely a fenti modellekből nem következik. E hiányosság

kiküszöbölésére a *Maxwell-modell*hez párhuzamosan kapcsoltak egy  $E_e$  modulussal bíró rugót, mint ahogy az a 18. ábrán bemutatott általánosított *Maxwell-modellben* látható.



18. ábra. Az általánosított Maxwell-modell (SITKEI, 1981)

Több Maxwell-elem használata a számításokat lényegesen bonyolítja, ezért többnyire csak a relaxáció számítására alkalmazzák a gyakorlatban, amikor  $d\varepsilon/dt = 0$ .

Ez utóbbi esetben az  $n$  tagból álló modell teljes feszültsége, ha  $t = 0$  időpontban a modell  $\varepsilon_0$  deformációt szenved, a következő:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \dots + \sigma_n + \sigma_e, \quad (14)$$

és a feszültség csökkenése az időben:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \left[ (E_1 - E_e) e^{-t/T} + (E_2 - E_1) e^{-t/T_2} + \dots + (E_n - E_{n-1}) e^{-t/T_n} + E_e \right] \quad (15)$$

A Kelvin-modell, hasonlóan a Maxwell-modellhez, szintén nem tekinthető általánosnak, mivel nem írja le helyesen az anyag viselkedését az összes terhelési módra. Például nem alkalmazható az állandó feszültség alá helyezett faanyag feszültség-relaxációjának leírására sem. Ezért a Kelvin-modellt is úgy kombináljuk, hogy ez által általánosabb érvényű modellhez jussunk.

A leggyakrabban használható és egyben legegyszerűbb modell a *háromelemes modell*, amelynek két fő típusát a 19. ábra szemlélteti. A Maxwell- ill. Kelvin-modellekhez egy rugó van kötve párhuzamosan, ill. sorba. A 19/a. ábra szerinti modell a következőképpen írható fel:

$$\sigma = E_1 \varepsilon + T(E_1 + E_2) \frac{d\varepsilon}{dt} - T \frac{d\sigma}{dt}, \quad (16)$$

ahol:  $T = \frac{E_2}{\eta}$  - a relaxációs idő.

Pillanatszerű lépcsős terhelés és állandó deformáció esetén a kezdeti  $\sigma_0$  feszültség relaxációja az alábbi egyenletből számítható ( $d\varepsilon/dt = 0$ ):

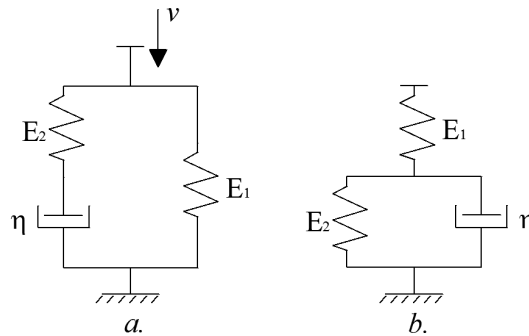
$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/T} + \frac{E_1}{E_1 + E_2} \sigma_0 (1 - e^{-t/T}) \quad (17)$$

Lépcsős terhelés és az azt követő állandó feszültség esetén a deformáció változása (kúszás) a következő egyenlettel fejezhető ki ( $d\sigma/dt = 0$ ):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1 + E_2} e^{-t/T} + \frac{\sigma_0}{E_1} (1 - e^{-t/T}) \quad (18)$$



$$\text{ahol: } T = \frac{E_\infty}{\eta} \text{ és } E_\infty = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad (19)$$



19. ábra. Háromelemes modellek változatai (SITKEI, 1986)

A fenti modellek általában csak végtelen gyors (nullás indexű tagok) és végtelen lassú (végtelen indexű tagok) terhelési esetekre adnak megoldást, és nem alkalmasak a maradó deformáció leírására. Végtelen gyors terhelésnek megfeleltethető a 100 cm/s sebesség; míg a végtelen lassú esetben 0,01 cm/s sebességet lehet alapul venni (SITKEI, 1992). Az áttörést e tekintetben a háromelemes modelleknél bevezetett véges terhelési sebességek adták, melyeket a következőkben ismertetek.

A gyakorlatban a pelletálási folyamatoknál pillanatszerű (pl. végtelen gyors) lépcsős terhelés nem valósítható meg, helyette a  $v_0$  állandó sebességű vagy a forgattyús hajtómű mozgásának megfelelő periodikusan változó sebességű terhelést alkalmazhatjuk.

A  $v_0$  állandó sebességű deformáció esetén a relatív nyúlás kifejezhető az alábbi alakban:

$$\varepsilon = \frac{v_0}{L}t = at \quad \text{és} \quad \frac{v_0}{L} = \frac{d\varepsilon}{dt} = a \quad (20)$$

ahol:

$L$  – az anyag hossza (pl. pellet hossz),  
 $v_0$  – a deformáció sebessége,  
 $a$  – a deformáció sebességtől függő állandó.

Fontos, hogy a terhelés alatt a sebesség bármekkora lehet, de a kikötés, hogy a terhelés ideje alatt végig állandó kell, hogy maradjon, különben a modell nem fog megfelelően működni.

A háromelemes modell differenciálegyenlete a fentiek figyelembe vételével állandó terhelési sebesség esetén az alábbi:

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{T} = \frac{E_1}{T}at + (E_1 + E_2)a \quad (21)$$

Sok esetben a terhelést forgattyús hajtóművel állítjuk elő (vagyis a sebesség az idő függvényében periodikusan változik). Ilyenkor a deformáció is az alábbi kifejezés szerint változik az időben:

$$\Delta l = r(1 - \cos \omega t) \quad (22)$$

míg a terhelés sebessége:

$$v = r\omega \sin \omega t \quad (23)$$

Akkor a 19. ábra szerinti modell differenciálegyenlete így írható fel szinuszosan változó terhelési sebesség esetén:

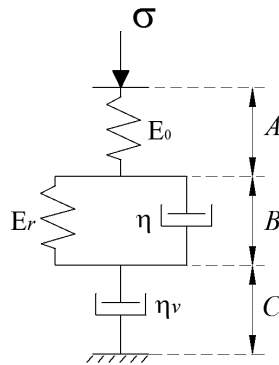
$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{T} = \frac{E_1}{T} \frac{r}{L} - \frac{E_1}{T} \frac{r}{L} \cos \omega t + (E_1 + E_2) \frac{r\omega}{L} \sin \omega t \quad (24)$$

ahol:

$r$  - a forgattyúsugár,

$\omega$  - a forgattyú szögsebessége.

Gyakran használatos modell az úgynevezett *négyelemes Burgers-modell*, amely a 20. ábrán látható. A modell *egy Kelvin-elemből* áll, amellyel sorba van kötve egy rugó és egy csillapító elem (MÓZES, 1968).



20. ábra. A négyelemes Burgers-modell

A modell tehát három részre osztható. A teljes deformációt az egyes részek deformációjának összege adja, vagyis:

$$\varepsilon = \varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C \quad (25)$$

A feszültség minden részben azonos, tehát:

$$\sigma = \sigma_A + \sigma_B + \sigma_C \quad (26)$$

Az egyes feszültségkomponensek értékei:

$$\begin{aligned} \sigma_A &= E_0 \varepsilon_A, \\ \sigma_B &= E_r \varepsilon_B + \eta \dot{\varepsilon}_B, \\ \sigma_C &= \eta_v \dot{\varepsilon}_C. \end{aligned} \quad (27)$$

A fenti három egyenletből az alábbi differenciálegyenlet adódik:

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{1}{T_r} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \left[ \frac{d^2 \sigma}{dt^2} + \left( \frac{E_0}{E_r T_r} + \frac{E_0}{\eta} + \frac{1}{T_r} \right) \frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_0}{T_r \eta_v} \sigma \right] \quad (28)$$

A (28) egyenlet mind a holt teher alatti kúszási jelenség, mind pedig a feszültség relaxáció leírására alkalmas lineáris viszkoelasztikus anyagban. Állandó terhelés alkalmazásakor az (28) egyenlet egyszerűsödik, mivel ilyenkor  $d\sigma/dt = 0$ .

A differenciálegyenlet pedig az alábbi alakra változik:

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} + \frac{1}{T_r} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{T_r \eta_r} \quad (29)$$

A differenciálegyenlet megoldása:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_r} (1 - e^{-t/T_r}) + \frac{\sigma_0 t}{\eta_r} \quad (30)$$

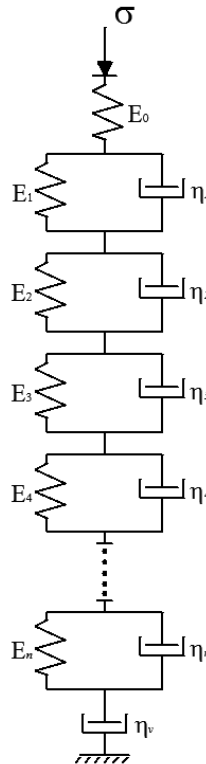
ahol:  $T_r = \frac{\eta}{E_r}$ , a retardációs idő

Az (30) egyenlet differenciálásával megkapjuk a deformáció sebességét is:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta} e^{-t/T_r} + \frac{\sigma_0}{\eta_r} \quad (31)$$

*A Burgers-modell már a maradó deformáció leírására alkalmas, mégpedig a modellhez sorba kötött viszkózus elem ( $\eta_v$ ) segítségével. A viszkózus elemnél ugyanakkor az a probléma, hogy a különböző terhelési sebességek hatására másképpen viselkedik. Tehát mindig más értékre kell felvenni a sebességtől függően. Kis sebességeknél viszont nem működik a modell, mert az említett viszkózus elem nem vesz fel erőt. Tehát a faanyagok tömörítési folyamatainak leírására ez a modell ilyen formában nem alkalmas.*

A fentiekben tárgyalt modellek egyenletei exponenciális függvényt tartalmaznak. Ha az  $\varepsilon$  fajlagos alakváltozást logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázoljuk, akkor az exponenciális függvény egy egyenessel ábrázolható. A korábbi kutatási eredmények azonban azt mutatták, hogy a faanyagok esetében a logaritmikus ábrázolással sem kapunk egyenest az  $\varepsilon=f(t)$  összefüggésre. Ez azt jelenti, hogy a rugalmassági modulus nem állandó, hanem a terhelés függvényében változik (tömörítésénél növekszik). A probléma megoldására bevezették az ún. általánosított Kelvin-modellt (FINDLEY, 1976). Az általánosított Kelvin-modell  $n$  Kelvin-modellből és ezekkel sorba kötött rugóból és viszkózus elemből áll. Az első rugó az anyag pillanatnyi rugalmas deformációját veszi számba, az  $n$  számú Kelvin-modell a rugalmas deformációt jellemzi, míg végül a viszkózus elem a tartós folyásnak (maradó deformációnak) felel meg (21. ábra).



**21. ábra.** Az általánosított Kelvin-modell (FINDLEY, 1976)

Az (30) egyenlet megfelelője az általánosított Kelvin-modell esetén a következő képen írható fel:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_{r1}} (1 - e^{-t/T_1}) + \frac{1}{E_{r2}} (1 - e^{-t/T_2}) + \dots + \frac{1}{E_{rn}} (1 - e^{-t/T_n}) + \frac{t}{\eta_v} \right] \quad (32)$$

ahol:  $T_1, T_2, \dots, T_n$  - az egyes Kelvin-modellek retardációs vagy késleltetési időit jelentik

Egyszerűsített írásmóddal kifejezve az (32) egyenlet így is felírható:

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 \left[ \frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^n \varphi_i (1 - e^{-t/T_i}) + \frac{t}{\eta_v} \right] \quad (33)$$

ahol:  $\varphi_i = \frac{1}{E_i}$  a reciprok modulus.

*Az általánosított Kelvin-modellt a faanyagok nagy nyomáson történő tömörítési folyamatainak leírására nem célszerű alkalmazni mivel minden terhelési esetre fel kell venni a relaxációs időket is, amelyek bizonyos elemszám felett lényegesen bonyolítják az egyenlet megoldását és ezáltal befolyásolják a kapott eredményt. Ezen kívül a modell kis sebességeknél továbbra sem működik a sorba kötött viszkózus elem miatt, tehát a maradó deformáció leírására ilyen sebességeknél továbbra sem alkalmas.*

### 5.1.A PLASZTIKUS DEFORMÁCIÓ LEÍRÁSA A POR-FORGÁCS HALMAZOK NAGY NYOMÁSON TÖRTÉNŐ TÖMÖRÖDÉSI FOLYAMATINÁL

A nem-lineáris rheológia elméletek faanyagokra történő levezetésével összefüggésben a közelmúltban *Prof. Dr. Sitkei György* végzett hiánypótló munkát hazánkban. Az elmúlt 25 évben számos OTKA kutatás és publikáció született a témával összefüggésben, melyekben kidolgozásra került olyan nem-lineáris rheológia modell, amellyel különböző mezőgazdasági (beleértve természetesen a faanyagot is) ömlesztett anyag tömörítési folyamatát a plasztikus (maradó) deformáció figyelembe vételével megfelelően jellemezni lehet. A nem-lineáris rheológiával összefüggő korábbi *Prof. Dr. Sitkei György* által vezetett kutatások eredményeit a következőkben ismertetem.

A faanyagok viszkoelasztikus és plasztikus tulajdonságokat mutatnak a tömörítés során. Ez azt jelenti, hogy a nyomás-deformáció összefüggés a terhelési sebességtől és nagyságától is függ. A terhelés megszűntetése után maradó deformáció marad vissza, amely adott esetben a tömörítés hatékonyságára is jellemző. A tömörítési folyamatok közös jellemzője, hogy a tömörítési folyamatok során a rugalmassági modulus növekszik. Ez a növekedés általában olyan nagymértékű, hogy állandó rugalmassági modulus alkalmazása lényeges hibához vezet. Ez azt jelenti, hogy az előzőekben tárgyalt lineáris viszkoelaszticitás egyenleteinek alkalmazása a tömörítési folyamatoknál már durva hibához vezet így azok alkalmazása kérdésessé válik. A fentiekben tárgyalt módszereket nem a tömörítési folyamatok leírására fejlesztették ki, ezért azok gyakorlati alkalmazása ezen folyamatoknál nem lehetséges. A nem-lineáris viszkoelaszticitás általános módszerei még nincsenek teljes mértékben kidolgozva. A meglévő nem-lineáris megoldási módszerekhez kísérletileg felvett és empirikus egyenletekkel leírt függvényeket használnak, vagyis a módszer tartalmaz empirikusan felépített részeket is, melyek csak egy adott állapotra igazak. Ezért szükségesség vált egy olyan nem-lineáris módszer kifejlesztése, amely alkalmas a tömörítési folyamatok leírására széles nyomástartományokban is (SITKEI, 1992; SITKEI, 1993).

Kiindulási modellként a szokványos háromelemes rheológia modell, vagy annak bővített változata szolgált azzal az alapvető különbséggel, hogy, hogy az elemek nem állandók, hanem a deformáció függvényében változnak. A kifejlesztett modellre levezetett differenciálegyenlet csak numerikusan volt megoldható, azonban a mérnöki gyakorlat számára használható közelítő módszerek alkalmazása is jól jellemezte a valóságot. A plasztikus, maradó deformáció a tömörítési folyamatok fontos jellemzője, hiszen a terhelés megszűnte után ettől függ az elérhető tömörítési fok, esetünkben a pellet tartóssága, végsűrűsége. A maradó deformáció azonban az előzőekben említett modelleknél csak akkor modellezhető, ha a terhelési sebesség egy adott érték és azt nem akarjuk megváltoztatni. A kifejlesztett rheológia modellben a terhelési sebesség tetszőleges lehet zérus és végtelen között, ezért a modellbe nem köthető sorosan viszkózus elem.

A leggyakrabban alkalmazott lineáris eseteket leíró modellek, mint láthattuk a háromelemes és a négyelemes modellek. Az elméleti levezetések ezekre a modellekre általában végtelen lassú és végtelen gyors terhelési sebességekre vonatkoznak és a legnagyobb hátrányuk ezeken kívül, hogy nem adnak jó megoldást a faanyagok nagy nyomáson történő tömörítési folyamatainak leírására (SITKEI, 1998).

*A probléma kettős:* Egyrészt a rugalmassági (vagy deformáció) modulus egy tömörödési ciklusban, akár ezerszeresére is változhat, ami a lineáris modell alkalmazását lehetetlenné teszi és a modellekben szereplő elemek ( $E$  és  $\eta$ ) zérus deformációnál is állandó értékkel szerepelnek, vagyis nem felelnek meg a valóságnak. Másrészt a maradó deformáció leírása különböző terhelési sebességekre a szokásos sorba kapcsolt viszkózus elemmel (pl. Burgers-modell, általános Kelvin-modell) szintén problémás. A valóságnak jobban megfelelő

megoldás csak nem-lineáris rheológia alkalmazásával lehetséges, amikor az egyes elemek – rugó, viszkózus elem és sűrűdési elem- változtathatók a deformáció függvényében. Ugyancsak fontos eleme a leírásnak a változó relaxációs idők használata relaxációs spektrum formájában.

A kiindulási majd a kibővített háromelemes modellek a 22. ábrán láthatók. A 22/a. és a 22/b. ábra szerinti modellek a terhelés, kúszás és relaxáció leírására alkalmasak, a maradó deformáció leírására nem. Ezek a modellek a Maxwell és a Kelvin tagok összekapcsolásából származnak. A 22/b. ábra szerint a három sorba kötött Kelvin-tag három relaxációs idő használatát teszi lehetővé, amely a leírást lényegesen pontosítja. A több relaxációs idő használata azonban megkerülhető úgy, hogy felvesszük a teljes relaxációs spektrumot és azt az idő függvényében fejezzük ki az alábbi módon (SITKEI, 1998):

$$T = T_0 + a \cdot (t - t_1)^n \quad (34)$$

ahol:

$T_0$  – a terhelési ciklus kezdetén érvényes minimális relaxációs idő,

$a$  – a deformáció sebességtől függő állandó,

$t$  – a terhelési idő kezdete,

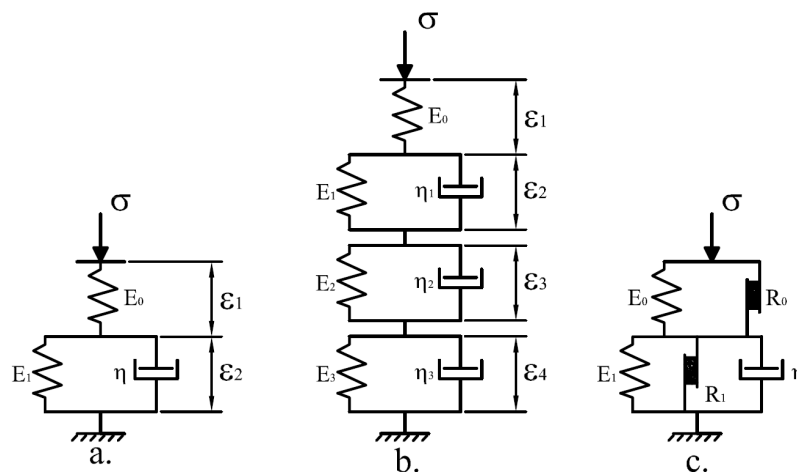
$t_1$  – a terhelési idő vége,

$n$  – a hatványkitevő.

Ahhoz, hogy a maradó deformáció hatását is figyelembe tudjuk venni, át kellett alakítani a 22/a. és a 22/b. ábrán látható modelleket úgy, hogy a maradó deformációt a sűrűdésos elemek ( $R$ ) alkalmazásával írassuk le (22/c. ábra). A nem-lineáris rheológiai modellek kialakításának ugyanis az az alapja, hogy a benne szereplő rugók ( $E$ ), csillapító elemek ( $\eta$ ) és sűrűdésos elemek ( $R$ ) a deformációtól függőek, tehát nem állandók és minden változót, amit a modell tartalmaz, függvényként kell kezelni, tehát a deformáció függvényében kell kifejezni. Ebből következik, hogy zérus terheléshez zérus deformáció tartozik. Ennek megfelelően a differenciálegyenletek levezetésekor az elemeket leíró egyenletek teljes differenciálját kell venni, Pl. a Hooke-törvény esetén:

$$\sigma = E(\varepsilon) \cdot \varepsilon, \quad \rightarrow \quad \dot{\sigma} = E\dot{\varepsilon} + \dot{E}\varepsilon \quad (35)$$

Külön hangsúlyozni kell, hogy a sűrűdésos elem is deformáció függő. Ezzel kiküszöbölhetővé vált az a probléma, hogy a lineáris esetben zérus deformációhoz véges sűrűdési ellenállás tartozott, amely szinte sosem felelt meg a valóságnak.



**22. ábra.** A háromelemes rheológiai modellek változatai (a. és b. ábra) és a kiterjesztett modell (c. ábra) (SITKEI, 2000)

A fentiek figyelembe vételével a 22/c. ábra szerinti modell differenciál egyenlete:

$$\begin{aligned} \ddot{\sigma} + \frac{\dot{\sigma}}{T_0} - \left[ \frac{1}{T_0} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{\dot{\eta}_1}{\eta_1} \right) + \frac{1}{T_1} \left( \frac{1}{T_1} + \frac{\dot{\eta}_1}{\eta_1} \right) - \frac{\dot{E}_1 + \dot{R}_1}{\eta_1} + \frac{\ddot{E}_0 + \ddot{R}_0}{E_0 + R_0} - \frac{2}{\eta_1} (\dot{E}_0 + \dot{R}_0) \left( 1 + \frac{E_1 + R_1}{E_0 + R_0} \right) \right] = \\ = \left[ \frac{2}{T_1} (\dot{E}_0 + \dot{R}_0) + \frac{1}{T_0} (\dot{E}_1 + \dot{R}_1) - \frac{1}{T_0} \frac{1}{T_1} (E_1 + R_1 + \eta_1) \right] \cdot \varepsilon + 2(\dot{E}_0 + \dot{R}_0) \dot{\varepsilon} + (E_0 R_0) \ddot{\varepsilon} \quad (36) \end{aligned}$$

ahol:

$$T_0 = \eta_1 / (E_0 + R_0) \quad \text{és} \quad T_1 = \eta_1 / (E_1 + R_1) \quad (37)$$

A fenti differenciálegyenlet egyszerűsödik, ha viszkózus elem állandónak tekinthető:

$$\dot{\sigma} + \sigma \left( \frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_1} - \frac{\dot{E}_0 + \dot{R}_0}{E_0 + R_0} \right) = \frac{E_0 + R_0}{T_1} \cdot \varepsilon + (E_0 + R_0) \cdot \dot{\varepsilon} \quad (38)$$

Míg a klasszikus lineáris esetre, amikor az össze elem deriváltja zérus, az (36) egyenlet a következőképpen alakul:

$$\ddot{\sigma} + \frac{\dot{\sigma}}{T_0} - \sigma \left( \frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_1} \right) \cdot \frac{1}{T_1} = - \frac{E_0 + R_0}{T_1^2} \cdot \varepsilon + (E_0 + R_0) \cdot \ddot{\varepsilon} \quad (39)$$

Vagy a (38) egyenlet:

$$\dot{\sigma} + \sigma \left( \frac{1}{T_0} + \frac{1}{T_1} \right) = \frac{E_0 + R_0}{T_1} \cdot \varepsilon + (E_0 + R_0) \cdot \dot{\varepsilon} \quad (40)$$

A 36. és a 38. egyenlet csak numerikusan oldható meg, bizonyos nehézségekkel. Az egyenletek ugyanis, helyettesítve az elemek deformációtól függő függvényeit két helyen szingulárisak. Tetszőleges terhelési sebességet feltételezve a (39) vagy (40) egyenletből:

$$\varepsilon = at \rightarrow \dot{\varepsilon} = a \quad \text{és} \quad a = v/l \quad (41)$$

A megoldás:

$$\sigma(t) = \varepsilon_\infty at + aT(E_0 + R_0 - E_\infty)(1 - e^{-t/T}) \quad (42)$$

ahol:

$$T = \frac{\eta_1}{E_0 + R_0 + E_1 + R_1} \quad \text{és} \quad E_\infty = \frac{(E_0 + R_0)(E_1 + R_1)}{E_0 + R_0 + E_1 + R_1} \quad (43)$$

A modellben szereplő elemeket bizonyos elméleti megfontolások alapján a következő alakban állíthatjuk elő:

$$E_i = A_i \frac{\varepsilon^{n-1}}{(1 - \varepsilon)^n} \quad (44)$$

Hasonló függvény szerint változnak a sűrűdásos ( $R_0$  és  $R_1$ ) és viszkózus elemek is.

A kutatások rámutattak arra, hogy a folyamatok csak több relaxációs idő alkalmazásával (22/b. ábra) írhatók le pontosan. Ehhez legalább három Kelvin-elem sorba kötése szükséges.

Ekkor azonban az egyenletek lényegesen bonyolódnak és rontják a gyakorlati alkalmazás lehetőségeit is. Ezért megvizsgálták annak a lehetőségeit, hogy a relaxációs idő tényleges spektrumát meghatározzák és azt a számításokba beépítsék (34. egyenlet).

A terhelési ciklus végeztével a terhelés állandó értéken tartható és ekkor kúszás jelenség lép fel. Ilyenkor a deformáció tovább növekszik az idő függvényében. A 40. egyenlet ezért a következőképpen alakul:

$$\dot{\varepsilon} + \frac{E_1 + R_1}{\eta_1} \cdot \varepsilon = \left( \frac{E_0 + R_0}{\eta_1} + \frac{E_1 + R_1}{\eta_1} \right) \cdot \frac{\sigma_1}{E_0 + R_0} \quad (45)$$

Ha egy adott időpontban az állandó terhelést megszüntetjük, akkor először a deformáció rugalmas részét pillanatszerűen visszanyerjük, majd ezt egy fokozatosan lassuló kirugózás követi. Figyelembe véve, hogy  $R_0$  a terhelés végén állandó marad, a pillanatnyi rugalmas kirugózás:

$$-\Delta\varepsilon_e = \frac{E_0 - R_0}{E_0} \cdot \varepsilon^{(1)} \quad (46)$$

Ahol  $\varepsilon^{(1)}$  az  $E_0$  rugó saját deformációja a terhelés végén.

Hasonló megfontolással kapjuk a Kelvin tag időtől függő kirugózását is:

$$-\Delta\varepsilon_c(t) = \frac{E_1 - R_1}{E_1} \cdot \varepsilon^{(2)} (1 - e^{-(t-t_2)/T_1}) \quad (47)$$

Ezek alapján a rendszer eredő deformációja az idő függvényében a következő lesz:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_e - \Delta\varepsilon_c(t) \quad (48)$$

ahol  $\varepsilon^{(2)}$  a Kelvin rész saját deformációja a terhelés végén.

A 46., 47., 48. egyenletek használatához szükség van az  $E_0$  és a Kelvin rész saját deformációjára a terhelési ciklus végén. A modell felső és alsó részére ugyanakkora feszültség hat, így a következő differenciálegyenletet kapjuk:

$$\dot{\varepsilon}^{(2)} + \frac{\varepsilon^{(2)}}{T} = \frac{\varepsilon}{T_0} \quad (49)$$

Lineáris terhelési sebességet ( $\varepsilon=at$ ) használva a Kelvin-tag saját deformációja:

$$\varepsilon^{(2)}(t) = \frac{T}{T_0} at - \frac{aT^2}{T_0} (1 - e^{-t/T}) \quad (50)$$

$$\text{és, } \varepsilon^{(1)} = \varepsilon - \varepsilon^{(2)} \quad (51)$$

**Megállapítások:** Általában egy relaxációs idő használata nem ad elegendő pontosságot. Elvileg a 22/c. modell is bővíthető a 22/b. modellnek megfelelően, azonban ekkor az egyenletek lényegesen bonyolódnának. A kutatások alapján az adott pontosság úgy is elérhető, hogy a relaxációs görbéről meghatározzunk a relaxációs idő változását az idő függvényében. Az (42-51) egyenletek azzal a feltétellel használhatók, hogy a pontos (36) egyenlethez viszonyítva elfogadható közelítést adnak. Ezért a (36) differenciálegyenletet numerikusan megoldották és a megoldást összehasonlították a 42. egyenlettel kapott értékkel



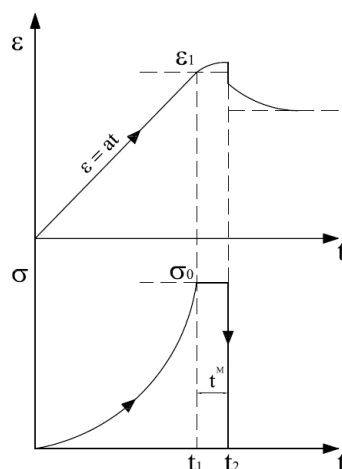
felhasználva a bükk és fenyő fűrészporral kapcsolatos tömörítési kutatások eredményeit. Megállapították, hogy az eltérések általában nem lépnek ki a  $\pm 2\%$ -os szórási sávból, csak 1000 bar nyomás környékén adódtak valamivel nagyobb hibák. Ez a hibahatár adott esetben bőven elfogadható, mivel az anyagtörvények meghatározása ennél nem pontosabb. A fenti közelítés (42. egyenlet) azonban nem magától értetődő. Ugyanis általában nem igaz, hogy egy nem megoldható differenciálegyenletben állandó együtthatókat alkalmazva és azt megoldva jó eredményt kapunk, még akkor sem, ha ezután a változó együtthatókat visszahelyettesítjük. Itt egy speciális esetről van szó. A végtelen gyors és a végtelen lassú terhelési esetben a viszkózus tag kiesik, ezért ezekben a szélső esetekben az (36) és (42) egyenletek automatikusan ugyan azt az eredményt adják. A véges sebességű terhelési esetek a két szélső eset közé eshetnek csak. Ennek következtében a két módszer nem lehet messze egymástól (SITKEI, 2000).

Az előzetes kutatások (SITKEI, 1992, 1998, 2000) alapján tehát megállapítható, hogy a közelítő módszer a gyakorlatban jól alkalmazható, pontossága megfelelő. A módszer egyszerű eszközökkel lehetővé teszi a nem-lineáris tömörítési folyamatok számítását, beleértve a tetszőleges sebességű terhelési, kúszási, relaxációs és visszarugózási folyamatokat.

*A nem-lineáris rheológia modellel kapcsolatos kutatások eredményeit itt nem közlöm, mivel ezek a kutatások a fentiekben ismertetett összefüggések ellenőrzésére szolgáltak elsősorban. A részletes kutatási eredmények azonban megtekinthetők a fejezetben megjelölt irodalmi források alapján.*

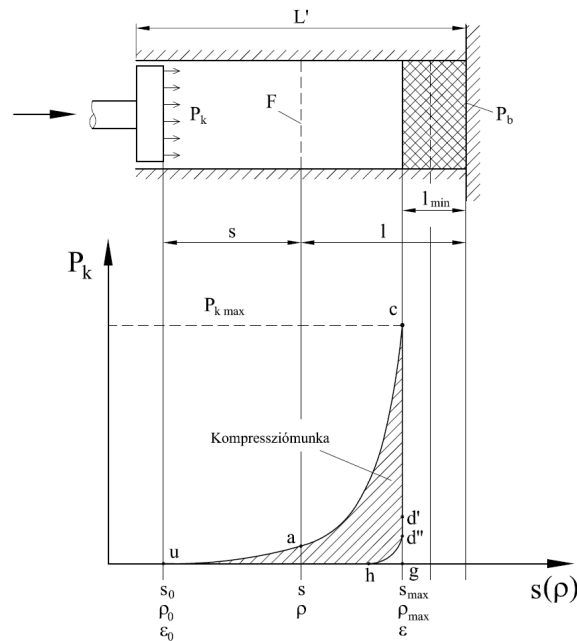
## 5.2.A TÖMÖRÍTÉSI FOLYAMATOK ÁLTALÁNOS TÖRVÉNYSZERŰSÉGEI A PELLETTÁLÁSSAL ÖSSZEFÜGGÉSBEN

A préselési, tömörítési folyamatok időbeni lefolyását általános esetben a 23. ábra mutatja. A terhelést követően a faanyag általában hosszabb-rövidebb ideig ( $t_2-t_1$ ) állandó terhelésen marad ( $\sigma$ ) és ez idő alatt kúszás következik be ( $\varepsilon$ ). A kúszás jelen esetben az anyag további tömörödését jelenti állandó feszültség (pellettálási nyomás) mellett. A terhelés megszűnése után ( $t_2$ ) a rugalmas deformációt hirtelen visszanyerjük, majd az anyag időbeni visszarugózása következik. Ez utóbbi csökkenti a tömörséget és vele együtt a pellet sűrűségét. Megállapítható, hogy minél nagyobb a nyomáson tartási idő ( $t^M$ ), annál jobban kúszik (tovább tömörödik) a halmaz és annál kisebb lesz a kirugózás mértéke és vele együtt nő a maradó deformáció (SITKEI, 1994).



23. ábra. A préselési folyamat időbeni lefolyása (SITKEI, 1994)

A tömörítés általános törvényszerűségei legegyszerűbben a tömörítő hengerben (dugattyúban) vizsgálhatók. A tömörítő hengerben adott mennyiségű természetes tömörségű faanyagot teszünk, és a dugattyúval lassan összenyomjuk (24. ábra). A térfogat csökkenése következtében a faanyag halmazsűrűsége növekszik a kezdeti  $\rho_0$  értékről a végállapotot jelző maximális sűrűségig ( $\rho_{max}$ ). A dugattyú által kifejtendő nyomás a sűrűség növekedésekor progresszíven növekszik, ezért a nyomást logaritmikus koordináta-rendszerben célszerű ábrázolni (MEVES, 1959; MATTHIES, 1963; BUSSE, 1964).



24. ábra. Anyagok tömörítése dugattyúban (SITKEI, 1981)

A terhelés növekedésével a rugalmassági modulus is növekszik, vagyis a folyamatot jellemzi egy kezdő ( $E_0$ ) egy pillanatnyi ( $E$ ) és egy közepes ( $E_k$ ) ún. szekáns modulus, mint ahogy ezt a 4.2. fejezetben is láthattuk. A tömörítési folyamatok hatására tehát az anyag kisebb térfogatú lesz, rugalmassági modulusa pedig jelentősen növekszik. Ezért a tömörítési folyamatok leírására a lineáris viszkoelaszticitás törvényszerűségei nem alkalmazhatók.

A tömörítési folyamatok feszültség ( $\sigma$ )- relatív nyúlás ( $\varepsilon$ ) összefüggése a következő típusú egyenlettel írható le.

$$\sigma = K \left\{ e^{A\rho_0 \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}} - 1 \right\} \quad (52)$$

ahol:

$\rho_0$  – az anyag laza sűrűsége a tömörítés kezdetén,

$\varepsilon$  – a fajlagos alakváltozás, relatív nyúlás,

$K, A$  – az anyagtól függő állandók.

A maximális sűrűség és a relatív nyúlás között a következő összefüggés érvényes:

$$\rho_{max} = \frac{\rho_0}{1-\varepsilon} \quad (53)$$

ahol:

$\rho_{max}$  – a tömörítés végén kialakult sűrűség.

A pillanatnyi rugalmassági modulus a következő egyenletből számolható:

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{K \cdot A \cdot \rho_0}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot e^{A \rho_0 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}} \quad (54)$$

a rugalmassági modulus kezdő értéke pedig:

$$E_0 = K \cdot A \cdot \rho_0 \quad (55)$$

A rugalmassági modulus közepes értéke is definiálható (szekáns modulus), amely az adott relatív nyúlás tartományára érvényes:

$$E_k = K \left\{ e^{A \rho_0 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}} - 1 \right\} / \varepsilon \quad (56)$$

Adott tömörítési (préselési) sebesség esetén a  $\sigma$ - $\varepsilon$  összefüggés az (52) egyenlet helyett egy viszonylag egyszerűbb hatványfüggvénnyel is meghatározható a következő alakban:

$$\sigma = A \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^n \quad (57)$$

A deformáció modulus:

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = A \cdot n \left( \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^{n-1} / (1 - \varepsilon)^2 \quad (58)$$

Vagy a közepes (szekáns) modulus:

$$E_k = A \frac{\varepsilon^{n-1}}{(1 - \varepsilon)^n} \quad (59)$$

Az  $n$  kitevő a tömörítendő anyag milyenségétől és a tömörítés sebességétől függ. Értéke 1,5 és 2,5 között változik faalapú por-forgács halmazok tömörítési folyamatainál, beleértve a pelletálási tartományt is. A kitevő értékét nagyban befolyásolja még a szemcsék szilárdsága is. Minél szilárdabbak a szemcsék (vagyis minél keményebb fafajról van szó) annál kisebb mértékben deformálódnak adott nyomáson és ezáltal kisebb lesz a kitevő értéke is. Ez megfigyelhető volt a korábbi kutatásokban (SITKEI, 2000) tölgy és az akác mintáknál. A nedvességtartalom szintén befolyásolja az egyes szemcsék teherbírását és ezen keresztül a kitevő értékét. A szemcseméret eloszlása is befolyásoló tényező, vagyis minél kisebb a szemcse annál jobban ellenáll a terhelésnek, vagyis annál kisebb lesz a kitevő értéke.

### A tömörítés energiaszükséglete

A tömörítés energiaszükséglete pelletálásnál a tiszta tömörítési munkából és a kitolási munkából tevődik össze. A tiszta tömörítési munka legegyszerűbben a tömörítő hengerben határozható meg (24. ábra). A dugattyú az  $s_0$  helyzetből elmozdulva a  $\rho_0$  sűrűségű faanyagot  $\rho_{max}$  értékűre nyomja össze, miközben a dugattyúra ható nyomás fokozatosan növekszik. A tömörítésre fordított munkát ( $A_k$ ) a nyomásgörbe alatti terület adja. De meghatározható az (52, 57) egyenlet  $\varepsilon$  szerinti integrálásával is.

$$A_k = F \int p ds \quad (60)$$

vagy egységnyi tömegre ( $M$ ) vonatkoztatva:

$$\frac{A_k}{M} = \frac{F}{M} \int p ds. \quad (61)$$

ahol:

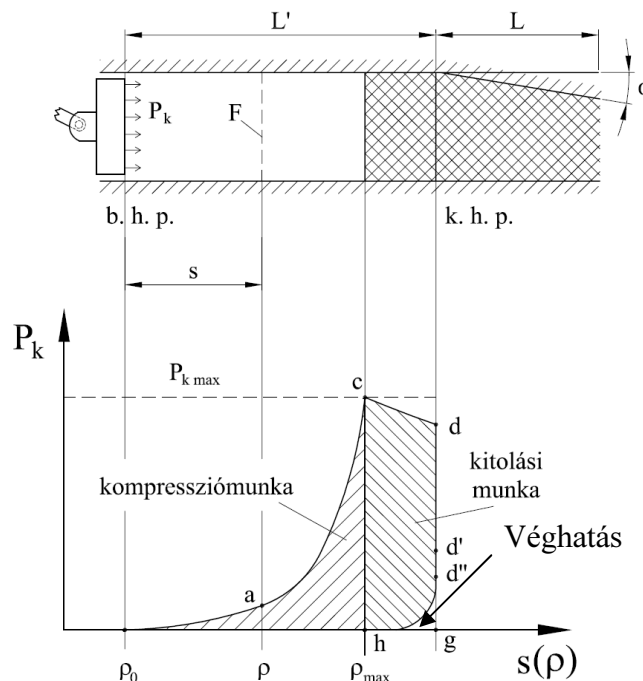
$M = FL\rho_0$ .  $F$ : felület;  $L$ : A faanyagalmaz magasság a tömörítés kezdetén;  $\rho_0$ : kiinduló laza sűrűség

Ez a kifejezés az alábbi alakban is felírható:

$$\frac{A_k}{M} = \int_{\rho_0}^{\rho_{\max}} p d\left(\frac{1}{\rho_{\max}}\right) \quad (62)$$

Vagyis  $p - \frac{1}{\rho_{\max}}$  koordináta-rendszerben ábrázolva a kompresszió görbét, a görbe alatti terület a fajlagos tiszta kompresszió munkát adja.

A folyamatos tömörítési folyamat megvalósítása céljából pelletálásnál a nyomógörgők megfelelően kialakított csatornában tömörítik a faanyagot. Ebben az esetben a tiszta kompresszió munkához a kitolási munka járul, amint ez a 25. ábrán látható.



**25. ábra.** A kompressziós és a kitolási munka ábrázolása tömörítéskor (SITKEI, 1981)

A kitolási munka ( $A_s$ ) az (62) egyenlet alapján számítható, azzal a feltételezéssel, hogy a nyomás  $P=P_{\max}$  áll. (a c-d szakasz kismértékű változásától eltekintünk) és  $1/\rho=1/\rho_{\max}$  áll.

$$\frac{A_s}{M} = \frac{P_{\max}}{\rho_{\max}} \quad (63)$$

Az összes fajlagos munka pedig:

$$\frac{A}{M} = \frac{A_k}{M} + \frac{A_s}{M} = \int_{\rho_0}^{\rho_{\max}} p d\left(\frac{1}{\rho_{\max}}\right) + \frac{P_{\max}}{\rho_{\max}} \quad (64)$$

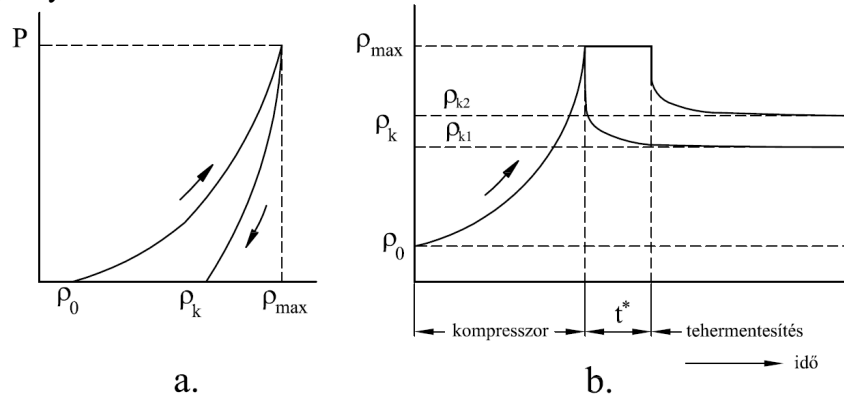
### A faanyag kirugózása a tömörítés után

A faanyagghalmazt a tömörítés során adott  $p$  nyomással  $\rho_{max}$  sűrűsége nyomjuk össze. A tehermentesítés során az anyag viszkoelasztikus tulajdonságainak megfelelően kirugózik, vagyis sűrűsége egy  $\rho_k$  értékre csökken (26/a. ábra).

A tehermentesítési görbe egyenlete a következőképpen adható meg:

$$p = K_1 \left( e^{a_1(\rho_{max} - \rho_k)} - 1 \right) \quad (65)$$

ahol:  $K_1$  és  $a_1$  állandók az anyagféleség, nedvességtartalom és a maximális nyomáson tartás idejének függvényei.



26. ábra. Az anyag kirugózása a tömörítés után (SITKEI, 1981)

A tehermentesítés történhet a  $\rho_{max}$  elérését követően közvetlenül vagy egy bizonyos  $t^*$  idő elteltével (26/b. ábra). Minél nagyobb a  $t^*$  idő, annál kisebb lesz az anyag kirugózása, annál nagyobb lesz  $\rho_k$  értéke. Pillanatszerű tehermentesítés esetén sem éri el a faanyagghalmaz azonnal a stabil állapotnak megfelelő  $\rho_k$  sűrűség értékét. Az anyag kirugózása néhány napig is tarthat, természetesen igen kis növekedések mellett. A kirugózás jelentős hányada a tehermentesítést követő rövid időn belül végbemegy (MOHSENIN, 1975)

A sűrűség növekedése a kirugózás során az alábbi empirikus összefüggésből számítható (DOLGOV, 1970)

$$\rho_k = a \cdot \rho_0 + b \cdot \rho_{max} + ct \cdot (\rho_{max} - \rho_0) \quad (66)$$

ahol:

$a, b, c$  – az anyagtól függő állandók.

### A nyomáseloszlás a tömörítő dugattyú előtti térben

A faanyagok tömörítéskor akár tömörítő hengerben, akár préscsatornában is történik a dugattyú előtti térben a nyomás nem egyenletes. Ennek megfelelően a faanyagghalmaz tömörsége, sűrűsége is változó lesz a dugattyútól való távolság függvényében. Ennek az az oka, hogy az anyag a tömörítő teret körülvevő falakon sűrűlódik, és a sűrűlódási erő csökkenti az anyagban fellépő tengely irányú nyomást.

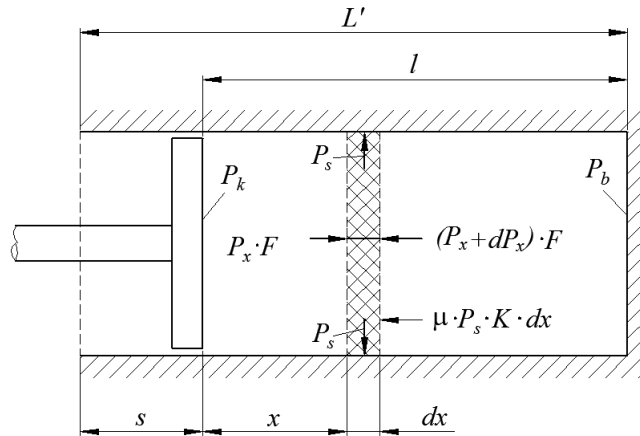
A tömörítő hengerben adódó erőviszonyokat a 27. ábra szemlélteti. A dugattyútól  $x$  távolságra  $p_x$  nyomás hat, amely a Poisson-számtól ( $\nu$ ) függően keresztirányban  $p_s$  falnyomást hoz létre.

A súrlódási tényező ismeretében számítható a  $dx$  szélességű elemre ható súrlódási erő:

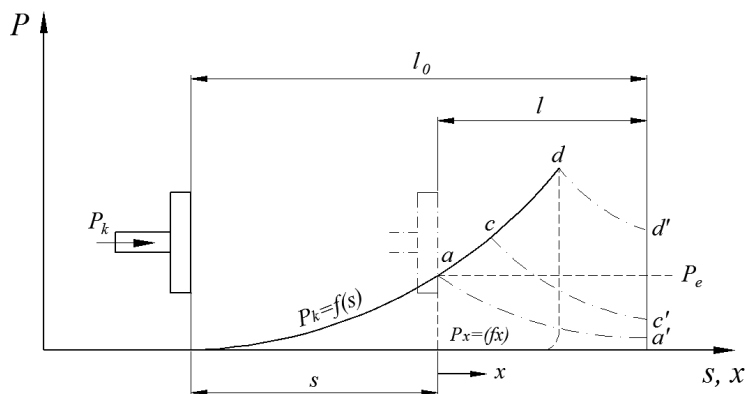
$$S = \mu p_s D \pi dx \quad (67)$$

A  $p_x$  és  $p_s$  nyomások közötti összefüggés síkbeli (egytengetű) feszültségi állapot esetén:

$$p_s = \frac{\nu}{1-\nu} p_x \quad (68)$$



27. ábra. A tömörítő henger nyomásviszonyai (SITKEI, 1981)



28. ábra. Nyomáseloszlás a tömörítő dugattyú előtt (SITKEI, 1981)

s ezzel a  $dx$  szélességű elem egyensúlyát az alábbi differenciálegyenlet fejezi ki:

$$dp_x F + \mu \frac{\nu}{1-\nu} p_x D \cdot \pi \cdot dx = 0 \quad (69)$$

Az egyenlet megoldása:

$$p_x = p_k e^{-kx} \quad (70)$$

ahol:

$$k = \frac{4}{D} \mu \frac{\nu}{1-\nu} \quad (71)$$

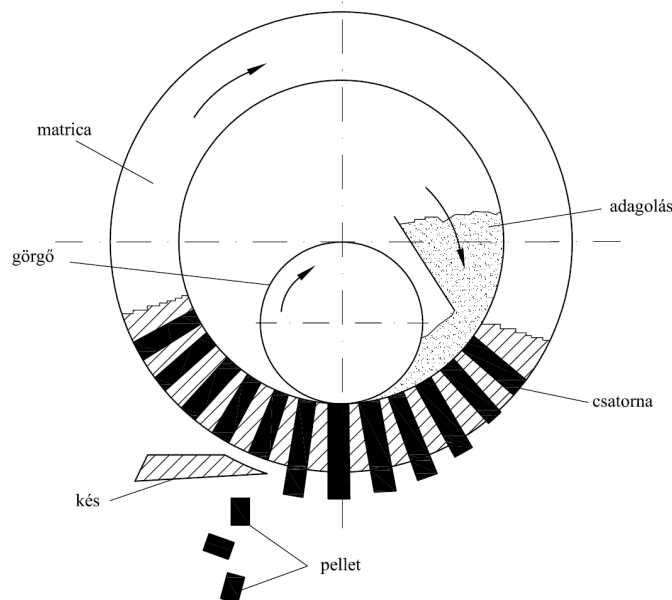
A tömörítő henger fenéknnyomását úgy kapjuk, hogy  $x$  helyébe az adott  $l$  hosszúságot helyettesítjük:

$$p_b = p_k e^{-kl} \quad (72)$$

A nyomásgörbék lefutását különböző tömörítési fokokra szematikusan a 28. ábrán mutatjuk. A (68) egyenlet használatához ismernünk kell az anyagok *Poisson-számát* és a  $\mu$  súrlódási tényezőjét a nyomás és a nedvességtartalom függvényében. A faanyagok *Poisson-száma* a sűrűséggel és a nedvességtartalommal növekszik. A pelletálási tartományában  $\nu = 0,35-0,45$  között alakul (SACHT, 1957). A súrlódási tényező elsősorban a nedvességtartalom függvénye, azonban a nyomás is jelentős hatással van rá. Ez utóbbi hatás abban nyilvánul meg, hogy egyrészt a nagy nyomás deformálja a faanyagot, így az érintkező felület módosul, másrészt víz préselődik ki az anyagból, amely a súrlódási felületet keni csökkentve ezáltal a tényező értékét. Ennek következtében nagy nyomások esetén a súrlódási tényező a nagyobb nedvességtartalmú tartományban csökken (SACHT, 1957).

### 5.3.A PELLETTÁLÁS NYOMÁSVISZONYAI

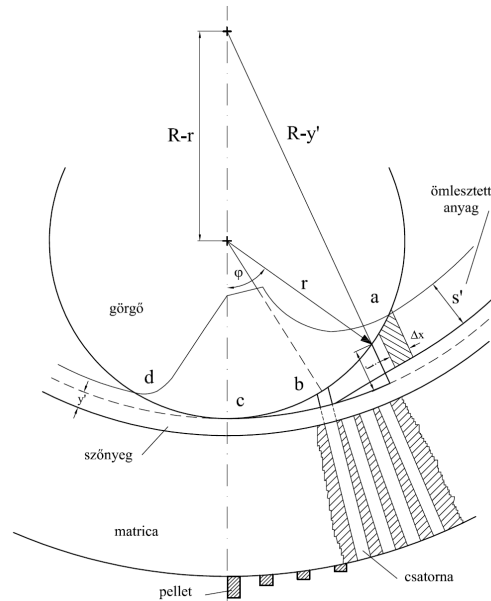
A faanyaghalmozok térfogatcsökkentésének alapvető módszere a pelletálás. A pelletáláshoz szükséges nyomás 800-2000 bar között változik a gyakorlatban. A por-forgács halmozok pelletálása többnyire gyűrűs matricában történik, amelynek elrendezési rajza a 29. ábrán látható. A faanyaghalmoz deformáció viszonyait a görgő alatt a 30. ábrán láthatjuk (SCHWANGHART, 1969). A görgő a matricához viszonyítva egy  $y_r$  réssel van beállítva, ezért a matrica futófelületén egy préselt réteg (szőnyeg) alakul ki, amelynek  $y_t$  vastagsága az anyag kirugózása következtében nagyobb  $y_r$  értékénél. A görgő elé beadagolt faanyaghalmoz rétegvastagsága  $s$ , amelyet a görgő fokozatosan összenyom. A nyomás növekedésekor az  $y_t$  réteg vastagsága is fokozatosan csökken a minimális  $y_r$  értékig. A  $b$  pontban a nyomás eléri maximális értékét, majd a görgő az anyagot a tömörítő csatornába nyomja. A nyomás a pellet kitolási periódusában gyakorlatilag állandó marad, majd a rés növekedésekor gyorsan csökken.



29. ábra. A pelletkészítés elve (SITKEI, 1981)

Figyelembe véve, hogy a sűrűség ( $\rho$ ) arányosan növekszik a rétegvastagság ( $y$ ) csökkenésével, vagyis:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{y_0}{y} \quad (73)$$



**30. ábra.** A faanyaghalmoz deformációja a görgő alatt (SITKEI, 1981)

ezért:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1 - \varepsilon = \frac{A\rho_0}{\ln(p + D - B)} \quad (74)$$

ahol:

$D, B$  – az anyagtól függő állandók

A görgő után visszamaradó tehermentesített réteg vastagsága a következőképpen szimulálható

$$y = y_r + \frac{P_{\max}}{C} \quad (75)$$

ahol:

$C$  – a térfogati tömörítési tényező

Az  $y_r$  rés értékét általában 0,4-0,8 mm között választjuk, mivel nagyobb réseknél az áteresztőképesség gyorsan csökken (SCHWANGHART, 1969).

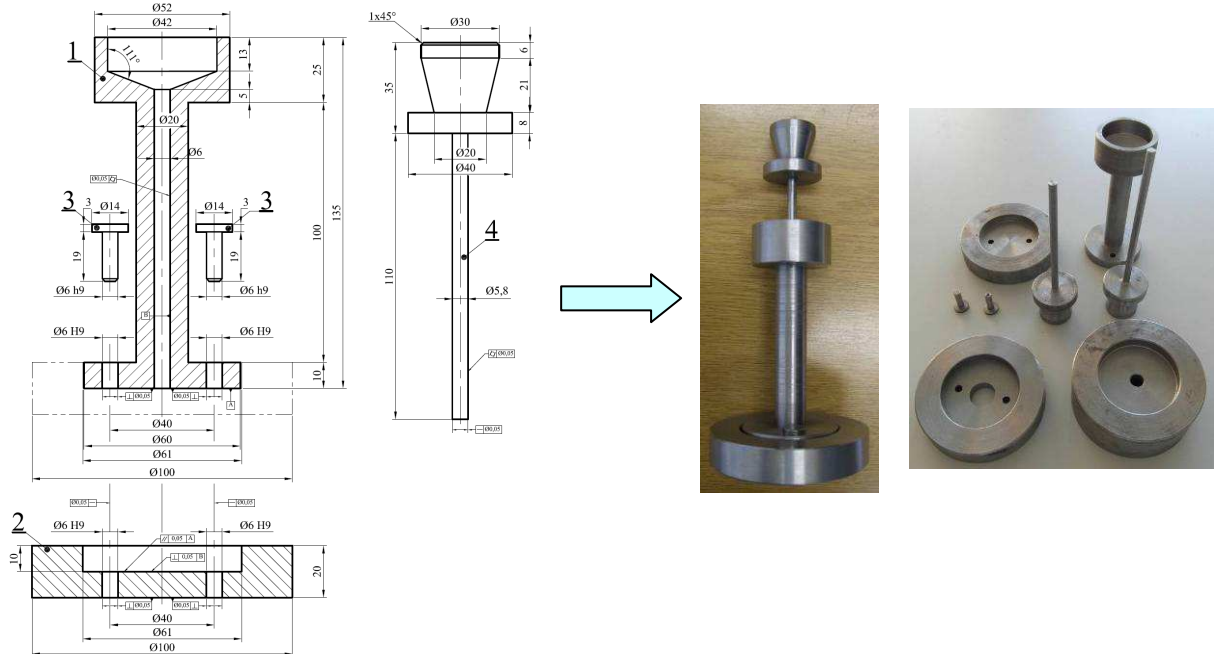
## 6. CÉLKITŰZÉS

Láthatjuk, hogy a fa, mint komplex biomechanikai rendszer mennyire eltérően viselkedik a különböző terhelések hatására. Ezeket a viselkedéseket nehéz pontosan a matematika nyelvén megfogalmazni, ezért leggyakrabban empirikus összefüggéseket használunk az adott jelenség leírására. Tehát az elmélet nagy számban tartalmaz empirikus részeket, melyek csak egy adott feltételek mellett érvényesek. Éppen ezért célzott alapkutatásokba kezdtem. A kutatásom fő célja kettős, egyrészt eredményeimet az elmélet másrészt pedig a gyakorlat számára kívánom hasznosíthatóvá tenni. **Gyakorlati vonatkozásban** célom, hogy a különböző mérési paraméterek figyelembe vételével vizsgálatokat végezzek a témával kapcsolatban és találjak olyan optimális paramétereket az alapanyag tulajdonsággal, ill. a technológiai paraméterekkel összefüggésben, melyek lehetővé teszik egyrészt a pellet előállítás során felhasznált energia csökkenését másrészt a pellet minőségi, sűrűségi növekedését. **Elméleti vonatkozásban** pedig célom a faalapú por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörödési folyamatait leíró mechanikai ismeretek, törvényszerűségek bővítése a pelletálási tartományban.



## 7. KUTATÁSI MÓDSZER, TEMATIKA

A kutatás során a pelletálási folyamatra jellemző egyedi tervezésű nyomófejet készítettem (31. ábra). A tervezésnél kiemelt fontosságú volt a nyomórúd kihajlásra történő méretezése, hiszen ez határozta meg a tömörödési magasságot, adott átmérő és nyomás mellett. A nyomófej tervezésénél további fő szempont az volt, hogy olyan hosszú legyen a tömörítő csatorna, hogy a tömörítés végén az ipari gyakorlatban előforduló hosszúságú (20-30 mm) pelletet kapjak eredményül.



**31. ábra.** Az egyedi tervezésű nyomófej (nyomófej átmérő: 6 mm)

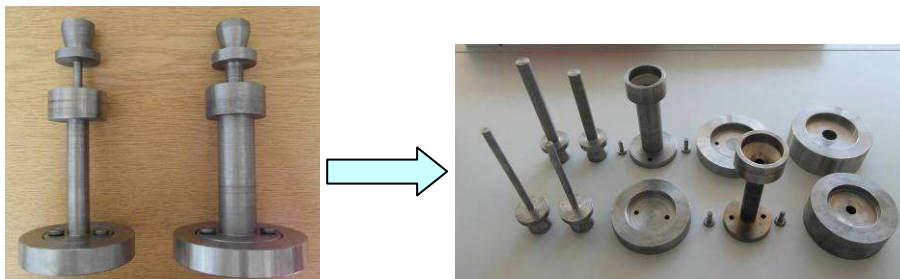
A fenti szempontok alapján a gyakorlatban megvalósításra került nyomófej tömörítő csatornájának a hossza az irodalmak (CARLOS, 2010; NIELSEN, 2010) alapján figyelembe vett tömörítési arányok (4-5 szeres) figyelembe vételével 115 mm lett, így a mérések során kapott pellet magasságok 20-30 mm közé estek. A nyomórúd hossza 110 mm, átmérője pedig 6 mm, ami E335-ös anyagminőségű acélból készült. Így a karcsúságából adódóan a maximális terhelhetősége 4000 N, ami megfeleltethető 6 mm-es átmérőnél 1400 bar (140 MPa) nyomásnak. A vizsgálataim során a tömörítési (préselési) nyomás, tehát 1400 bar nyomásig terjedt. A 31. ábra műszaki rajzán (bal oldali ábrarész) láthatjuk, hogy a 4-es tételszámmal jelölt nyomórúd karcsú (6 mm-es) szakaszán fontos követelmény volt az előírt alak és helyzetűrések pontos meghatározása és gyakorlati megvalósítása. Az 1-es tételszámmal jelzett nyomókehely belső furatátmérője és a nyomórúd átmérője között az illesztési hézag nem lehetett több, mint 0,2 mm. A 31. ábrán látható nyomófejjel a következőképpen hajtottam végre a méréseket. Az első lépés a faalapú por-forgács halmaz adott technológiai paraméterek mellett történő összenyomása, tömörítése volt. Ehhez kapcsolódik a 2-es tételszámmal jelölt nyomókehely befogó, melynek a szerepe a tömörítő cső alsó részének a lezárása és pozicionálása, a 3-as tételszámmal jelölt illesztő szegek segítségével. A tömörítést követően a létrejött pelletet ki kellett juttatni a csőből és ehhez a 4-es és a 2-es tételszámmal jelölt elemeket ki kellett cserélni a 31. ábra jobb oldali ábrarészletén látható kiegészítő elemekre. Vagyis hosszabb nyomórúdra és magasabb kehelyalapra volt szükség, melynek a közepén lévő furaton át távozott a pellet.

A 31. ábrán látható karcsúsított kialakításnak elméleti megfontolások alapján (lásd 5.3-as fejezet) az a hátránya, hogy a relatív falsúrlódás ( $L/D$  viszony) miatti nyomás gradiense nem lesz egyforma a pellet hossza mentén. A relatív falsúrlódás nem más, mint a tömörítő csatorna átmérőjének - ami közel azonos a pellet átmérővel - ( $D$ ) és a pellet magasságának ( $L$ ) a viszonya. Vagyis minél kisebb a tömörítő csatorna átmérője a pellet magasságához képest ( $L/D$  hányados nagy), annál nagyobb lesz a relatív falsúrlódás mértéke (megnö a relatív súrlódási ellenállás) vagyis annál nagyobb lesz a nyomás gradiense és ez által a sűrűség gradiense is a pellet hossza mentén, aminek következménye lehet a pellet szétesés (32. ábra). *A relatív falsúrlódással kapcsolatos kutatásokat a 8.7. fejezetben részletesen ismertetem.*



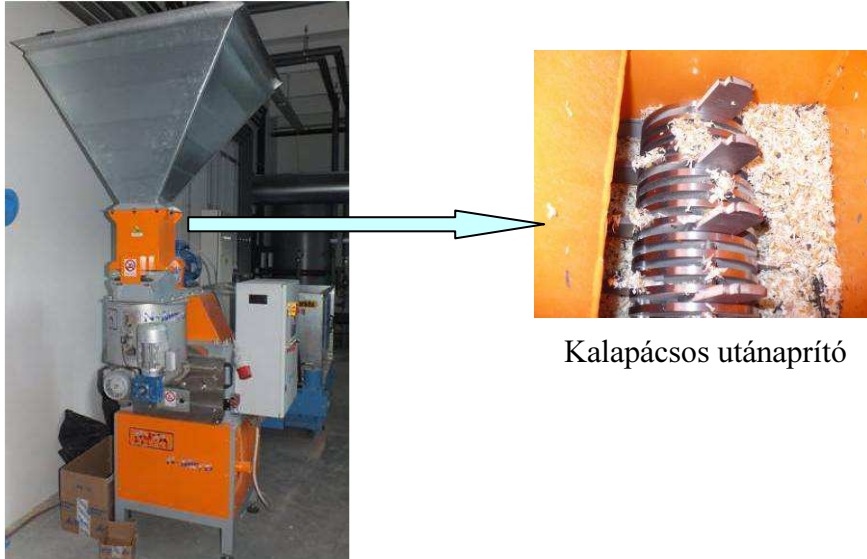
**32. ábra.** A relatív falsúrlódás miatti sűrűségkülönbség tölgy és fenyő mintán

Az elméleti megfontolásból adódóan a relatív falsúrlódásnak, tehát jelentős a szerepe a kialakult pellet sűrűségére, ezért további két átmérőtartományban is készítettem nyomófejeket (33. ábra), hogy vizsgálat alá vonjam a falsúrlódás befolyásoló hatását. Az így elkészített nyomófejekkel történő mérések lehetővé tették, hogy a faanyag feszültség-deformáció összefüggéseit az idő függvényében - alkalmazva a rheológia alpméréseket - különböző mérési paraméterek figyelembevételével meg tudjam határozni. Meg kell jegyezni, hogy az adott maximális nyomáshoz (1400 bar) tartozó nyomóerők az átmérő függvényében természetesen változtak (8 mm-nél: 7037 N; 16 mm-nél: 28.148 N).



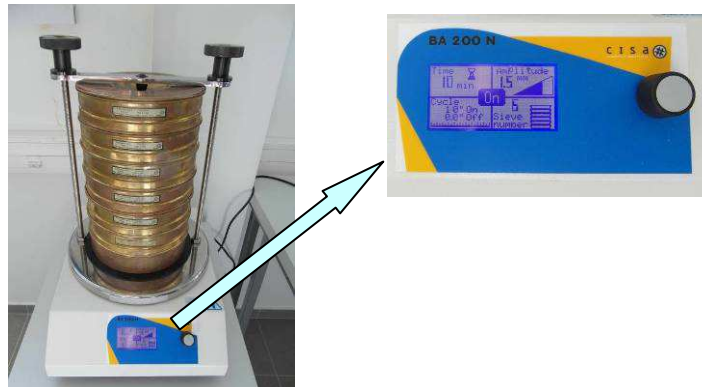
**33. ábra.** További nyomófejek (nyomófej átmérő: 8 mm és 16 mm)

A kutatásom során lucfenyő (*Picea abies*), tölgy (*Quercus sp.*) és akác (*Robinia pseudoacacia*) légszáraz (~10-12%) faanyagokat forgácsoltam el. A gyakorlatban is racionálisan már por-forgács alapanyagokat alkalmaznak a pelletálásnál. Fontos volt ismerni a pelletálásra kerülő frakcióméreteket, hiszen a szemcseméret jelentősen befolyásolta pellet sűrűséget. Ennek érdekében a meglévő por-forgács mintákat NOVA PELLET N-MICRO B típusú kísérleti pelletálónk utánaprítójával aprítottam (34. ábra), majd az utánaprított frakciókat CISA BA 200N elektromágneses szitázó készülék segítségével különféle frakciókra bontottam fel (35. ábra). A szitálást mintánként 10 percig végeztem 1,5 mm-es rezgési amplitúdó mellett. A szitálás végeztével visszamértem az egyes frakcióknál lévő maradványértékek tömegét KERN PCB 3500-2 típusú digitális mérleg segítségével (36. ábra).



Kalapácsos utánaprító

**34. ábra.** NOVA PELLET N-MICRO B típusú pelletáló gép  
(maximális kapacitása folyamatos alapanyag adagolás mellett: 200 kg/óra)



**35. ábra.** CISA BA 200 N típusú elektromágneses digitális szitázó készülék

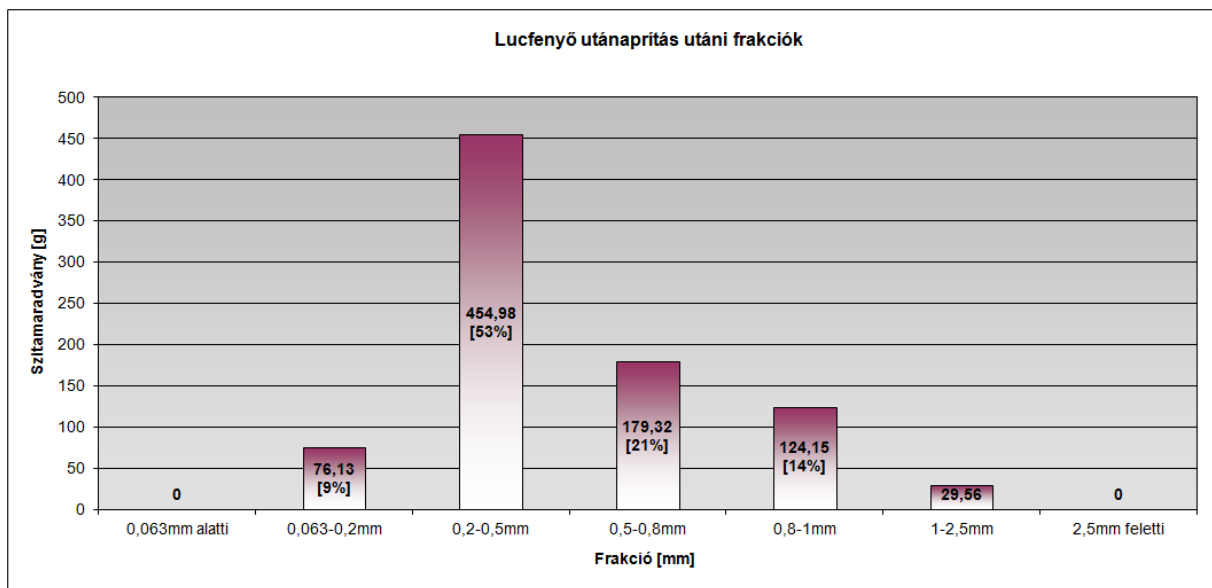
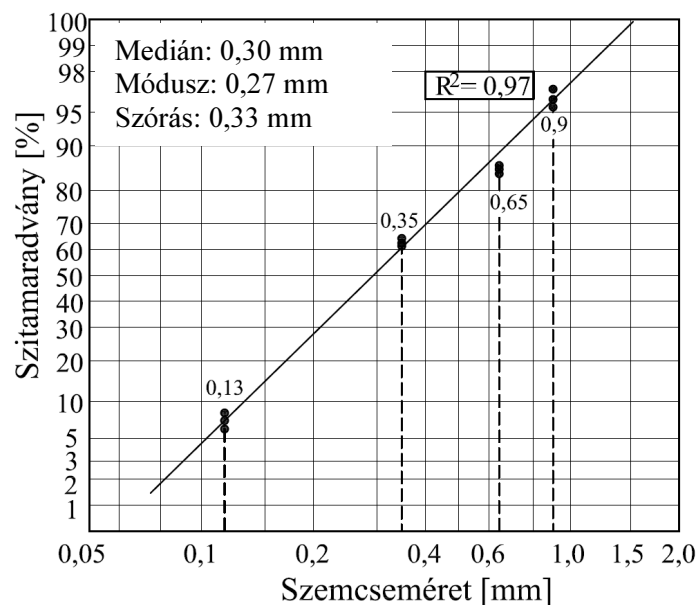


**36. ábra.** KERN PCB 3500-2 típusú digitális precíziós mérleg  
(mérés határ: 3500 g, felbontása: 0,01 g, pontossága:  $\pm 0,05\%$ )

A 3. fejezetben közölt irodalmak alapján a gyakorlatban a pellet 0,5-1,5mm közötti utánaprítási frakcióból készül. Ezért az általam összeállított szitasorozat a következő volt: 2,5mm, 1mm, 0,8mm, 0,5mm, 0,2mm, 0,063mm. A szitaanalízis során felülről lefelé folyamatosan csökkent a szitákon a lyuk mérete. Legalul helyezkedett el egy gyűjtőtál, ami a legkisebb szitaméret (0,063mm) alatti frakciókat fogta fel, ez utóbbi ún. finompor frakciónak felel meg. Minden frakcióból fafajonként 9 mérés készült, a szitamaradvány tömeget ezek átlaga adta. A szitaanalízis során kapott mérési eredményeket a következőkben ismertetem.

**8. táblázat.** Lucfenyő minta frakcióanalízise

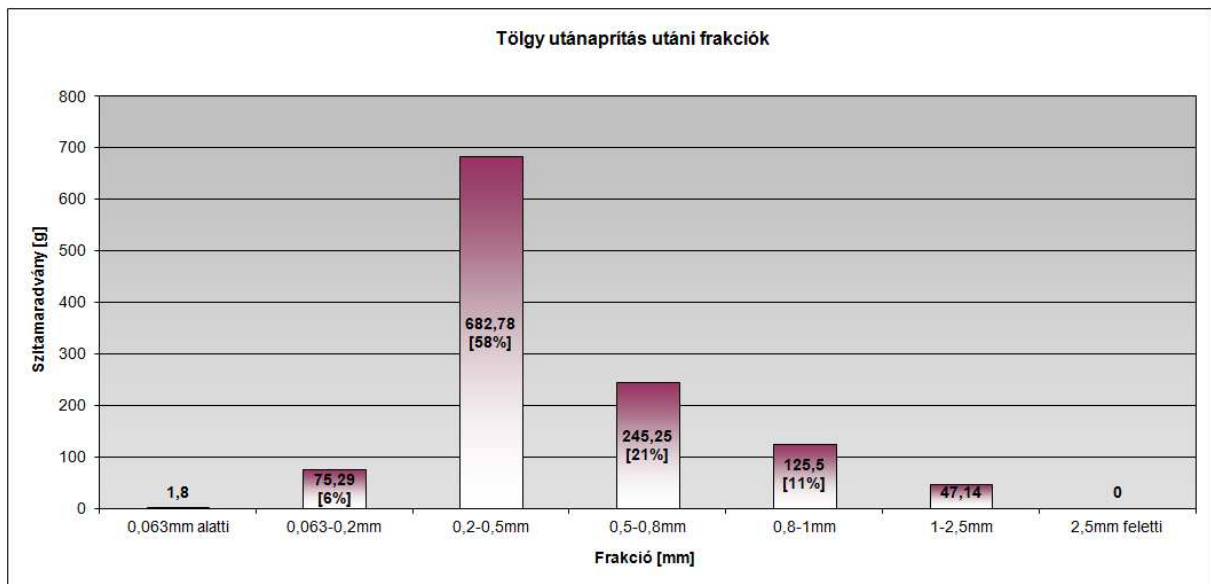
Lucfenyő		
Frakció (mm)	Szitamaradvány (g)	Százalék (%)
0,063mm alatti	0	0
0,063-0,2mm	76,13	9
0,2-0,5mm	454,98	53
0,5-0,8mm	179,32	21
0,8-1mm	124,15	14
1-2,5mm	29,56	3
2,5mm feletti	0	0
<b>Összesen</b>	<b>864,14</b>	<b>100,00</b>

**37/a. ábra.** Lucfenyő por-forgács utánaprítás utáni frakcióeloszlása**37/b. ábra.** Lucfenyő, tölgy és akác frakciók log-normális eloszlásának integrál görbéje

A por-forgács halmazok méreteloszlása mindig aszimmetrikus, ezért leírásukra a log-normál eloszlás (37/b. ábra) használható (SITKEI, 1994). A 37/b. ábra alapján az eloszlás fontosabb paraméterei meghatározható: A medián ( $M_i$ ): 0,30 mm; a módusz ( $\bar{X}$ ): 0,27 mm; és a szórás ( $\sigma$ ): 0,33 mm. A szemese alakjával kapcsolatos mikroszkópos felvétel a függelékben látható.

**9. táblázat.** Tölgy minta frakcióanalízise

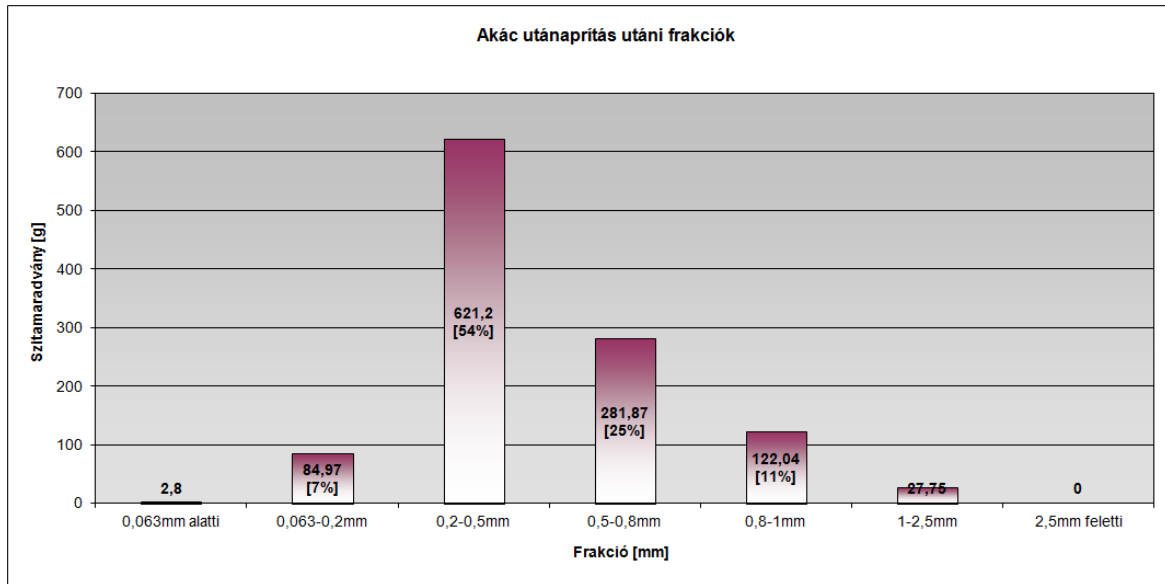
<b>Tölgy</b>		
Frakció (mm)	Szitamaradvány (g)	Százalék (%)
0,063mm alatti	1,8	0
0,063-0,2mm	75,29	6
0,2-0,5mm	682,78	58
0,5-0,8mm	245,25	21
0,8-1mm	125,5	11
1-2,5mm	47,14	4
2,5mm feletti	0	0
<b>Összesen</b>	<b>1177,76</b>	<b>100,00</b>



**38. ábra.** Tölgy por-forgács utánaprítás utáni frakcióeloszlása

**10. táblázat.** Akác minta frakcióanalízise

<b>Akác</b>		
Frakció (mm)	Szitamaradvány (g)	Százalék (%)
0,063mm alatti	2,8	0
0,063-0,2mm	84,97	7
0,2-0,5mm	621,2	54
0,5-0,8mm	281,87	25
0,8-1mm	122,04	11
1-2,5mm	27,75	2
2,5mm feletti	0	0
<b>Összesen</b>	<b>1140,63</b>	<b>100,00</b>



39. ábra. Akác por-forgács utánaprítás utáni frakcióeloszlása

A frakcióanalízis során kapott eredmények alapján (37-39. ábra) megállapítottam, hogy az utánaprításra jellemző frakcióméreték 95-98%-ban a 0,2-1,5mm közötti-, és ezen belül is ~90%-ban a 0,2-1mm közötti szemcseméret tartományban vannak. Jelentős a szerepe a 0,2-0,5mm közötti frakcióknak (50-60% körüli maradványérték). Természetesen a kapott frakció sorrend a gyakorlatban változhat adott technológia mellett. A kialakult pellet tulajdonságát, tehát főként ezek a frakciók tömörítéssel szembeni mechanikai viselkedése határozza meg. Éppen ezért a kutatásaimat elsősorban a 0,2-1mm közötti frakciókra terjesztettem ki, mint leggyakoribb frakcióméretre. Természetesen nem hagyhattam figyelmen kívül a 0,2mm alatti frakciókat sem, ugyanis általános megállapításokat csak akkor tehetek, ha minél szélesebb frakció intervallumban vizsgálom az adott por-forgács halmaz reológia viselkedését. Az 1mm feletti (1-2,5mm) szemcseméreteket egyrészt azért nem vontam a vizsgálataim alá, mert nagyon kis mennyiség állt rendelkezésre belőlük, továbbá a 6 mm átmérőjű nyomócsőbe nem lehetett őket lazán, sérülésmentesen bejuttatni, ezért előtömörítést kellett alkalmaznom, hogy a kezdeti halmazsűrűség (min. 220 kg/m<sup>3</sup>) meglegyen. Az előtömörítés hatására az egyes szemcsék eltöredeznek, vagyis már nem jellemzik megfelelően a kiindulási állapotot, így a mérési eredmények szisztematikáját is befolyásolták volna. Az 1mm feletti por-forgács frakciók mechanikai vizsgálataival kapcsolatban azonban találunk a témával összefüggésben korábbi kutatásokat (melyek: VARGA, 1993; SITKEI, 1981; SITKEI, 1994; SITKEI, 2000).

A frakciók nedvességtartalmát (szárazon és nedvesítve) BOECO SMO 01 típusú automatikus nedvességmérővel mértem meg (40. ábra). A műszer a mérőtálcájára helyezett adott tömegű frakciót (nedves frakció) szabvány szerint 105°C hőmérsékleten tömegállandóságig szárította és közben mérte a tömegcsökkenést. Ezek alapján a kiindulási (nedves tömeg) és a száraz tömegből már meghatározható volt az egyes frakciókhoz tartozó nettó nedvességtartalom az alábbiak szerint (MOLNÁR, 1999)

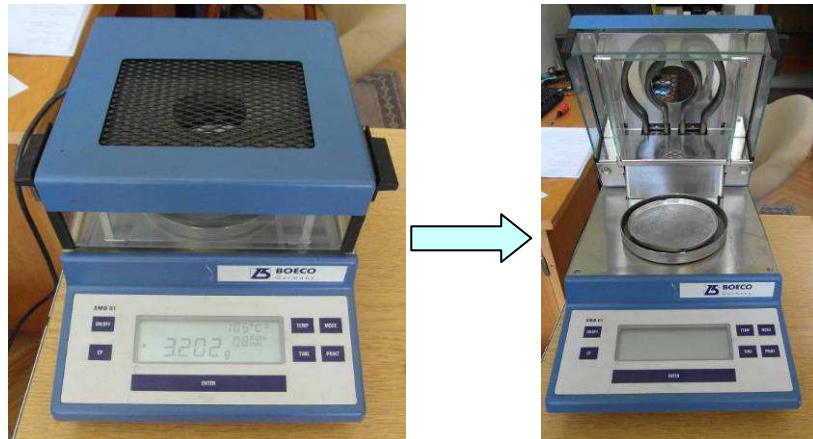
$$u = \frac{m_n - m_0}{m_0} \cdot 100, (\%) \quad (76)$$

ahol:

$m_n$  - a nedves faanyag tömege, (g)

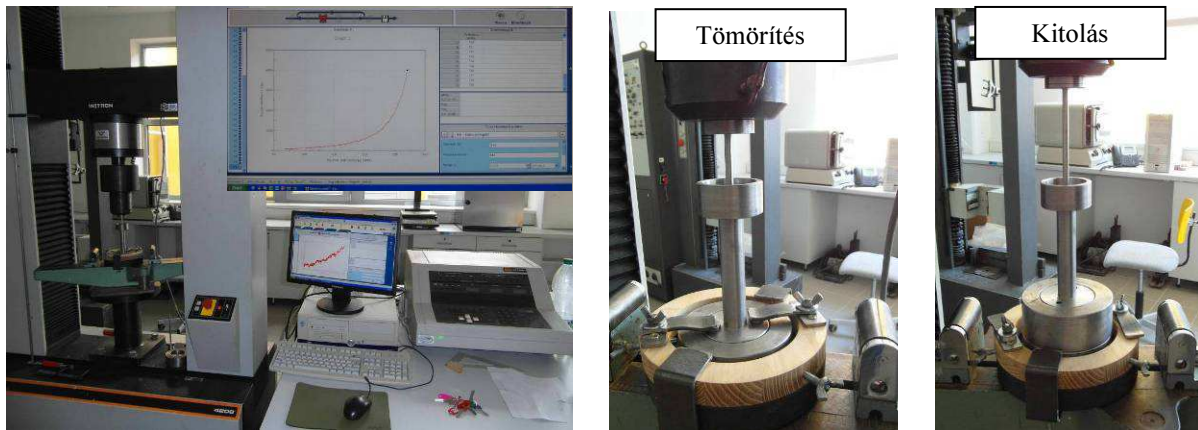
$m_0$  - az abszolút száraz faanyag tömege, (g)

$u$  - a nettó nedvességtartalom, (%).



**40. ábra.** BOECO SMO 01 típusú automatikus nedvességmérő  
(felbontása: 1 mg; pontossága:  $\pm 0,05\%$ )

A tömörítéssel kapcsolatos méréseket INSTRON univerzális szilárdságvizsgáló gépen végeztem el (41. ábra). A 41. ábrán látható, hogy a nyomókehely gépasztalon történő pozicionálásához ugyancsak egyedi tervezésű és kivitelezésű központosító gyűrűt kellett készítenem.



**41. ábra.** Nyomóvizsgálat INSTRON univerzális szilárdságvizsgáló gépen  
(A nyomófej maximális terhelhetősége: 300 kN)

Az INSTRON vezérlő szoftvere lehetőséget adott, arra, hogy a mérések során kapott terhelés ( $F$ ; [N]) – nyomó alakváltozás ( $s$ ; [mm]) diagramokat egy megadott könyvtárstruktúrába elmentsem. A diagramokon kívül a mérési adatok is mentésre kerültek Excel formátumban, amelyek lehetővé tették egyrészt egy adott nyomáshoz tartozó elmozdulás pontos értékének a meghatározását, másrészt pedig az azonos mérések során számított átlagértékekhez tartozó terhelés-alakváltozás görbék elkészítését.

### **A tömörödés hőmérsékletfüggésének gyakorlati megvalósítása**

A pelletálás során a matricahőmérséklet a fellépő nagy falsúrlódások miatt elérheti a 80-90°C körüli hőmérsékletet. Éppen ezért a kutatásaim során vizsgálat alá vontam a faanyag tömörödésének hőmérsékletfüggését is. Ehhez készíteni kellett egy hőmérsékletszabályozó és mérő rendszert, amit a következőkben ismertetek.

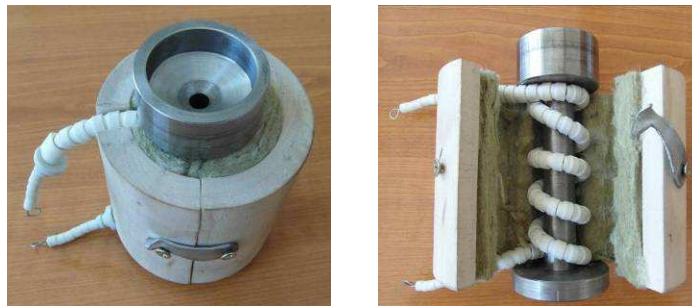
Megoldott feladatok:

1. Fűtés megvalósítása, ezen belül:
  - Fűtési mód kiválasztása

- Fűtési rendszer megépítése, tesztelése
- 2. Rendszer kalibrálása: nyomófej adott teljesítményű fűtésekor a termikus egyensúlyi hőmérséklet mérése, fűtőrendszer skálázása

Felhasznált eszközök:

- *Hő érzékelő szenzor*: réz konstantán anyagokból készített T-típusú hőelem. Az alkotó huzalok 0,2 mm átmérőjűek, kerámiaszigetelésűek. A hőelem jellemzői: -270 - 400°C-ig 0,1°C elméleti pontossággal lehet vele hőmérsékletet mérni. Ez a tartomány éppen megfelelt az igényeimnek, mert a vizsgálatokat 25°C, 80°C, 100°C, 150°C, 200°C-on végeztem el.
- A nyomófejet kívülről a hosszú egyenes szakaszra rátekert kerámia (gyöngy) szigetelésű spirális fűtőszállal melegítjük (42. ábra). A fűtőszál mivel hajlékony, ezért a hőtágulás sem probléma. A fűtőszálat köpenyszerűen veszi körül a szigetelő közetgyapot réteg, amit osztott (ezáltal nyitható) fa palást szorít a nyomófejre (42. ábra). A hőmérséklet mérése a nyomókehely palástjába beépített termopárral történik.



**42. ábra.** Egyedi tervezésű és kivitelezésű hőszigetelt mérőköpeny

A rendelkezésre álló fűtőszál (42. ábra) ellenállása 102  $\Omega$ , hossza 55 cm +5-5 cm merev rész a kapcsoknak. A fűtőszál egy kábelhez hasonlóan a nyomófej köré csavarható spirál alakban, és onnan könnyen el is távolítható. A fűtőszál műszerhez történő összekapcsolását szigetelni kell áramütés ellen, mert az előzetes kísérletek alapján a szál magas hőmérsékletéhez 60 voltnál nagyobb feszültségre volt szükség. Ekkora feszültség szinten az érintésvédelemre is komoly hangsúlyt kellett fektetni. A fűtőszál 230 V-on  $P = U^2/r = 230^2/102 = 520\text{W}$  nagyságú teljesítményt vesz fel. Ekkor  $520\text{W}/230\text{V} = 2,3\text{A}$  áramot igényel folyamatosan. A fűtést valamilyen változtatható feszültségű, legalább 3-5A áramerősséget bíró táplálással kellett megoldanunk. Erre a feladatra egy - a rendelkezésünkre álló - 1000 VA-es teljesítményű toroid transzformátort alkalmaztunk (43. ábra)



**43. ábra.** Toroid transzformátor

Érintésvédelmi okokból a 43. ábrán látható toroid transzformátoron a kapcsokat el kellett burkolni (közvetlen érintés elleni védelem). A transzformátor felépítése miatt a bemenet és a kimenet nincs elszigetelve egymástól, ezért esetleges rövidzár ellen érintésvédelmi kapcsoló



beépítése is szükséges volt. A tervezett kapcsolódoboz tartalmazná ezeket, és egy kapcsolót is. A tápegység kimenő feszültségét a toroid transzformátor saját pótméterével lehet állítani.

#### A korszerű szabályozó rendszer felépítése:

- Tápegység fokozatmentesen állítható kimeneti váltakozó feszültséggel 0-240 V-ig
- Érzékelő: réz-konstatntán termoelem
- Adatgyűjtő kártya és USB interfész (NI 9211 specifikus termopár kártya)
- Vezérelhető kapcsoló szerkezet
- 24 voltos egyenfeszültségű tápegység
- National Instruments (továbbiakban: NI) szabadon programozható mérő és irányítórendszer (részletesen alább)
- LabVIEW környezetben fejlesztett virtuális műszer
- Vezérlő számítógép a mérés céljaira kifejlesztett egyedi szoftverrel

#### *Tápegység*

A fűtőszál táplálására egy fokozatmentesen állítható tápszekrényt készítettünk (44. ábra).



**44. ábra.** Hőmérsékleti értékek szabályozására alkalmas egyedi tervezésű és kivitelezésű tápszekrény

A tápegység a fent említett 1000 VA-es toroid transzformátorral működik. Ez a teljesítmény megfelel a fűtőszál várható teljesítményének. A transzformátor bemenő és kimenő oldala fémes kapcsolatban áll egymással, ezért az áramütések elkerülése végett a szekrénybe beépítettünk egy áramvédő kapcsolót is. Ez akkor szólal meg, ha az áram a védővezető, vagy a kezelő személyen keresztül kezd folyni. A kioldási áram 30 mA. A rövidzár ellen gyors kioldású 10A névleges áramerősségű mindkét pólust megszakító biztosítékpárt szereltünk be. A készülék normál ki és bekapcsolására kétpólusú, a bekapcsolt állapotot fényel jelző kapcsoló szolgál. Ez, és a kétpólusú megszakító a bemeneti oldal esetleges fázis-nulla felcseréléséből eredő kockázatot minimalizálja. A toroid transzformátor közös pontja érintésvédelmi okokból a nulla kell, hogy legyen. Ekkor a kimenet potenciálja a burkolathoz képest is beállított alacsony értékű lesz. A konnektorhoz csatlakozó vezetéken ezért a fázis csatlakozóját megjelöltük. A konnektoron előzetes vizsgálat szükséges fázisceruzával, hogy helyesen lehessen csatlakoztatni a készüléket. A kimenet egy külön konnektort kapott, hogy a fűtőszálat biztonságosan lehessen csatlakoztatni.

#### *Kapcsolódoboz*

A kapcsolódoboz hosszabbító szerűen lett kialakítva. A dobozban az egyik vezeték egy egysarkú váltóérintkezős relén keresztül lett átvezetve. Tervezetten ez a fűtés fázisvezetékét szakítja meg külső 24V-os vezérlő feszültség hatására. A kimenet dupla konnektor, ahol lehetőség van a fűtőszálra jutó feszültséget mérni. Ez a mérések reprodukálhatóságát illetve a beállítást könnyíti meg.



**45. ábra.** Kapcsolódoboz

#### *24V-os tápforrás*

A vezérlőrendszer elemei (NI kártya, relé) 24V feszültséggel működnek. Ennek a táplálására egy kapcsolóüzemű egyenfeszültségű tápegységet is beépítettünk egy dobozba. A dobozon belül oldottuk meg a fogyasztók ellátásainak szétosztását is.

#### *NI vezérlő hardver*

A számítógépes program és az érzékelő/beavatkozó egységek közötti kapcsolatot biztosítja a három felhasznált hardverelem. A termoelem speciális igényű érzékelő. Ezek az igények: nagyfokú erősítés, mert az előállított feszültség mV-os nagyságrendű. A környezeti zaj, különösen az 50Hz-es hálózat zaja néhány száz mV –ot is jelenthet, még laboratóriumi körülmények között is. Ezért differenciál bemenetű erősítőre van szükség, ami nagyfokú zajelnyomást tesz lehetővé. A termoelem működése miatt a mérőeszközhöz való csatlakozásnál újabb parazita termoelemek keletkeznek, ezért tulajdonképpen három termoelem feszültségeinek előjeles összegét tudja a mérőkártya mérni. Erre a problémára ad megoldást a hardverbe beépített hőmérsésen alapuló speciális kompenzáció (CJC azaz cold junction compensation). A harmadik probléma az, hogy a termoelem szolgáltatotta kimenő feszültség nem lineáris függvénye a hőmérsékletnek, ezért linearizációra is szükség van. A felhasznált speciális mérőkártya differenciálerősítés bemenetű, rendelkezik CJC funkcióval, és linearizációval. Ennek köszönhetően az előzetes próbák során alkalmazott termopárok hossza különböző volt, a mért hőmérsékletek csupán 0,3°C különbséget mutattak egymáshoz képest.

#### *Kimeneti kártya*

A felhasznált kimeneti kártya maximum 30V kimeneti feszültséggel és csatornánként 700 mA terhelhetőségű 8 csatornás digitális kimeneti modul. Működését tekintve egy program vezérelt kapcsolósor, ami a forrásként bekötött 24V bemeneti feszültséget juttatja ki az egyes kimenetekre. A kártya ipari kivitelű, ezért alkalmas kisebb relék külön védőtranzisztor nélküli meghajtására is.

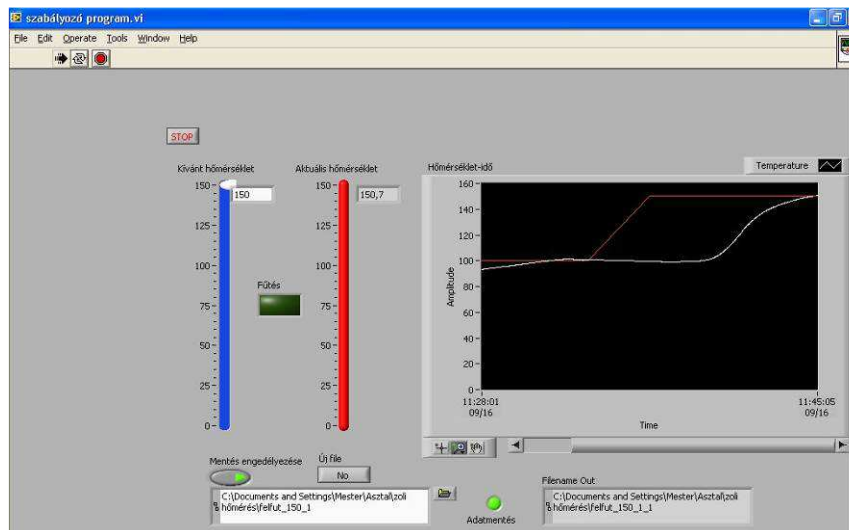


**46. ábra.** NI kártya

### Adatgyűjtő kártyafoglalat (sasszi)

Ez a szerkezeti elem foglalja magába a fent leírt kártyákat. Tartalmaz egy 160 MHz-es órajel adót is, amivel a hardveres időzítések nagyon pontosan megoldhatók, így nagy sebességű mintavételezés is. A foglalat USB kimenetű, így bármilyen számítógépre csatlakoztatható. Alapesetben 8 kártya fér bele. A nagysebességű adatszolgáltatás miatt rendelkezik közvetlene memóriaelérési funkcióval is (DMA), így adatvesztések is minimalizálhatók. (nem kell a processzorra várni az írásokkal)

A mérőrendszer vezérlését NI LabVIEW 2012 rendszerrel fejlesztett szoftver végzi. A fejlesztés eredménye egy bármilyen Windows Xp, vagy magasabb operációs rendszert használó és USB porttal rendelkező számítógépre telepíthető program. Ez a csomag tartalmazza az eszközök meghajtó-programjait is. A szoftver az érzékelőkkel és beavatkozókval USB porton keresztül egy NI 9211 modulfoglalat és NI 9211 hőmérsékletmérő illetve NI 9211 típusú digitális kimeneti modulok segítségével kapcsolódik. A program minden másodpercben elvégző egy hőmérést, majd az értéket összeveti az általam beállított értékkel. Ha a mért hőmérséklet alatta van a beállítottnak, akkor bekapcsolja a fűtést a kimeneti kártya segítségével. A rendszer, tehát egy moduláris PLC-hez hasonlít. Azonban a rendelkezésre álló hardver számítógéppel működik csak. Ez számos előnnyel jár esetünkben: szabadabb programozási lehetőségek, kényelmes felhasználói felület létrehozása, adattípusok egyszerűbb kezelése.



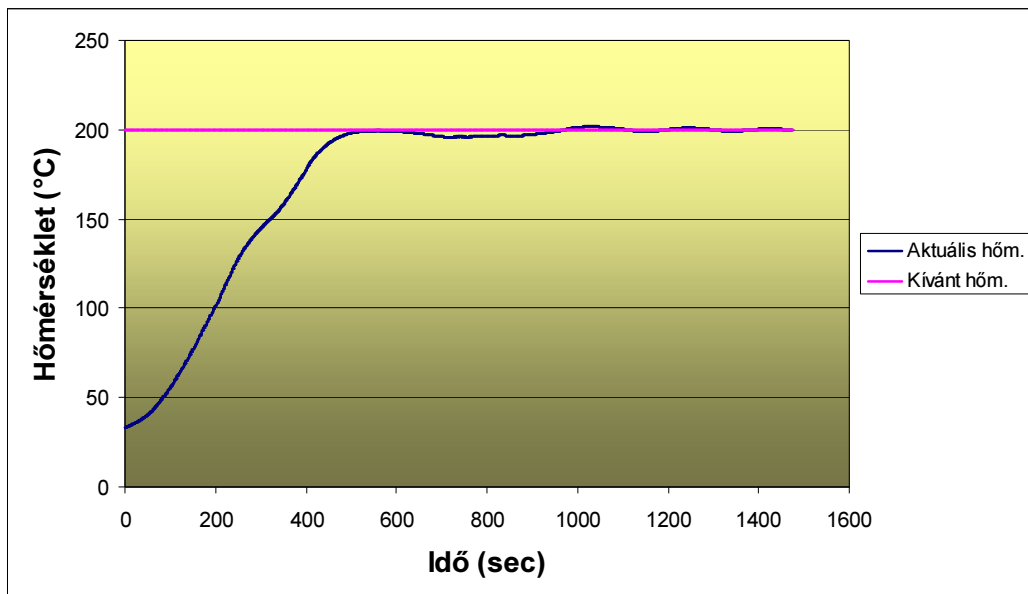
47. ábra. LabVIEW kezelőfelület

A program fő funkciói:

- Felhasználói felület
- Mérés
- Szabályozás
- Adatmentés

A felhasználói felületen (47. ábra) láthatók a beállításért felelős szervek, és az adatmentés szükséges elemei. A mért hőmérséklet pillanatnyi értékét numerikus és grafikus kijelzőn, a mérés kezdetétől felvett értékeket grafikonon lehet megtekinteni. A grafikon nagyítható, tengelyei skálázhatók, így finom részletek megtekintésére is sort lehet keríteni. A kívánt hőmérsékleti értékek beállítására numerikus és grafikus (47. ábrán látható kék hőmérő) beállítási lehetőség is van. Ezáltal gyorsan meg lehet állapítani a mért (47. ábrán látható piros

hőmérő) és a beállított hőmérsékletek viszonyát. Az adatok mentésére is lehetőség van a programon belül. Erre egy a mérési állomány nevének és helyének megadására szolgáló ablak van a programba beépítve. Ide közvetlenül begépelhető az elérési útvonal és a file neve. A mentés folyamatáról kontrolllámpa ad tájékoztatást. A program leállítása a STOP gombbal lehetséges. Ekkor befejeződik a mentés, szabályosan lezárul a program, és kikapcsol a fűtés. A szabályozás hiszterézises komparáláson alapul. A 47. ábrán látható piros görbe a kívánt hőmérsékleti görbe, míg az ábrán látható fehér görbe, pedig az aktuális hőmérsékleti görbe. Az idő elteltével a fehér görbe folyamatosan közelít a szükséges értékhez. Minél hosszabb ideig tart a szabályozás, annál kisebb lesz a kívánt és a tényleges értékek közötti hőmérsékletkülönbség. A kívánt érték elérése felett  $1^{\circ}\text{C}$ -kal lekapcsol a fűtés majd a rendszer hőtehetlensége hatására időben csökkenni kezd a hőmérséklet, és ha a kívánt érték alá süllyed szintén  $1^{\circ}\text{C}$ -kal akkor ismét bekapcsol a fűtőkör. A hőmérséklet csökkenés sebessége erősen függ a beállított és a környezeti hőmérséklet különbségétől. Minél nagyobb a hőmérsékletkülönbség annál nagyobb lesz az időegység alatt a rendszerből távozó hő, ezáltal gyorsabban hűl a nyomófej. Ebben az esetben nagyobb feszültség szinten kellett a gyakorlatban a táplálást megoldani, amit lehetővé tett a fent említett toroid transzformátor. A fűtőszálat tehát változtatható feszültséggel táplálva elérhető a felfűtés meredekségének változtatása. Ennek értelmében minél nagyobb feszültséggel tápláljuk a fűtőszálat, annál meredekebben és időben gyorsabban közelíti meg a felfűtési görbe a kívánt hőmérsékleti értéket. Viszont ennek az a hátránya, hogy nagyobb lesz a hőmérséklet túllendülés is, vagyis időben lassabban fog a görbe a kívánt értékhez közelíteni. A 48. ábrán láthatjuk az elkészült hőmérsékletmérő és szabályozó rendszerünk tesztelését, kívánt hőmérsékleten tartását. A vizsgálatok során a hőntartás ingadozása kevesebb, mint  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  volt.



**48. ábra.** Hőmérsékletfelfutási görbe hőntartással  $200^{\circ}\text{C}$  állandó hőmérsékletig



49. ábra. Az egyedi tervezésű és kivitelezésű hőmérséklet szabályozó és mérőkör működés közben

### 7.1.A MÉRÉSI PARAMÉTEREK MEGVÁLASZTÁSA

A mérési paramétereket az alábbi szempontok alapján választottam meg:

- fafaj: lucfenyő (*Picea abies*), tölgy (*Quercus sp.*), akác (*Robinia pseudoacacia*)
  - terhelési (deformáció) sebesség [ $v_{def}$ ; mm/min]: 2 mm/min; 10 mm/min; 60 mm/min
  - kitolási sebesség [ $v_{kit}$ ]: 8 mm/sec
  - préseelési nyomás [ $p$ ; bar]: 500-1400 bar (50-140 MPa) és 500 bar alatt
  - szemcseméret [ $d_{szemcse}$ , mm]: 0,8-1mm; 0,5-0,8mm; 0,2-0,5mm; 0,063-0,2mm
  - nyomófej átmérő [ $D$ ; mm]: 6 mm; 8 mm; 16 mm
  - nedvességtartalom [ $u$ ; %]: 10-15%; 15-20%; 20-25%
  - deformáción tartási idő [ $t$ ; min]: 1 perctől 10 percig, egy perces leolvasási időközökkel
  - préseelési hőmérséklet [ $\vartheta$ ; °C]: 25°C; 80°C; 100°C; 150°C; 200°C
- *Fafaj*: A célom az volt, hogy a méréseket minél szélesebb körben kiterjesszem, ezért választottam alacsony (fenyő)-, közepes (tölgy)-, és magas (akác) sűrűségű fajtát, melyek abszolút száraz sűrűségi értékei a következők (MOLNÁR, 1999): lucfenyő:  $\rho_{0fenyő} = 430 \text{ kg/m}^3$ ; tölgy:  $\rho_{0tölgy} = 650 \text{ kg/m}^3$ ; akác:  $\rho_{0akác} = 720 \text{ kg/m}^3$ . Természetesen a fenti fajok megválasztását az is indokolta, hogy olyan fajokot kívántam vizsgálataim alá vonni, amelyekből pellet is készül a gyakorlatban. A fenyő- és a tölgy pellet elég nagy számban előfordul a gyakorlatban (sok esetben keverten is), míg az akác kisebb mennyiségben. A tömörítési vizsgálatok során kapott eredményeim a mérnöki pontosság határain belül viszont kiterjeszthetők a vizsgált fajokhoz közeli szilárdságú más faanyagokra is (pl. fenyőhöz közeli nyarakra, stb.)
  - *Terhelési (tömörítési) sebesség*: A terhelési sebesség - ami egyben közelítőleg a porforgácshalmaz deformáció sebessége is- megválasztását elsősorban a gép paraméterei határozták meg. Az INSTRON szilárdságvizsgáló géppel nagy sebességek nem hozhatóak létre, tehát elméletileg végtelen gyors sebességet (~1m/s) nem tudtam előállítani, de ilyen sebesség csak elméleti vonatkozásban lett volna érdekes (végtelen gyors terhelési eset vizsgálata). Az alkalmazott sebességek azonban megfelelnek a gyakorlatnak. Mivel a terhelési sebesség hatással van a pellet sűrűségére, választottam egy lassú (2 mm/min); egy közepes (10 mm/min); és egy gyors (60 mm/min) terhelési sebességet. A mérések nagy részét szobahőmérsékleten végeztem. Tapasztalataim alapján, szobahőmérsékleten 60 mm/min terhelési sebességnél már csökkentek a pellet

sűrűségi értékek, ezért a méréseket általában az általam optimálisnak választott 10 mm/min sebességgel hajtottam végre, mely sebesség arányaiban közelítőleg a 2 mm/min és a 60 mm/min sebesség között van. Az ennél alacsonyabb tömörítési sebesség (2 mm/min) nem javította szembetűnően a pellet sűrűségi értékeket viszont mivel a mérés így időben sokkal tovább tartott volna, ezért csak három mérés erejéig (a statisztikai minimumnak eleget téve) alkalmaztam.

- *Préselési nyomás:* Az előző fejezetekben már utaltam rá, hogy a szabványokban előírt minőségi követelményeknek megfelelő sűrűségű pelletet ( $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$ ) a gyakorlatban 800-1000 bar préselési nyomás mellett kaphatunk. Vizsgálataim alá vontam a nyomófej átmérő befolyásoló hatását is, ezért a méréseket 500-1400 bar közötti nyomásokon hajtottam végre. Mivel általános következtetéseket csak széles nyomástartományok vizsgálata mellett tehetek, ezért a kutatásaimat kiterjesztettem az 500 bar alatti nyomástartományokra is.
- *Szemcseméret; nyomófej átmérő:* a 7. fejezetben leírtak alapján. A szemcsék alakját elektronmikroszkópos felvétel segítségével a függelékben mutatom be.
- *Nedvességtartalom:* A gyakorlatban pelletálásra kerülő por-forgács frakciók optimális nedvességtartalma 10-12%. Vizsgálat alá vontam a nedvesség befolyásoló hatását is. A célom az volt, hogy meghatározzam azt a maximális nedvességtartományt, ahol még megfelelő sűrűségű pelletet elő tudok állítani a minőségi követelmények megtartása mellett. Ennek a fordítottja is igaz, tehát a vizsgálataimmal meghatároztam azt a nedvességhatárt, ami felett már lényegesen csökkent a kialakult pellet sűrűség és nem tarthatóak a szabványokban előírt minőségi követelmények sem. Mivel a legtöbb esetben a pelletálásra kerülő alapanyagot szárítani kell, ezért fontos a nedvességtartalom hatásának a vizsgálata a felhasznált energia csökkentése érdekében. Ennek megfelelően előállítottam a minták (fenyő, tölgy és akác) kiindulási nedvességtartalmán (10-12%) kívül további három nedvességsztályt: 10-15%; 15-20%; 20-25%.
- *Deformáción tartási idő:* A rheológia alapvizsgálatok körébe tartozik a különféle anyagok relaxációs és kúszási tulajdonságainak a vizsgálata. Ennek megfelelően vizsgálat alá vontam a faalapú por-forgács halmazok állandó deformáció hatására bekövetkező relaxációs-, és a belőle közelítőleg meghatározott kúszási folyamatokat. A fentiekben látható deformáción tartási idők megválasztását az indokolta, hogy ha időben minél hosszabban vizsgálom egy adott folyamatot, akkor annál pontosabb képet kaphatok a mechanikai viselkedésekről, jelen esetben a relaxációról és a származtatott kúszásról. A kutatás ugyanis törvényszerűségeket keres akkor is, ha egy adott gyakorlat nem használja ki az egész mezőt (esetemben ez 10 perc).
- *Préselési hőmérséklet:* A gyakorlatban a pellet az előállítása során a jelentős falsúrlódás hatására 80-90°C hőmérsékletre felmelegszik. A hőmérséklet növekedése kedvezően hat a pellet sűrűségére és a nyomásviszonyokra, mint azt majd látni fogjuk a későbbiekben. Éppen ezért vizsgáltam a hőmérséklet befolyásoló hatását is. Ennek megfelelően 25°C-tól egészen a magasabb hőmérsékletek irányába mentem el, így 200°C hőmérsékletig. 200°C felett azért nem végeztem méréseket, mert 200°C-nál magasabb hőmérsékleten (230°C körül) már elértem volna a faanyag halmaz gyulladási hőmérsékletét, ezért itt már tűz-, és robbanás veszélyessé vált volna a mérés.

Érzékelhető, hogy sok tényező van befolyással a pellet sűrűségére. A legnagyobb számú méréseket a fenti felsorolásban lévő aláhúzott paraméterekkel végeztem el. Mivel a mérések jelentős része 6 mm-es nyomófej átmérővel történt, ezáltal jelentősen csökkenteni tudtam a mérési variációk számát. A mérések nagy részét a leggyakoribb szemcsemérettel (0,2-0,5mm) végeztem el, de természetesen figyelembe vettem kisebb mérési számmal (3 mérés) és variációval a többi frakcióméretet is. A fenti szempontok alapján fafajonként 112 mérési variációban (ismétlések nélkül) végeztem el a méréseket. Az egyes méréseket háromszor reprodukáltam, hogy a minimális statisztikai követelményeknek eleget tegyek, így fafajonként közel 330 mérést végeztem.

Alapvető koncepcióm tehát az volt, hogy meghatározzam azokat a paramétereket (változókat), melyek jelentősen befolyásolják a pellet sűrűségét és a préselési energiát. A paraméterek szisztematikus párosításával létrehoztam egy mérési paraméter táblázatot (Lsd. függelék), mely alapján végeztem a méréseket. A mérések elvégzését követően a következő lépés a változók közötti függvénykapcsolatok keresése volt a pellet sűrűséggel ( $\rho_{\text{pellet}}$ ) és a fajlagos munkával ( $W_{\text{fajlagos}}$ ) összefüggésben.

$$\rho_{\text{pellet}} \cdot W_{\text{fajlagos}} = f(p, \sigma_{ny}, D, v_{\text{def.}}, v_{\text{kit.}}, d_{\text{szemcse}}, \mathcal{G}, u, t, \Delta\varepsilon, \varepsilon_m)$$

ahol:

$\sigma_{ny}$  – a nyomószilárdság (fafaji sajátosság), (N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\varepsilon$  – a pellet visszarugózása a kitolás után, (mm)

$\varepsilon_m$  – a pellet tömör magassága a tömörítés végén. (mm)

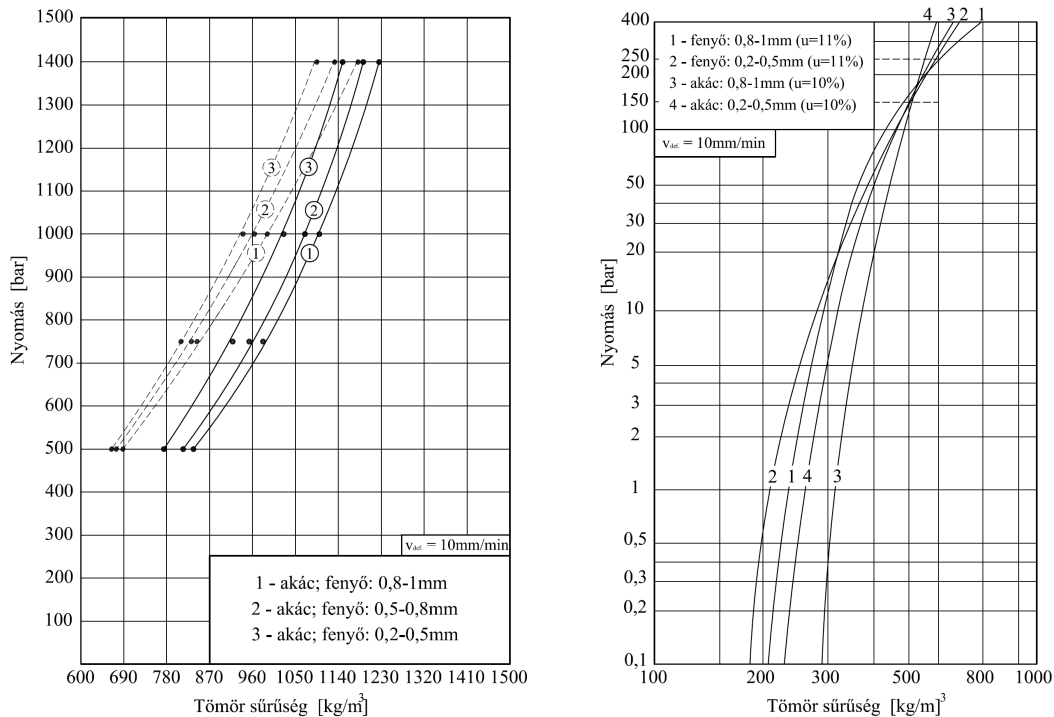
A mérési eredmények grafikus ábrázolása és az eredmények szisztematikus alakulásának segítségével - bizonyos elméleti megfontolások alapján - alapvető célom volt, hogy az egyes változók között általános érvényű összefüggéseket találjak. Ehhez nagy segítséget nyújtott a dimenzióanalízis módszere, melyet a 8.7. és a 8.8. fejezetekben ismertetek.

## 8. KUTATÁSI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE

A következő fejezetekben a témával összefüggő főbb kutatási eredményeimet mutatom be. A közölt eredményeknek mind rheológia ( $\rho_{\text{pellet}}$ ) mind pedig energetikai ( $W_{\text{fajlagos}}$ ) vonzata is van, ezért a dolgozat e két nagy területre fókuszál. Mivel az adatok feldolgozása során számos diagram, ábra és táblázat készült, ezért ezekben a fejezetekben csak a legfontosabbnak ítélt összefoglaló ábrákat mutatom be, melyek az elért eredményeket magukban foglalják és törvényszerűségek, tendenciák vonhatóak le belőlük. Az alfejezetekben látható ábrák három azonos mérési eredmények átlagait tartalmazzák. Fontos megemlíteni, hogy a méréseim jelentős részét 6 mm átmérőjű nyomófejjel végeztem el. Egyrészt azért mert a gyakorlatban is ilyen pelletátmérő a legelterjedtebb, másrészt pedig a hőmérsékletfüggő vizsgálatok is ilyen átmérő tartományban készültek, hiszen a faanyag rossz hővezető képességgel bír (különösen por-forgács alakban), ezért leghatékonyabban úgy érhettem el a faanyaghalmoz teljes keresztmetszetében az azonos hőmérsékletet, hogy a legkisebb átmérőt választottam és a felfűtést követően kb. 2-3 pernyi konszolidációs időt hagytam a por-forgácsnak az átmelegedésre. A további két nyomófejet (8 mm és 16 mm) a relatív falsúrlódásokkal kapcsolatos kutatásoknál alkalmaztam. A vizsgálataim során a szemcseméret elérte az 1 mm-es méretet, ami azt jelenti, hogy akár esetében ez az 1 mm-es méret lehet akár egy teljes sértetlen libriform rost is (Lsd. függelék 114. ábra), míg fenyőnél ez már csak a tracheida hosszának kb. 1/4-e (MOLNÁR, 1999) (Lsd. függelék 119. ábra), tehát mindenképpen roncsolt rostokról beszélhetünk. *Ezekből a faanatómiai sajátosságokból eredő fafaji különbözőségek is befolyásolják a por-forgács halmazok feszültség-deformáció ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) viszonyait az időben. Ezen megállapítás általános érvényben figyelembe vehető a továbbiakban bemutatott kutatásaim során kapott eredmények értékelésénél is.*

### 8.1.A FAFAJ ÉS A SZEMCSEMÉRET HATÁSA A PELLETT TÖMÖR SŰRŰSÉGÉRE

Első lépésben azt vizsgáltam, hogy hogyan befolyásolja a fafaj és a szemcseméret a kialakult pellet tömör sűrűségét ( $\rho_{max}$ )<sup>3</sup> különböző nyomásoknál (baloldali ábra 500 bar feletti tartomány, jobb oldali ábra 500 bar alatti tartomány) közel azonos nedvességtartalom mellett. A függőleges tengelyen ábrázolt nyomás értékek könnyen átszámazhatóak MPa-os értékre (1 bar=0,1 MPa). A méréseket 6 mm átmérőjű nyomófejjel végeztem el.



**50. ábra.** A sűrűség változása a frakcióméret függvényében akác (szaggatott vonal) és fenyő fafajoknál 500-1400 bar közötti és 500 bar alatti nyomásokon

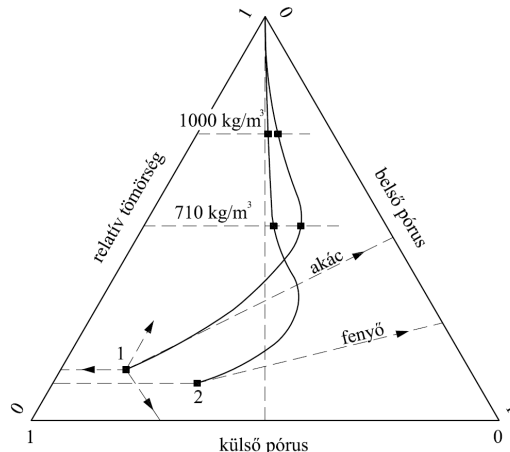
A bal oldali ábrán (50. ábra) látható, hogy a szemcseméret csökkenésével a pellet tömör sűrűsége csökkent adott nyomásokon (500-1400 bar). Megállapítottam, hogy minél kisebb a szemcse szilárdsága (fenyő) annál jobban összetömöríthető, mint pl. a nála keményebb akác. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy egy adott tömör sűrűség eléréséhez fenyő esetében kisebb nyomás szükséges, mint az akácnál. Érdekes megfigyelni, hogy az 500 bar alatti nyomástartományokban (50. ábra, jobb oldal) megfordult a fenti állítás, vagyis ha keményebb a szemcse, akkor jobban tömöríthető a faanyaghalmoz adott nyomáson. Ez azt jelenti, hogy egy adott tömör sűrűség eléréséhez fenyő esetében itt már nagyobb nyomás szükséges, mint az akácnál. Vagyis a faalapú por-forgács halmazok tömörödésének mechanikájában anomáliák figyelhetők meg a préselési nyomás csökkenése hatására, melyek magyarázatát a szemcsék különböző keménységével és a külső és belső pórusok arányaival, az ún. póruselmélettel adom meg SITKEI, 2000 alapján: Az ömlesztett anyag szemcsékből áll, ezért a természetes faanyag saját pórusrendszere por-forgács alakban kiegészül egy további pórusrendszerrel, ami jelen esetben a levegő. A faanyaghalmozban tehát található külső és belső pórus. Tömörítéskor először a külső pórusok csökkennek (fognak). Mikor a sűrűség a kiinduló anyag térfogati sűrűségéhez közelít, akkor a belső pórusok is elkezdnek csökkeni. A tömörítés kezdetén a halmazok kezdeti térfogati sűrűsége ( $\rho_{0\text{út.}}$ ) fenyőre 180-220 kg/m<sup>3</sup>, az akácra 240-280 kg/m<sup>3</sup> volt. A fenyő abszolút száraz térfogati sűrűsége 430 kg/m<sup>3</sup>, az akácé

<sup>3</sup> A tömör pellet ( $\rho_{max}$ ) sűrűség a préselés folyamán összenyomott por-forgács halmaz sűrűsége, vagyis nem azonos a végleges (kirugózott) pellet ( $\rho_{\text{pellet}}$ ) sűrűséggel.



pedig  $720 \text{ kg/m}^3$ . Az abszolút tömör faanyag sűrűsége  $1520\text{-}1620 \text{ kg/m}^3$  (BABOS et al., 1979). Mivel az akác sűrűsége nagyobb a fenyőnél, ez azt jelenti, hogy a külső pórusok nagyrészt egy bizonyos tömörítési nyomásig ( $\sim 250 \text{ bar}$ ) fedezni tudják a szükséges térfogatcsökkenést egy adott sűrűségi értékig ( $500\text{-}600 \text{ kg/m}^3$ ). Vagyis a belső pórusok nagy része a tömörítés végén megmarad, magukat a szemcséket nagyon nem kell tömöríteni. Fenyő esetében ugyanakkor a belső pórusok nagymértékű tömörítése szükséges egy adott térfogatcsökkenés eléréséhez. Ez a magyarázata annak, hogy egy adott sűrűségig (esetemben  $500\text{-}600 \text{ kg/m}^3$ ) az akác kisebb nyomással tömöríthető, annak ellenére, hogy szemcséi keményebbek.

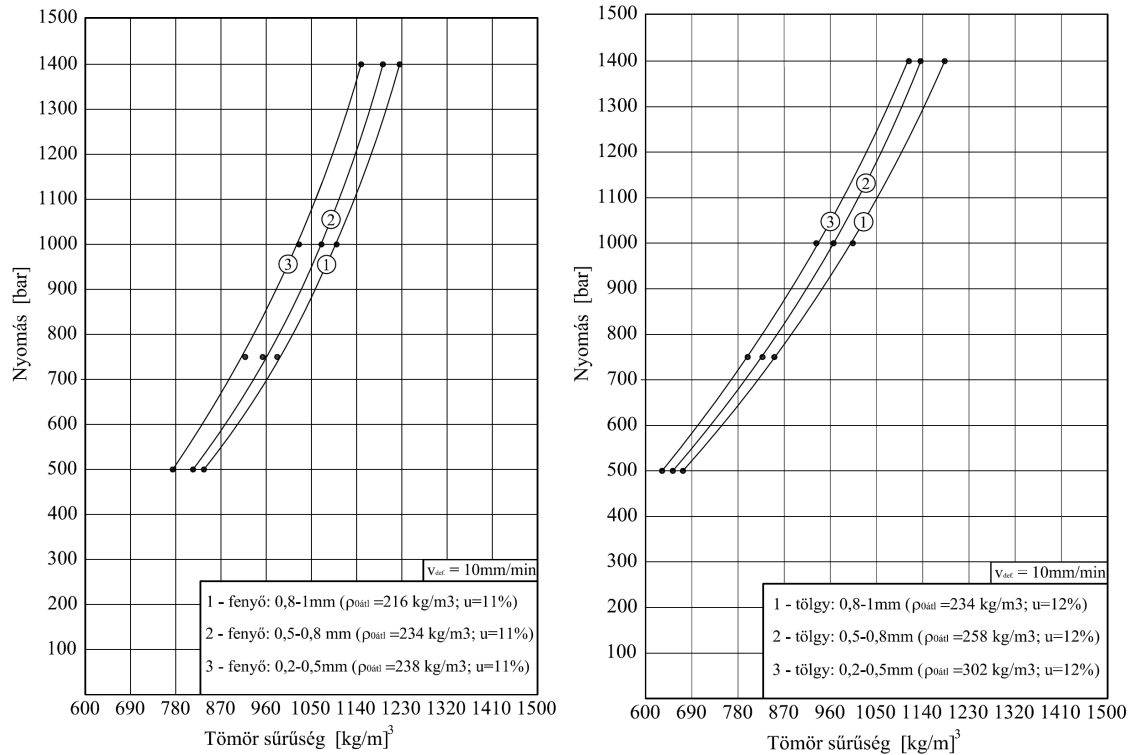
A póruselmélettel kapcsolatos korábbi elméleti okfejtést a szemléletesség kedvéért a következőkben ismertetem röviden SITKEI, 1992 alapján: A folyamat szemléletesen ábrázolható úgynevezett háromszög diagramban (51. ábra). A háromszögön belül minden pont egyértelműen meghatározza a tömörség, a belső és külső pórusok egymáshoz való viszonyát. A görbék menete jellemző a tömörítés lefolyására. A diagram felső csúcsa az abszolút tömör faanyagnak felel meg, tehát a tömörség egy relatív érték. Ha csak a külső pórus változna az összenyomás során, akkor a fa térfogati sűrűségét érnénk el (szaggatott vonalak az „1” és „2” pontból ferdén jobbra). Látható, hogy a puha szemcséjű fenyő nagyobb nyomással tömöríthető az adott sűrűsége ( $710 \text{ kg/m}^3$ ), mint a kemény akác.



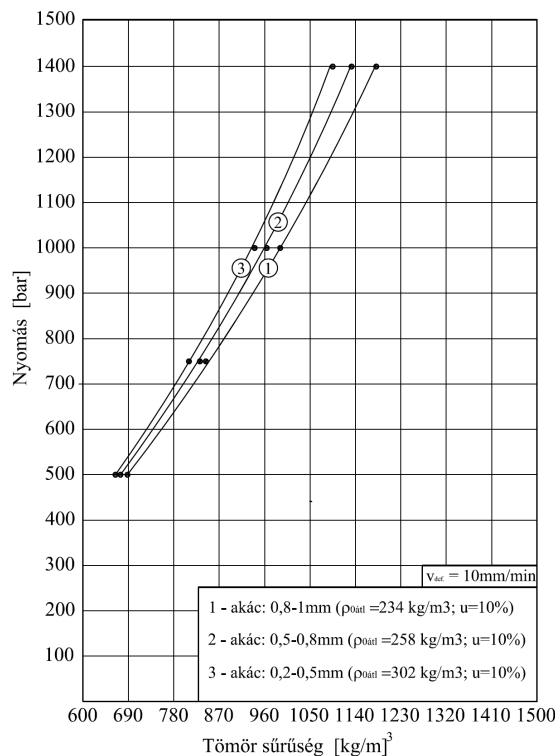
**51. ábra.** A tömörítési folyamat jellemzése háromszög diagramon (SITKEI, 1992)

A különböző szemcseátmérőjű és szemcsekeménységű halmazok kompresszió görbéi rámutattak a külső és belső pórusok szerepére a tömörítés során, vagyis a szemcsekeménység növekedése először a külső pórusok csökkenését teszi lehetővé és csak adott nyomásnál ( $\sim 250 \text{ bar}$ ) lép be a szemcse belső pórusainak csökkenése (Lsd. 50. ábra metszéspont). Az alacsony nyomástartományban a nyomás-sűrűség változását log-log koordináta-rendszerben ábrázoltam (50. ábra jobb oldali ábrarész), melyen látható, hogy a kapott görbék nem egyenesek. Ha gyakorlatban ugyanis egy exponenciális görbét log-log koordináta rendszerben ábrázolunk, akkor a kapott görbe egyenes kell hogy legyen, ami esetemben nem teljesült. Ez azt jelenti, hogy változik a tömörítés folyamán rugalmassági modulus és ezáltal az (57) egyenletnek megfelelően az  $n$  kitevő értéke is. A nyomás növekedésével a kitevő értéke (görbe meredeksége, ami összefügg a rugalmassági modulussal) jelentősen növekszik, tehát nem állandó érték, mint azt már korábban tárgyaltam. Ezért sem helyén való a korábban említett lineáris rheológiai modellek alkalmazása ilyen esetekre, hiszen a lineáris modellekben szereplő rugalmassági modulusok állandó értékkel vannak figyelembe véve, tehát nem alkalmasak a nagy nyomáson történő tömörítési folyamatok leírására.

*Mivel a kutatási témám erősen összefügg a pelletálási paraméterekkel, ezért nem foglalkozom tovább a kisnyomású tartományok vizsgálatával. A további kutatásokat éppen ezért  $500\text{-}1400 \text{ bar}$  közötti nyomástartományokban végeztem el.*



**52. ábra.** Nyomás-sűrűség változása a szemcseméret függvényében fenyő és tölgy mintánál



**53. ábra.** Nyomás-sűrűség változása a szemcseméret függvényében akác mintánál

Az 52-53. ábrákon láthatjuk mind a három fafajra kiterjedt kutatási eredményeimet, ami alapján készítettem az 50. ábrán látható összehasonlító ábrát is. A vizsgálatok során megfigyeltem, hogy a tölgygel kapcsolatos vizsgálati eredmények mindig a fenyő és az akác értékek között helyezkedtek el, ami utal a mérések helyességére, a kapott eredmények szisztematikájára. Éppen ezért sok esetben csak a fenyő és az akác mintákat vontam a

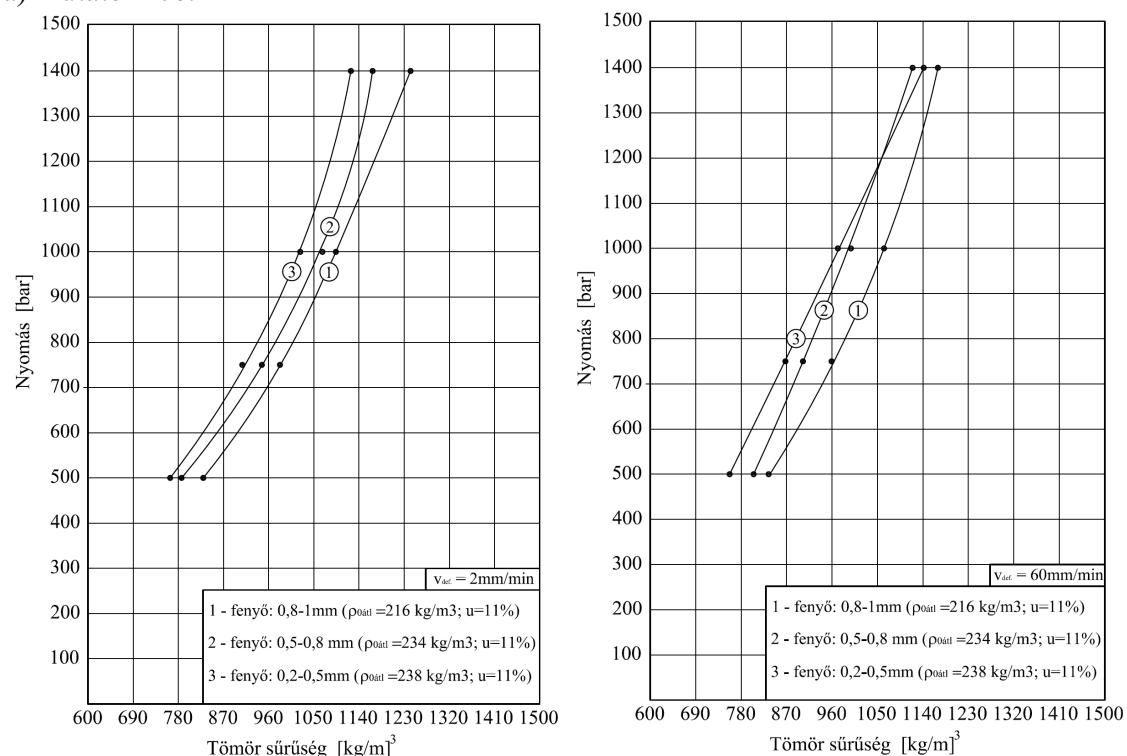
vizsgálatok alá. Az ábrákról (52-53. ábra) további megállapításokat tettem. Fafajcsoporton belül a vizsgált frakció intervallumban (0,2-1mm) 1400 bar nyomáson az alábbi sűrűségeltéréseket tapasztaltam: A frakcióméret csökkenésével a három fafajnál fafajonként átlagosan 6-7%-os tömör sűrűség csökkenést figyeltem meg. A fafajok közötti sűrűségcsökkenés azonos frakcióméretnek esetén, a fenyőhöz képest akác mintánál átlagosan:

- 0,8-1mm szemcseméret tartományban: 3,5%
- 0,2-0,5mm szemcseméret tartományban: 4,3%

Az alacsonyabb nyomástartományokban láthatjuk (52-53. ábra), hogy a sűrűség eltérések kisebb mértékűek (jobban összetartanak a görbék), vagyis, egy adott nyomásérték felett már a szemcsék saját szilárdsága érvényesül jobban, ahogy ezt a fentiekben tárgyalt pórus elmélettel megadtam.

## 8.2.A PRÉSELÉSI SEBESSÉG HATÁSA A PELLETT TÖMÖR SŰRŰSÉGÉRE

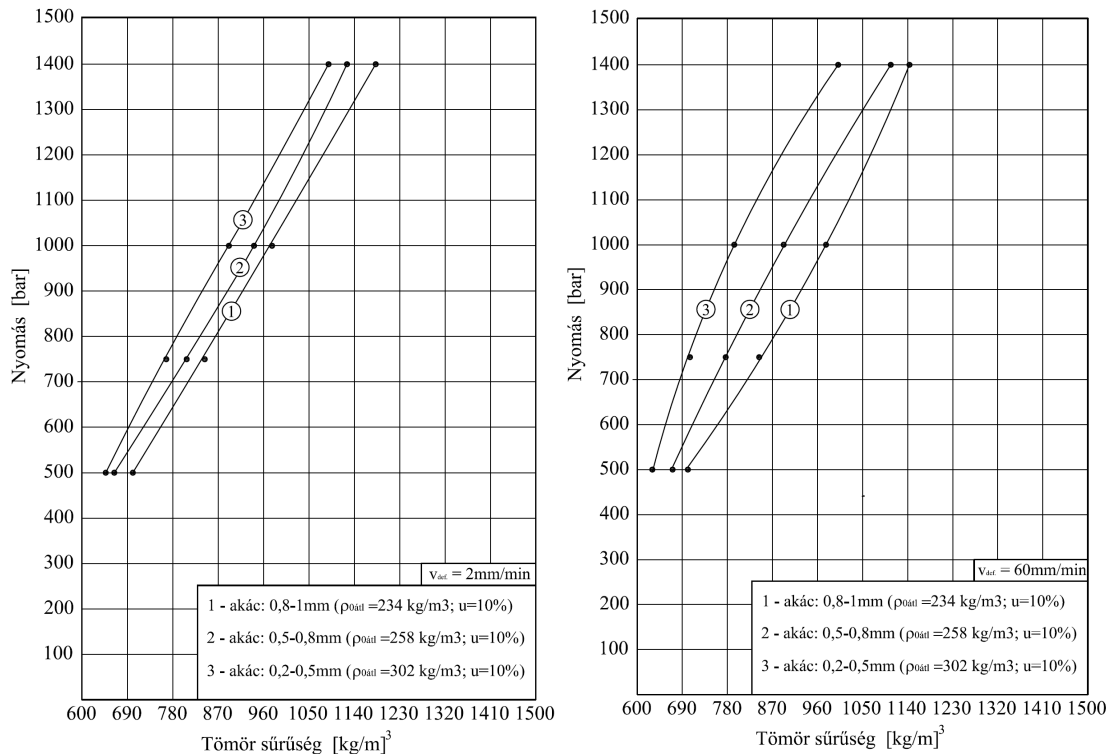
A következőkben a 7.1 fejezetben ismertetett tömörítési vagy deformáció sebességek ( $v_{def}$ ) hatását vizsgáltam a kialakult tömör pellet sűrűséggel összefüggésben. A vizsgálatokat lassú (2 mm/min) és gyors (60 mm/min) tömörítési sebességeknél végeztem el 6 mm-es nyomófej átmérő mellett. A kapott eredményeket fenyő és akác mintákra a következő ábrákon (54-55. ábra) mutatom be:



54. ábra. A préselési sebesség hatása a tömör sűrűség alakulására fenyő mintánál

Fenyő esetében megfigyeltem (54. ábra), hogy a gyorsabb tömörítési sebesség kedvezőtlenül hatott a kialakult pellet tömör sűrűségére. A sebességek aránya ebben az esetben 30 szoros volt. A vizsgálati tartományt figyelembe véve (500-1400 bar) 60 mm/min tömörítési sebesség esetén a sűrűség csökkenés átlagosan 8% volt a vizsgált frakciótartományon (0,2-1mm) belül a 2 mm/min sebességhez képest. Korábban már említettem, hogy a por-forgács halmazok tömörítési folyamatainál állandó terhelés mellett a halmaz tovább tömörödik, kúszik. Lassúbb

(2 mm/min) terhelési sebességnél az faanyagalmaznak több ideje van a deformációra (tömörítésre), mint a gyorsabb sebesség (60 mm/min) esetében. Azt is megfigyeltem, hogy 2 mm/min terhelési sebességnél nem javultak szembetűnően a tömör sűrűségi értékek a 10 mm/min sebességhez képest. Tekintsük meg az akác mintánknál kapott eredményeket.



**55. ábra.** A préselési sebesség hatása a tömör sűrűség alakulására akác mintánál

Akác minta esetében (55. ábra) a két sebességnél még látványosabb eltérés tapasztaltam, melyek a szemcsék szilárdságával vannak összefüggésben. A keményebb, nagyobb szilárdságú szemcse jobban ellenállt a nyomásnak, ezáltal kisebb fajlagos alakváltozást ( $\epsilon$ ) szenvedett. A vizsgálati tartományt figyelembe véve (500-1400 bar) 60 mm/min tömörítési sebesség esetén a sűrűség csökkenés közel 7-8%-os a frakciótartományon (0,2-1mm) belül az lassúbb (2 mm/min) sebességhez képest. Itt is megfigyeltem, hogy 2 mm/min terhelési sebesség esetén átlagosan nem növekedtek a tömör sűrűségi értékek a 10 mm/min sebességhez képest.

Megállapítottam, hogy a tömörítés (deformáció) sebessége hatással van a kialakult pellet tulajdonságaira, elsősorban a sűrűsége. Ha túl gyors a sebesség, akkor a faanyagalmazban lévő deformációs folyamatok nem tudnak kellő képen lezajlani, vagyis a deformáció változás nem tudja követni a sebességváltozást a faanyag viszkoelasztikus tulajdonsága miatt. Megjegyzem, hogy 60 mm/min terhelési sebességnél nem tudtam értékelhetően tartós pelletet készíteni szobahőmérsékleten, vagyis a pelletek többségében szétestek.

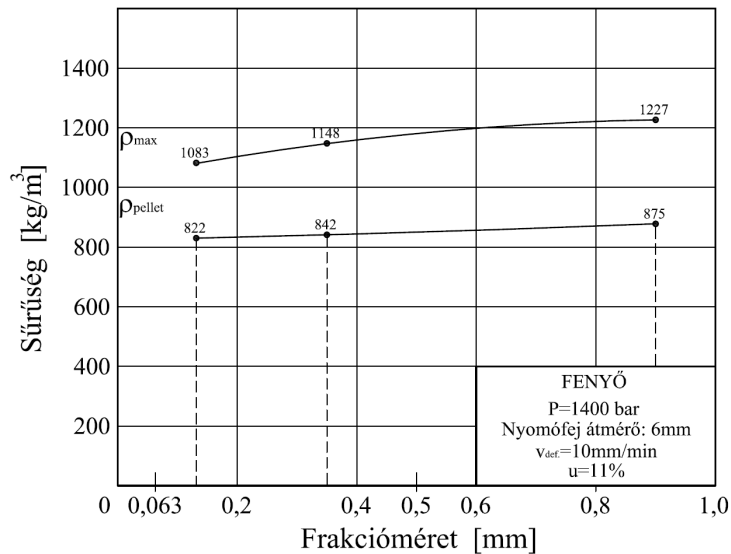
### 8.3.A FAFAJ ÉS A SZEMCSEMÉRET HATÁSA A PELLETT SŰRŰSÉGRE

Egy adott nyomáson összetömörített faanyagalmaz ( $\rho_{max}$ ) a terhelés megszüntetésekor a rugalmas deformációt hirtelen visszaadja (kirugózik = visszarugózik), majd a létrejött maradó deformáció határozza meg a pellet sűrűségét ( $\rho_{pellet}$ ). A pellet nemcsak tengelyirányban, hanem keresztirányban (radiális irányban) is kirugózik, vagyis a nyomócsatorna átmérőjéhez képest a kitolás követően kissé megnövekszik az átmérője. A vizsgálatok során a témával kapcsolatos méréseket 1400 bar nyomáson hajtottam végre, mert az esetek többségében ennél alacsonyabb nyomáson 6 mm-es nyomófej átmérőnél nem tudtam értékelhetően (mérhetően) tartós pelletet előállítani szobahőmérsékleten. A keletkezett pellet hosszát és átmérőjét 0,01 mm felbontású digitális tolómérővel mértem meg (56. ábra). A mért tömeg és a térfogat ismeretében, már számítható volt a pellet sűrűsége.

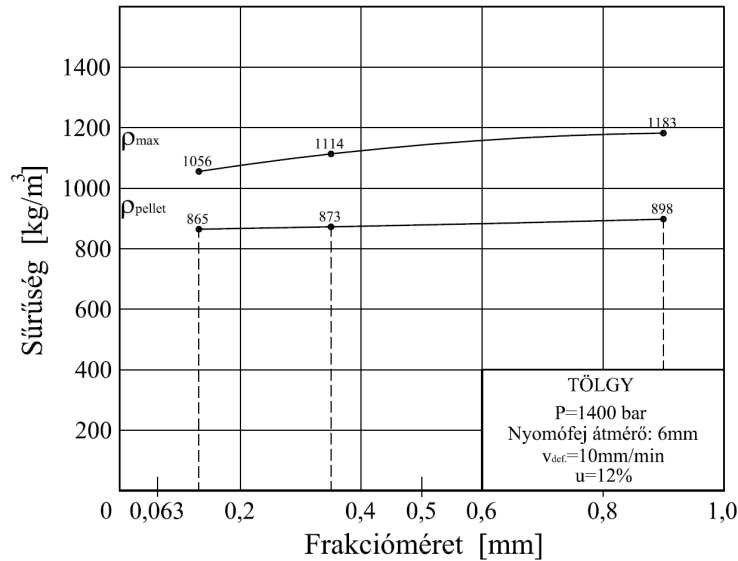


**56. ábra.** Pellet hosszamérés digitális tolómérővel (felbontása: 0,01mm; pontossága:  $\pm 0,02\%$ )

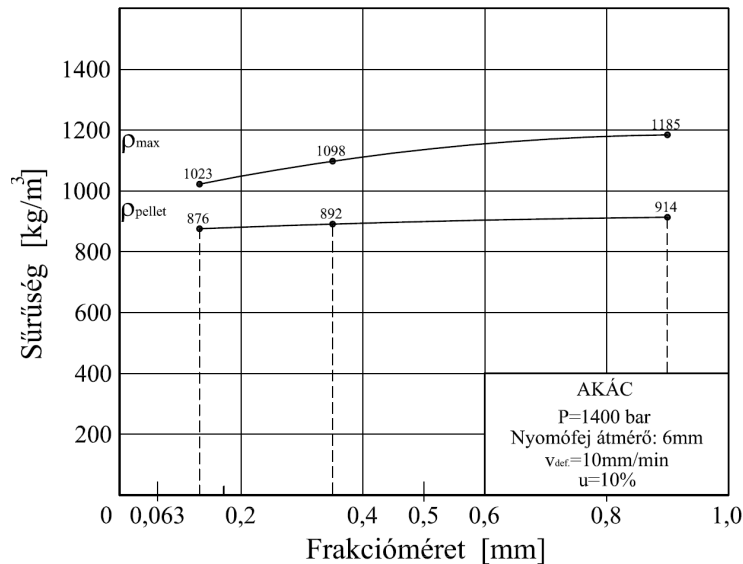
A mérési eredményeket a következőkben ismertetem:



**57. ábra.** A pellet sűrűség változása a frakcióméret függvényében fenyő mintánál



58. ábra. A pellet sűrűség változása a frakcióméret függvényében tölgy mintánál

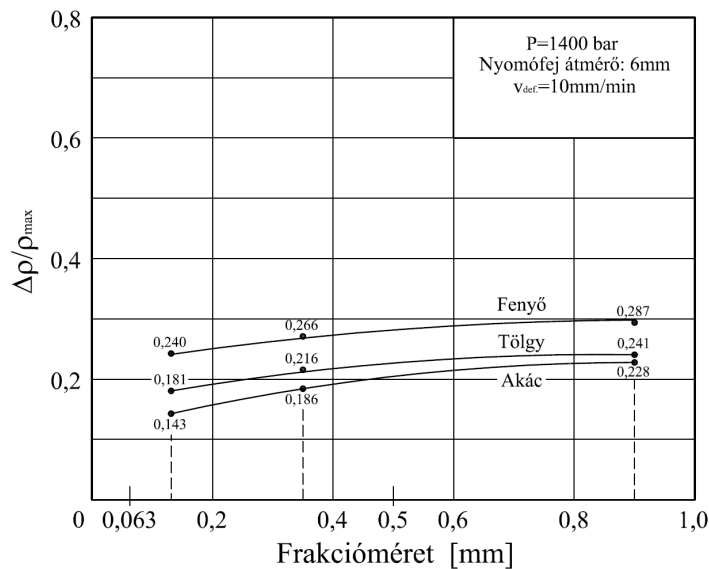


59. ábra. A pellet sűrűség változása a frakcióméret függvényében akác mintánál

A vizsgálatokat az ábrán látható szemcseméret tartományokban végeztem el, konkrétan: 0,063-0,2mm; 0,2-0,5mm; 0,8-1mm. Mivel a frakciótartományok nem fix értékek, ezért frakcióintervallum közepén szerepeltettem a kapott adatokat. Megfigyeltem, hogy azonos fafajnál a szemcseméret csökkenésével a pellet sűrűség csökkent. A csökkenés mértéke mind a három fafaj esetében a vizsgált frakciótartományban közel azonos nagyságú volt, 4-6%. A pellet sűrűséggel együtt a tömör sűrűség is csökkent a szemcseméret csökkenésével mind a három fafaj esetében szintén azonos arányban, vagyis konkrétan 12-14%-kal. A tömörsűrűség változás fafajokon belül, tehát nagyobb arányú volt (közel háromszorosán), mint a pellet sűrűség változás. A sűrűségváltozás összefügg a relatív kirugózással és a relatív maradó deformációval, mint azt majd látni fogjuk a későbbiekben. Már korábban is megállapítottam, hogy adott fafaj esetében, ha nagyobb a szemcseméret, akkor adott nyomáson jobban összetömöríthető a halmaz, ezért nagyobb lett a tömör-, és vele együtt a pellet sűrűség. Az ábrákon (57-59. ábra) ez jól megfigyelhető. A tölgy minta mérési adatai szisztematikusan továbbra is a fenyő és az akác értékek közé estek. Megállapítottam továbbá, hogy a fenyő jobban összetömöríthető, mint a nála keményebb akác, vagyis fenyő esetében a fajlagos alakváltozási értékek tömörítéskor (1400 bar nyomáson)  $\varepsilon=0,8-0,85$  között adódtak, míg

akácnál  $\varepsilon=0,7-0,75$  értékeket kaptam. A fenyő tömör sűrűségének növekedése a vizsgált szemcseméret tartományban (0,063-1mm) az akáchoz képest átlagosan 4-6%, míg a pellet sűrűség csökkenés ezzel szemben szintén 4-6%. Tehát fenyő esetében a nagyobb tömör sűrűség ellenére, kisebb lett a pellet sűrűség. Ez azzal magyarázható, hogy a fenyőnek a tehermentesítést követően nagyobb volt a relatív visszarugózása (61. ábra), mint az akácnak, ezzel összefüggésben kisebb relatív maradó deformációt szenvedett (62. ábra), ezáltal a pellet sűrűségi értékek is kisebbre adódtak. Ezt úgyis megfogalmazhatjuk, hogy ugyan azt a sűrűségi értéket a fenyő nagyobb nyomással éri el, mint az akác. Ez a gyakorlatban összefüggésben van a pelletmatrica szélességével, ugyanis pelletáláskor a puhább (kisebb szilárdságú) fafajokhoz szélesebb matricát alkalmaznak növelve ezzel a tömörítési nyomást. Nem szabad megfeledkeznünk azonban arról sem, hogy a hőmérséklet pozitív hatással van a pellet sűrűségére. A későbbiekben látni fogjuk, hogy szisztematikusan a hőmérséklet hatására is jobban kirugózik a fenyő, mint az akác, tehát van realitása a gyakorlatban alkalmazott eltérő matrica szélességeknek.

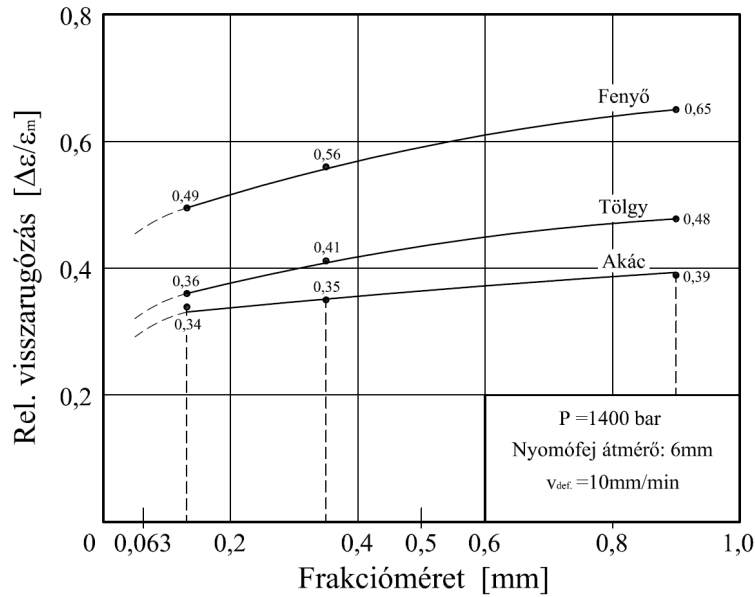
A pellet sűrűségének a változását a tömör sűrűséghez viszonyítva a következő ábrán láthatjuk (60. ábra)



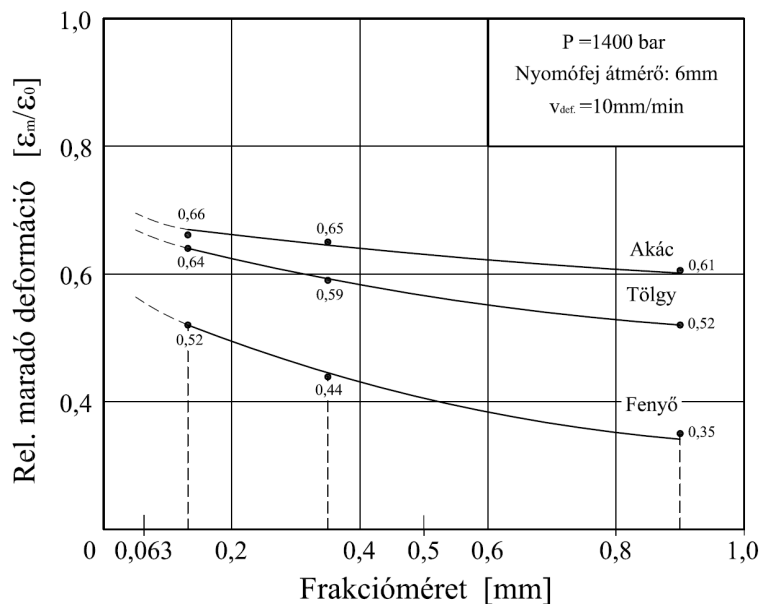
60. ábra. A  $\Delta\rho/\rho_{max}$  viszony a frakcióméret függvényében

Az ábrán (60. ábra) a pellet sűrűségének relatív változását jellemző  $\Delta\rho/\rho_{max}$  viszonyt láthatjuk. Minél nagyobb a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  érték, annál nagyobb lett a pellet végleges sűrűség és a tömör sűrűség közötti különbség, ami összefüggésben van a relatív visszarugózással. A 60. ábra alapján az is megfigyelhető, hogy a szemcseméret csökkenésével csökkent a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  érték, tehát érzékelhető, hogy kisebb lett a faanyagalmaz visszarugózása és ezáltal nagyobb lett a maradó deformáció.

A kapott értékek alapján készültek a relatív visszarugózást és a relatív maradó deformációt jellemző görbék (61-62. ábra).



**61. ábra.** A relatív visszarugózás változása a frakcióméret függvényében 6 mm-es nyomófej átmérőnél



**62. ábra.** A relatív maradó deformáció változása a frakcióméret függvényében 6 mm-es nyomófej átmérőnél

ahol:

$\Delta\varepsilon$  - a visszarugózás értéke; (mm)

$\varepsilon_m$  - a tömör pellet magassága; (mm)

$\varepsilon_0$  - a kirugózott (visszarugózott) pellet magassága; (mm)

A relatív visszarugózási értékeket a 61. ábrán láthatjuk. A relatív értékek dimenzió nélküli értékek. A fenyő adott nyomáson jobban visszarugózik, mint az akác. Megfigyeltem, hogy a szemcseméret csökkenésével a relatív visszarugózás csökkent, a relatív maradó deformáció pedig nőtt. Fenyő esetében a relatív visszarugózás csökkenés 25%, míg akácnál csupán 13% volt a vizsgált frakcióintervallumban. A keményebb és nagyobb szilárdságú szemcse jobban ellenállt a nyomásnak, ezért a tömörítés során kisebb fajlagos alakváltozást ( $\varepsilon$ ) szenvedett. A kisebb fajlagos alakváltozás miatt csökkent a tömörítés során a faanyagalmazba bevitt

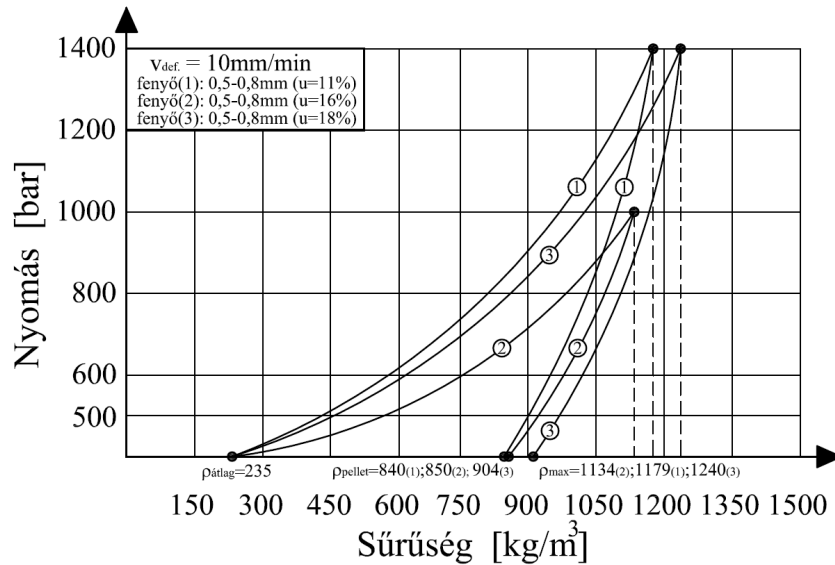


deformációs feszültség nagysága (ezzel kapcsolatos kutatásokat a későbbiekben részletesebben tárgyalom). A pellet végleges tartósságát, sűrűségét a maradó deformáció határozza meg. Minél kisebb a szemcseméret, annál kevésbé rugózik vissza a faanyaghalmoz, tehát annál nagyobb lett a maradó deformáció. Ez megfigyelhető az akác és a fenyő minták esetében a 62. ábrán. A gyakorlatban az elvárt minőségi követelményeknek megfelelően  $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$  sűrűségű pelletet vizsgálataim alapján minimum  $\varepsilon_m=0,8$ -as relatív maradó deformáció mellett érhetünk el, amihez kutatásaim alapján tömörítéskor  $\varepsilon=0,8-0,85$  fajlagos alakváltozás szükséges. A relatív maradó deformáció értéke szobahőmérsékleten akác mintánál  $\varepsilon_m=0,66$  volt, amihez  $876 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűség társult. Megjegyzem, hogy a relatív maradó deformáció változás nem lineáris függvénye a pellet sűrűségnek!

További megállapítás, hogy az ábrákon (61-62. ábra), látható görbék sem a 0-hoz (61. ábra) sem az 1-hez (62. ábra) nem tartanak (szaggatott vonal). Ennek az a magyarázata, hogy ha nincsen frakció (a szemcseméret közel zérus), attól még van relatív kirugózás és maradó deformáció. Erre jó példa a fémek, ahol gyakorlatilag nincsen frakció, vagyis nagyon kicsik az anyagot alkotó elemi részek. De attól még az acél visszarusog (a rugalmas deformációt visszaadja) a terhelés megszüntetése után a rugalmas (Hooke) tartományon belül. Ennél nagyobb terhelésnél pedig maradó deformációt szenved.

#### **8.4. AZ ALAPANYAG NEDVESSÉGTARTALMÁNAK HATÁSA A PELLETT SŰRŰSÉGRE**

Hivatkozva a 7.1-es fejezetben leírtakra: A gyakorlatban pelletálásra kerülő por-forgács frakciók optimális nedvességtartalma 10-12%. Ezért vizsgálat alá vontam a nedvesség befolyásoló hatását. A célom az volt, hogy meghatározzam azt a maximális nedvességértéket, ahol még tartós pelletet elő tudok állítani a minőségi követelmények megtartása mellett. Ennek a fordítottja is igaz, tehát a vizsgálataimmal kimutattam azt a nedvességhatárt, ami felett már lényegesen csökken a kialakult pellet sűrűség és nem tarthatóak az elvárt minőségi követelmények sem. Mivel a legtöbb esetben a pelletálásra kerülő alapanyagot szárítani kell, ezért fontos a nedvességtartalom hatásának a vizsgálata a felhasznált energia csökkentése érdekében. Ennek megfelelően előállítottam a minták kiindulási nedvességtartalmán (10-12%) kívül további három nedvességi osztályt: 10-15%; 15-20%; 20-25%. A méréseket 6 mm-es nyomófej átmérővel végeztem el. A faanyaghalmoz nedvességtartalmát a 7. fejezetben ismertetett BOECO SMO 01 automatikus nedvességmérővel mértem meg. Megjegyzem, hogy a dolgozat terjedelmi korlátai miatt az itt látható ábrák a teljesség igénye nélkül kerültek bemutatásra két szemcseméret tartományban. Természetesen a kutatás kiterjedt a 0,2-1mm-es frakcióintervallumra is, mely alapján kijelenthetem, hogy az itt bemutatott eredmények megfelelően jellemzik a valóságot. A szemcseméret hatása nem olyan jelentős, átlagosan csupán  $\pm 5\%$  eltérést tapasztaltam a pellet sűrűségi értékekben a közölt eredményekhez képest a kiterjedt 0,2-1mm szemcseméret tartományban.



**63. ábra.** A nedvességtartalom hatása a pellet sűrűségére fenyő mintánál (nyomófej átmérő: 6 mm)

Az ábrán (63. ábra) a fenyő minta sűrűségváltozását látjuk állandó nyomáson (1400 bar) különböző nedvességtartalmi értékek mellett. Látható, hogy a nyomás növekedésével a sűrűség progresszíven növekszik. Mivel a mérési pontok 1000 bar és 1400 bar nyomáshoz tartoznak, ezért az alacsonyabb tartományokban csak érzékeltetem a progresszív változást. A 63. ábrát a következőképpen kell értelmezni: Kísérjük végig példaképpen az 1-es görbe alakulását. Adott egy 0,5-0,8mm frakciójú, laza halmazsűrűségű ( $\rho_{0\text{átlag}}$ ) por-forgács halmaz 11%-os nedvességtartalmi értékkel, melyet adott nyomáson (1400 bar) tömörítünk. Az így kapott tömör sűrűség  $\rho_{\text{max}} = 1179 \text{ kg/m}^3_{(1)}$ . A terhelés megszüntetésekor a faanyag halmaz kirugózását követően megkaptuk a pellet sűrűségét, ami  $\rho_{\text{pellet}} = 840 \text{ kg/m}^3_{(1)}$ . *Itt meg kell jegyezni, hogy a nedvességtartalmi értékek vizsgálatánál újabb mérési sorozatokat végeztem, melyek eredményei eltérhetnek az eddigiekben bemutatott értékektől, azonos alapanyag paraméterek esetében! Az eredmények továbbra is 3 mérés átlagait tartalmazzák.* Megfigyeltem (63. ábra), hogy ha nagyobb a faanyag halmaz nedvességtartalma, akkor adott nyomáson (1400 bar) jobban összenyomható egy bizonyos nedvességtartalmi határértékgig, mint kisebb nedvességtartalom esetében. A nedvességtartalom növekedésével nagyobb lett a tömör-, és vele együtt a pellet sűrűség, csökkent a kirugózás, nőtt a maradó deformáció. Érdemes megemlíteni, hogy fenyőnél nedvesebb frakciónál ( $u=18\%$ ) kisebb nyomáson (1000 bar) nagyobb pellet sűrűséget kaptam ( $850 \text{ kg/m}^3$ ), mint szárazabb frakciónál ( $u=11\%$ ) nagyobb nyomáson (1400 bar;  $840 \text{ kg/m}^3$ ). Ugyanezt a tendenciát tapasztaltam tölgy és akác minta esetében is. A nedvesség hatására a faanyag plasztikus és deformációs képessége növekszik, vagyis adott sűrűség kisebb nyomással érhető el. Nyomás hatására egyrészt a szemcsék felülete deformálódik (érintkező felület változik, Lsd. függelék) másrészt a farészekből nedvesség távozik, melyek csökkentik a cső fala és a halmaz közti súrlódási tényező értékét.

Természetesen a végtermék (pellet) nedvességtartalma is nagyobb lett ezáltal, ami viszont csökkenti a fűtőértékét (11. táblázat). Számításaim alapján 1% alapanyag nedvességtartalom növekedés, átlagosan mintegy 14 kWh (50 MJ) szárítási-energia növekedést von maga után tonnánként a rosttelítettségi határig ( $u \sim 30\%$ ). A rosttelítettségi határ alatt a kötött vizet csak többlet energiával tudjuk elpárologtatni, vagyis  $u < 30\%$  alatti tartományban további 1%-os nedvesség növekedés átlagosan 20 kWh (72 MJ) szárítási-energia növekedést von maga után a 1 tonna alapanyagra vonatkoztatva.

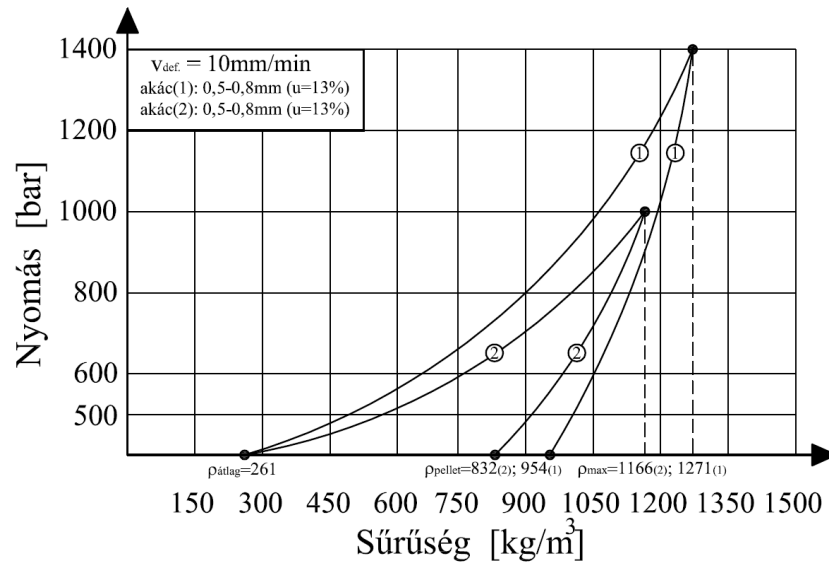
**11. táblázat.** A nedvességtartalom és a fűtőérték közötti kapcsolat (MOLNÁR, 1999)

Víz tartalom %	10	15	20	30	40	50
Fűtőérték (MJ/kg)	16,56	15,48	14,48	12,24	10,44	8,28
Fűtőérték (kWh/kg)	4,6	4,3	4,0	3,4	2,9	2,3

A 11. táblázat alapján láthatjuk a fűtőérték változását a nedvességtartalom függvényében. Alapul véve a 63. ábrán lévő nedvességtartalmi értékeket (11% és 18%), megállapítottam, hogy a fűtőérték közel 10%-kal csökken, ha a pellet nedvességtartalma 11%-ról 18%-ra változik. Tehát 1 kg pelletre vonatkoztatva a kutatási eredményeket a következő megállapításokat tettem:

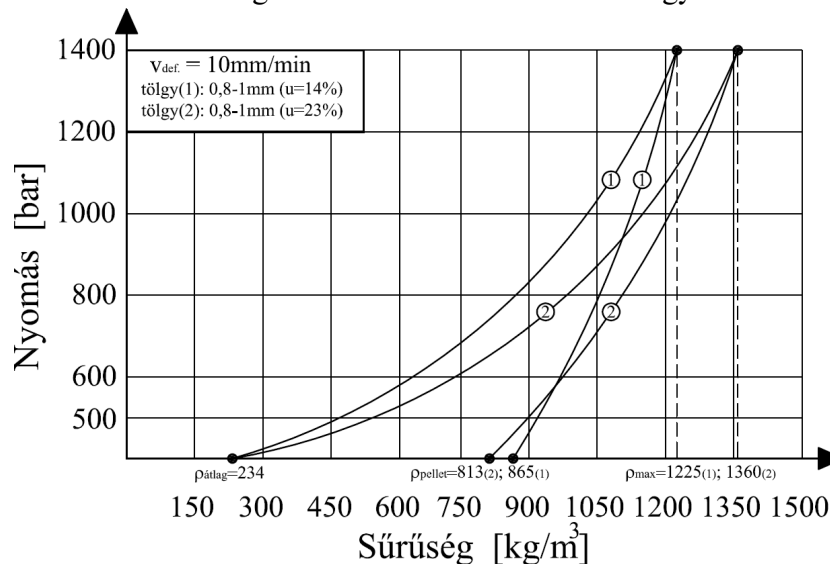
- A fajlagos szárítási energia 30%-ról 11%-ra történő szárítás esetén: ~0,266 kWh (0,96 MJ). Míg 30%-ról 18%-ra történő szárítás esetén ez az érték ~0,168 kWh (0,60 MJ). Vagyis átlagosan mintegy 30%-kal csökkenthető a szárítás során felhasznált energia mennyisége 7%-os alapanyag nedvességtartalom növekedés mellett.
- A pellet fűtőértéke ~10%-kal csökkent a 7%-os nedvességnövekedés hatására. A fűtőérték csökkenésével, viszont növekszik a korom és a károsanyag kibocsátás, ami negatívan hat a kazán élettartamára és a környezeti emissziós terhelésre. Hozzá kell tenni, hogy a nedvesség növekedéssel arányosan növekszik a pellet tömege is, ez pedig a logisztikai költségek növekedését vonja maga után.
- A nedvességtartalom növekedésével ( $u < 20\%$ ) nagyobb lett a pellet sűrűség, és ezzel együtt csökkent a kirugózás, nőtt a maradó deformáció.
- A pellet tartóssága, állékonysága romlott a növekvő nedvességtartalomnál ( $u > 20\%$ ) és a pellet kisebb sűrűségű lett, palástja felhasadt, töredezett lett és sok esetben szétesett. Ezt megfigyeltem 80°C-on is.
- Azt is figyelembe kell venni, hogy a pellet a kiszállítást követően a rendeltetési helyén az ottani klímaviszonyoknak megfelelően továbbszáradhat, aminek hatására megrepedezhet, széteshet, tehát mechanikai tartósságát elveszti. Ez utóbbi kihat tüzeléstechnikai hatások csökkenésére.

A gazdasági döntések előkészítésében a felsoroltakat mérlegelni kell. Figyelembe véve a fent leírtakat megállapítottam, hogy összességében negatívba megy át a mérleg, ha az optimális nedvességtartalomhoz képest közel 10%-kal növekszik a pellet nedvességtartalma. Az ipari gyakorlatban a tömörítés mivel 80-90°C-on megy végbe, ezért a 10%-os alapanyag nedvességtartalom különbség a végtermék (pellet) nedvességtartalom különbségét kisebb mértékben változtatja, de egyben rontja is annak tartósságát, sűrűségét, stb.



**64. ábra.** A nedvességtartalom hatása a pellet sűrűségére akác mintánál (nyomófej átmérő: 6 mm)

Azonos nedvességtartalom mellett a nyomással arányosan változik a tömör és a pellet sűrűség, ami megfigyelhető a 64. ábrán. Megállapítottam, hogy 28%-os nyomáscsökkenés (1400-1000 bar) átlagosan 8%-os tömör és 13%-os pellet csökkenést vont maga után akác mintánál, de ugyanez megfigyelhető fenyő és tölgy minta esetében is. Tehát 1% nyomásváltozás jó közelítéssel átlagosan 0,3% tömör és 0,45% pellet sűrűség változást eredményez az optimális nedvességtartalmi intervallumon belül szobahőmérsékleten. Ez a változás fenyő mintánál a következő volt: 1% nyomásváltozás átlagosan 0,35% tömör és 0,5% pellet sűrűség változást eredményezett, tehát azonos arányban változott, mint az akác. Nem szabad megfeledkeznünk, hogy ezek a számított arányok lineáris összefüggést feltételeznek a nyomás-sűrűség viszony között, ezért csak a szemléletesség kedvéért alkalmaztam ezt az egyszerűsített módszert.

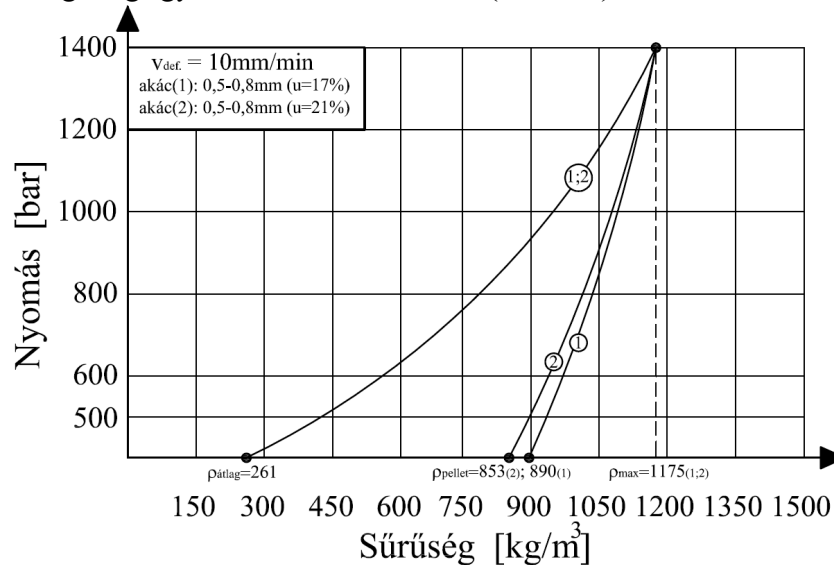


**65. ábra.** A nedvességtartalom hatása a pellet sűrűségére tölgy mintánál (nyomófej átmérő: 6 mm)

A következőkben tölgy mintán láthatjuk, hogy egy bizonyos nedvességtartalom (23%) mellett, már romlott a pellet sűrűség. A 65. ábrán látható, hogy 23%-os nedvességtartalomnál a tömör sűrűség 11%-kal növekedett (2-es görbe) a pellet sűrűség viszont 6%-kal csökkent a

14% nedvességtartalomhoz képest (1-es görbe). Tehát a túlzott nedvességtartalom „szétveti” a pelletet. Ez megfigyelhető az ábrán is, hiszen látszik, hogy sokkal nagyobb a 2-es görbe kirugózása az 1-es görbéhez képest.

Ugyanez a jelenség megfigyeltem akác mintánál is (66. ábra).



**66. ábra.** A nedvességtartalom hatása a pellet sűrűségére akác mintánál (nyomófej átmérő: 6 mm)

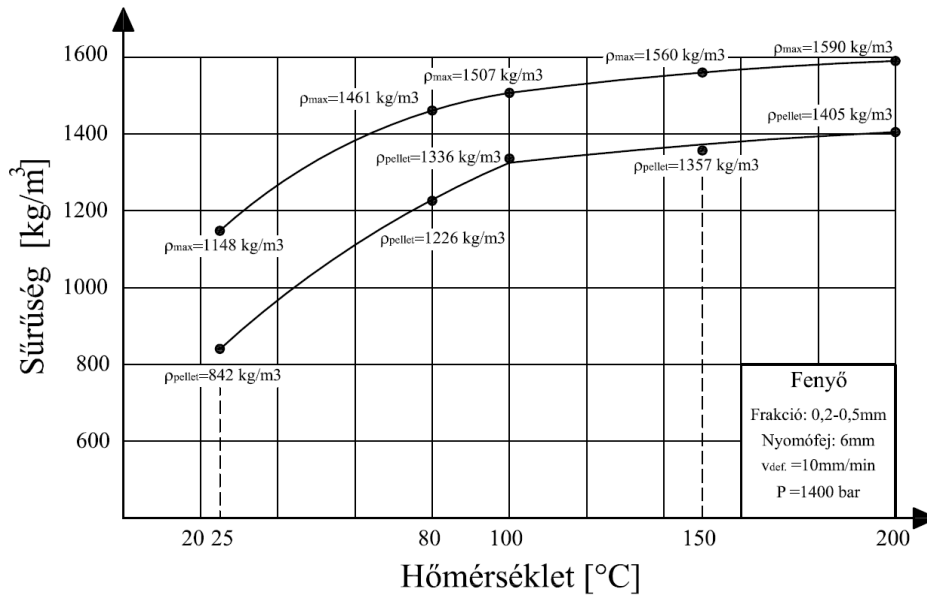
Akác mintánál is láthatjuk (66. ábra), hogy 20% feletti alapanyag nedvességtartalom mellett, romlottak a pellet sűrűségi értékek és vele együtt a mechanikai tulajdonságok. Ugyanezt tapasztaltam fenyő mintánál is.

Végeredményben megállapítottam, hogy a nedvesség növekedésével faanyag plasztikus és deformációs képessége növekszik, vagyis adott pellet sűrűség kisebb nyomással érhető el egy bizonyos alapanyag nedvességi határértékig. Nyomás hatására egyrészt a szemcsék felülete deformálódik (érintkező felület változik, Lsd. függelék) másrészt a farészekből nedvesség távozik, melyek csökkentik a cső fala és a halmaz közti súrlódási tényező értékét. A nedvességtartalom növekedésével  $12% < u < 20%$  közötti nedvességtartományban a pellet mechanikai tartóssága (növekvő nedvességtartalom mellett a fűtőértéke is) gyengült, de a sűrűsége átlagosan 7%-kal nőtt. A 20%-os alapanyag nedvességtartalom felett a vizsgált frakcióintervallumban (0,2-1mm) a pellet sűrűségi értékek csökkentek és sok esetben a pellet szétesett. Az alapanyagot a gyakorlatban, tehát mindenképpen 20%-os nedvességtartalom alá kell szárítani. Természetesen ezek a kutatások szobahőmérsékleten történtek, de méréseimmel kimutattam, hogy ez a 20%-os nedvességtartalmi korlát helyén való a 80-90°C-os préseleési hőmérsékletnél is. Az ok, amiért magasabb nedvességtartalomnál nem áll össze a pellet, a folyadékinkompresszibilitásával magyarázható.

### 8.5.A HŐMÉRSÉKLET HATÁSA A PELLETT SŰRŰSÉGRE

A faanyag, mint komplex makromolekulás rendszer, hő hatására rendkívül bonyolult, összetett kémiai és fizikai-kémiai változásokon megy keresztül. A növényi eredetű anyagok három fő alkotórésze a cellulóz, a hemicellulóz és a lignin. E természetes polimerek hő hatására igen eltérően viselkednek. A lejátszódó változások elsősorban az összetett rendszer kémiai, fizikai, anatómiai felépítésétől (mint belső tényezőktől), valamint az alkalmazott hőmérséklettől és nyomástól, a hőhatás idejétől, a rendszert körülvevő atmoszférától, mint külső tényezőktől függenek (NÉMETH, 1998). A belső tényezők közül talán a legfontosabb, hogy a faanyag szerves anyag, így a fő komponensek jellege, egymással való kapcsolata határozza meg a hő okozta változásokat. Jelentősen befolyásolhatják a lejátszódó folyamatokat a kis mennyiségben jelenlévő járulékos anyagok is. Fontos szerepet játszik a hő okozta átalakulásokban, a faanyagban jelenlévő víz, nedvességtartalom is. Befolyásolja a folyamatokat a faanyag anatómiai felépítettsége, fajlagos felülete és szemcsemérete is (NÉMETH, 1998). KORKUT et. al., 2008 a hőkezelt faanyagok mechanikai tulajdonságait vizsgálva megállapították, hogy a rostokkal párhuzamos nyomószilárdság, a hajlítószilárdság, a hajlító szilárdsági modulus, az ütéshajlító szilárdság, a rostokra merőleges húzószilárdság és a Janka-féle keménység egyaránt csökkent a hőkezelés hatására. *A 8.8. fejezetben lévő dimenzió nélküli kritériumegyenlet felírásánál ezt a hőmérséklet nyomószilárdságra gyakorolt hatását figyelembe kellett venni.*

A gyakorlatban a pellet az előállítás során a jelentős falsúrlódás miatt 80-90°C hőmérsékletre felmelegszik. A hőmérséklet növekedése kedvezően hat a pellet sűrűségére és a nyomásviszonyokra. Ennek megfelelően méréseimet kiterjesztettem a 25°C-200°C közötti hőmérséklettartományba. 200°C felett azért nem végeztem méréseket, mert 200°C-nál magasabb hőmérsékleten (230°C körül) már elérem volna a faanyaghalmoz gyulladási hőmérsékletét (MOLNÁR, 1999). A méréseket a 7. fejezetben ismertetett hőmérsékletszabályozó és mérőrendszerrel végeztem el. A vizsgálati hőmérséklet értékek a következők voltak: (25°C); 80°C; 100°C; 150°C; 200°C. A mérések során a beállított hőmérsékleti értékeket a mérőrendszer segítségével  $\pm 5^\circ\text{C}$ -os pontossággal tudtam tartani. A méréseket fenyő és akác mintán végeztem el két nyomáson (1000 bar és 1400 bar) és az utánaprításra jellemző frakciótartományban (0,2-1mm). Az itt közölt diagramok a leggyakoribb frakciótartomány (0,2-0,5mm) eredményeit mutatják be. A faanyaghalmoz hőmérséklet hatására történő viselkedési görbéje a többi frakciótartományban (0,2-1mm) is ugyan ilyen alakú lett, szisztematikusan eltérő sűrűségi értékekkel (pl. kisebb frakciónál kisebb sűrűség értékek és fordítva). Megállapítottam, hogy a szemcseméret nem befolyásolta jelentősen a kapott eredményeket, így azok továbbra is középső szemcseméret tartományhoz (0,2-0,5mm) képest szisztematikusan a  $\pm 5\%$ -os szórási sávon belül maradtak.



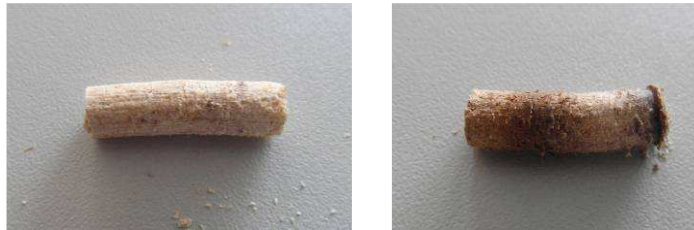
**67. ábra.** A hőmérséklet hatása a pellet sűrűsége fenyő mintánál 1400 bar nyomáson

A hőmérséklet emelkedésével láthatjuk, hogy a pellet sűrűség is jelentősen növekedett (67. ábra). Az ábrán látható felső görbe ( $\rho_{max}$ ) a tömör sűrűségváltozást, míg az alsó görbe ( $\rho_{pellet}$ ) a pellet sűrűség változást jelöli a hőmérséklet függvényében. A két szélső hőmérsékleti értéket (25-200°C) alapul véve, megállapítottam, hogy míg a tömör sűrűség 38%-kal növekedett, addig a pellet sűrűség növekedés 67%-os volt. A hőmérsékletnövekedés hatására jelentősen csökkent a faanyaghalmoz kirugózása (70. ábra), és vele összefüggésben a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  érték is (69. ábra). Megfigyeltem, hogy 150°C feletti hőmérsékleten a tömör sűrűségi érték már az abszolút tömör (pórusmentes) faanyag sűrűségi tartományában van (1520-1620 kg/m<sup>3</sup>). Ha a gyakorlatra jellemző 80°C körüli hőmérsékletet vesszük összehasonlítási alpnak, akkor a szobahőmérséklethez képest (25°C) 46%-kal növekedett a pellet sűrűség, míg a 80-200°C közötti hőmérséklet tartományban a pellet sűrűség növekedés csupán 14% volt, amit mindösszesen 9%-os tömör sűrűség változás követett. Ennek magyarázata ugyancsak a póruselméletre (levegő/szilárd rész arány) vezethető vissza, ugyanis a hőmérséklet növekedésével tömörítési nyomáson a faanyag thermoplasztikus és deformációs képessége jelentősen növekszik, ezáltal a külső és a belső pórusok jelentős csökkenése figyelhető meg a tömör sűrűségi ( $\rho_{max}$ ) értékek növekedésével, mely csökkenés 80°C felett sokkal intenzívebb.

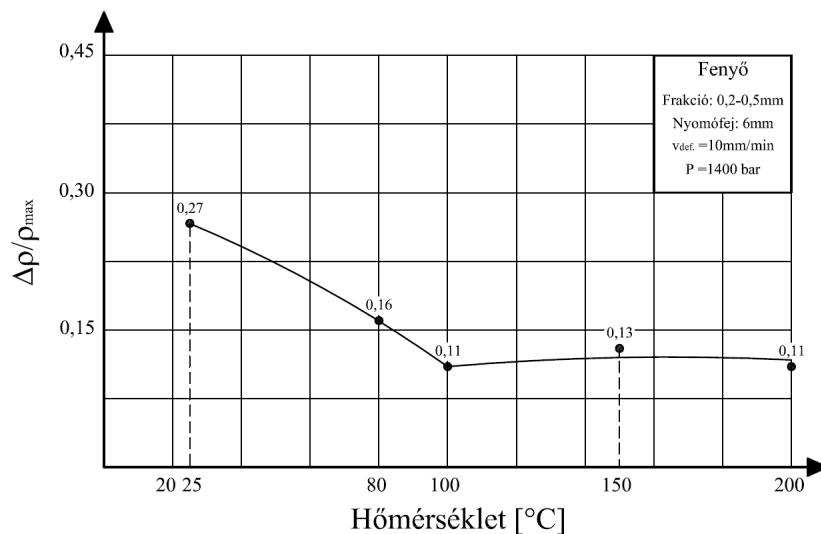
Vizsgáljuk meg a kérdést energetikai oldalról is egy egyszerű példán keresztül. A pelletgyártás során alapul vett 80°C hőmérséklet gyakorlatilag plusz energia bevitel nélkül, a tömörítés során létrejövő súrlódások hatására alakul ki. Tehát ebben az esetben nem kell primer oldalról plusz energiát befektetnünk a 80°C matrica hőmérséklet eléréséhez. Abban az esetben, ha 200°C-ot szeretnénk elérni, akkor mintegy 120°C-kal meg kell növelni a matricahőmérsékletet, amihez szükséges energiát primer oldalon fedezni kell (pl. villamos fűtéssel). Határozzuk meg egységesen 1kg matricatömegre vonatkoztatva a felfűtéséhez szükséges hőmennyiséget. A matrica anyaga rozsdamentes acél, melynek alapul vett fajhője  $c=450$  J/kg°C. Ezek alapján a 80°C-ról 200°C-ig történő felmelegítéshez szükséges hőmennyiség:  $Q = c \cdot m \cdot \Delta t = 450 \cdot 1 \cdot 120 = 54000$  J. Láthatjuk, hogy a 14%-os pellet sűrűség növekedés 54 kJ (0,015 kWh/kg) energia befektetést von maga után, amit pl.

villamos energiából állíthatunk elő<sup>4</sup>. Ebben az esetben fenyő mintánál 1% pellet sűrűség növekedés  $\sim 4$  kJ ( $\sim 0,0012$  kWh) villamosenergia-növekedést von maga után az 1kg matricatömegre vonatkoztatva (*az arányok itt is linearizáltak!*). Természetesen folyamatos termelés esetén a felfűtést követően a rendszer hőtároló képessége miatt ez a fajlagos fűtési energiaigény kissé csökken, de ez a plusz költség mindenképpen beépül a termék árába, ami még inkább nehezíti a pellet piaci versenyképességét.

A mérleg pozitív oldalához viszont hozzátartozik, hogy a 200°C-on előállított pellet mechanikailag tartósabb, kisebb térfogatú, nagyobb sűrűségű és az alacsonyabb végnedvesség tartalma miatt magasabb fűtőértékű lett, mint a hagyományos gyártástechnológiával készült pellet, tehát nagyobb az energiasűrűsége is (kisebb térfogat – nagyobb fűtőérték). A nagyobb energiasűrűség viszont kedvezően hat a logisztikai költségek (szállítás, rakodás, tárolás, stb.) alakulására. A 68. ábrán láthatjuk a hőmérséklet végtermékre gyakorolt hatását. 200°C-on a pellet felületén egy keményebb, barnult-, szenesedett réteg kialakulását tapasztaltam. Ez a réteg BOURGOIS et al. szerint csökkenti a pellet nedvességfelvevő (adszorpciós) képességét is.



**68. ábra.** Elkészült fenyő pellet minták 80°C-on (baloldali ábra) és 200°C-on (jobboldali ábra)



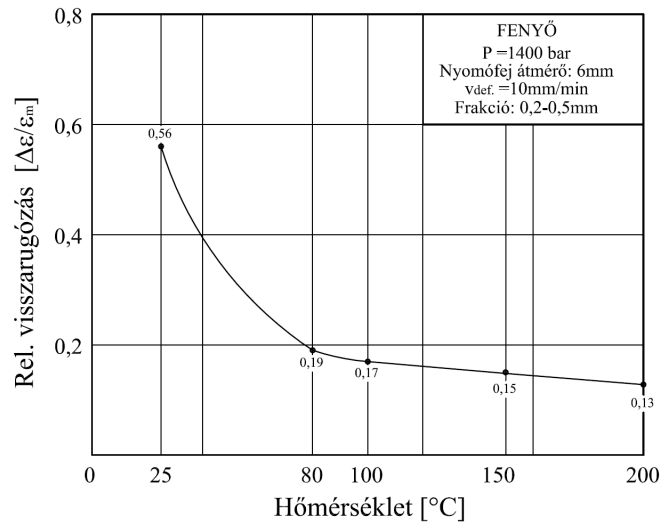
**69. ábra.** A relatív sűrűségcsökkenés a hőmérséklet függvényében fenyő mintánál 1400 bar nyomáson

Az ábrán (69. ábra) láthatjuk, hogy a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  értékek a hőmérséklet növekedésekor csökkentek. A változás hatása szembetűnőbb volt a 25-80°C közötti hőmérsékleti tartományban. Ebben a hőmérsékleti intervallumban ugyanis 40%-kal csökkent a relatív sűrűségi érték a kirugózás következtében. 100°C hőmérséklet felett viszont a változás közel

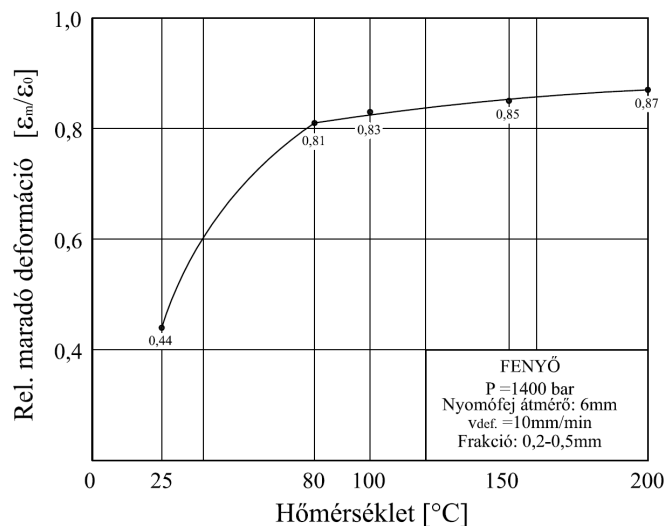
<sup>4</sup> A számításban meghatározott felfűtési energiaigény az adott hőmérséklet eléréséhez szükséges minimális (hasznos) energiaszükségletet jelenti, ami nem tartalmazza a rendszer veszteségeket. Tehát a gyakorlatban a rendszer hatásfokokat figyelembe véve többlet energia szükséges a számolt értékekhez képest!



állandónak tekinthető. A 80°C hőmérséklethez képest csupán 30%-kal csökkent a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  értéke 200°C hőmérsékletig.



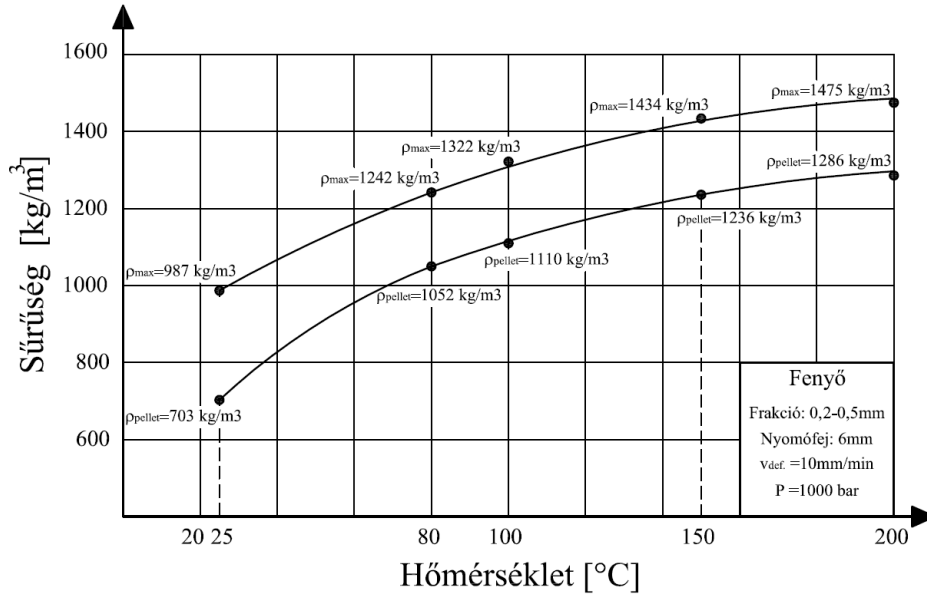
70. ábra. A relatív visszarugózás a hőmérséklet függvényében fenyő mintánál



71. ábra. A relatív maradó deformáció változása a hőmérséklet függvényében fenyő mintánál

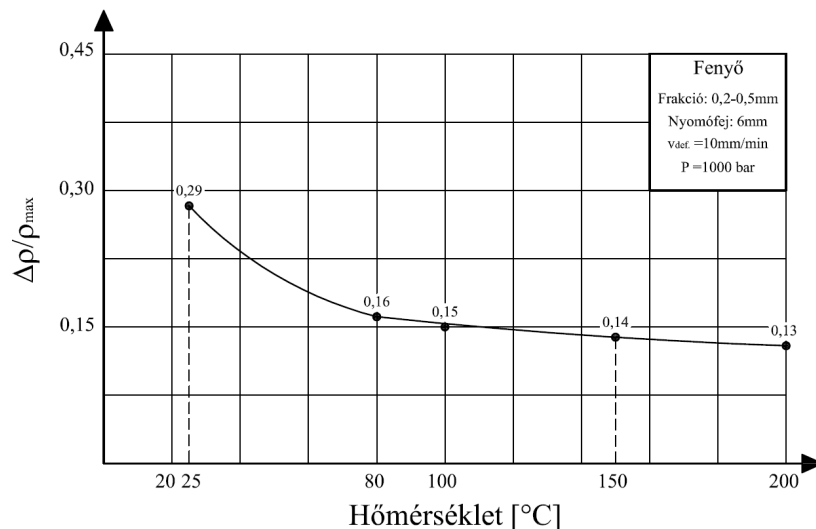
A hőmérséklet növekedésével a faanyag kedvező thermoplasztikus és deformációs képessége miatt a relatív visszarugózás csökkent a relatív maradó deformáció pedig nőtt (70-71. ábra). A relatív visszarugózás csökkenés mértéke 25-80°C hőmérsékletig 66% volt. A 80°C-tól 200°C-ig terjedő hőmérséklettartományban a változás már mérséklődött 31%-ra. A relatív maradó deformációs értékek változása 25-80°C hőmérsékletig jelentősebb volt a visszarugózáshoz képest. Ebben az esetben a maradó deformáció 84%-kal növekedett. A folyamatot ezután egy enyhe 7%-os emelkedési szakasz jellemezte egészen 200°C-ig. Fenyő mintánál láthatjuk, hogy 0,81-es maradó deformációs értéknél 1400 bar nyomáson  $\sim 1220 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűségi értéket értem el. A relatív visszarugózás-, és a relatív maradó deformáció változása a hőmérséklet függvényében 1000 bar nyomáson is ugyan ilyen szisztematikusan alakult, a csökkenés átlagosan 2-3 százalékos volt a fenti értékekhez képest. A 80°C hőmérséklethez tartozó maradó deformációs érték 1000 bar nyomáson ugyan ezen további paraméterek mellett 0,79-re adódott, amihez átlagosan  $\sim 1050 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűség tartozott.

A következő ábrákon az 1000 bar nyomáson kapott eredményeket mutatom be.



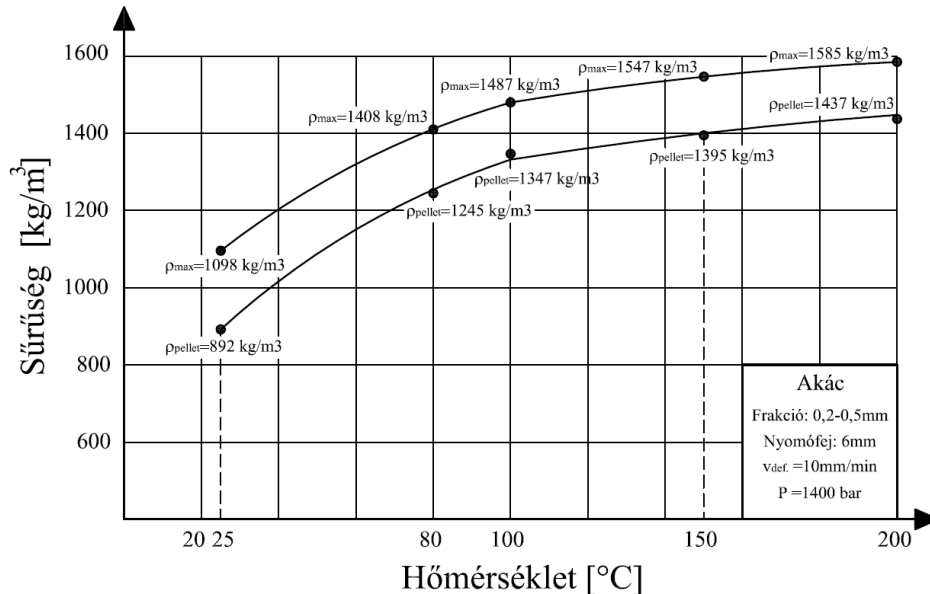
**72. ábra.** A hőmérséklet hatása a pellet sűrűsége fenyő mintánál 1000 bar nyomáson

Összevetve az 1400 és az 1000 bar nyomáson kapott értékeket (67. és 72. ábra) láthatjuk, hogy kisebb nyomás alkalmazásakor a kapott sűrűségi értékek ( $\rho_{max}$  és  $\rho_{pellet}$ ) szisztematikusan alacsonyabbak, mint a magasabb nyomás esetében. A tömör sűrűségi értékek a két szélső hőmérsékletet (25 és 200°C) alapul véve 50%-kal növekedtek, míg a pellet sűrűség növekedés 83%-os volt. Megfigyelhető, hogy 1000 bar nyomáson a sűrűségi változások jelentősebbek, mint 1400 bar nyomáson. Ha itt is a gyakorlatra jellemző 80°C hőmérsékletet vesszük összehasonlítási alapnak, akkor a szobahőmérséklethez képest (25°C) 50%-kal növekedett a pellet sűrűség, míg a 80-200°C közötti hőmérséklet tartományban a pellet sűrűség növekedés 22% volt, amit mindösszesen 19%-os tömör sűrűség változás követett. Az eredmények magyarázata, hogy alacsonyabb nyomásokon kisebb mértékben csökkent a faanyaghalmoz külső és belső pórustérfogata, vagyis nem érte el olyan gyorsan az abszolút tömör állapotot, így magasabb hőmérsékleten nagyobb sűrűsénövekedést tett lehetővé. A 72. ábra alapján igazoltam a gyakorlatot, miszerint az elvárt minőségi követelményeknek megfelelő sűrűségű (~1100 kg/m<sup>3</sup>) pelletet 80-90°C-os préselési hőmérséklet mellett már 900-1000 bar nyomáson elérhetünk.



**73. ábra.** A relatív sűrűség változás a hőmérséklet függvényében fenyő mintánál 1000 bar nyomáson

A relatív sűrűség változás 25-80°C hőmérséklet tartományban (73. ábra) 1000 bar nyomáson közel azonos volt az 1400 bar nyomáson kapott értékekkel (69. ábra). A 100°C hőmérséklet feletti tartományban viszont a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  értékek magasabbak, mint 1400 bar nyomáson és csökkenés is megfigyelhető. A különbségek oka, amiért itt a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  értékek magasabbak, azzal magyarázható, hogy magasabb nyomáson a hőmérséklet hatására a faanyagalmaz plasztikus tulajdonságai nagymértékben javulnak (Lsd. póruselmélet), vagyis kisebb rugalmas deformációt adnak vissza a terhelés megszűntetése után, azaz nagyobb a maradó deformáció értéke. Ebből is adódik, hogy a pellet végsűrűségi értékei nagyobbak lettek 1400 bar nyomáson.



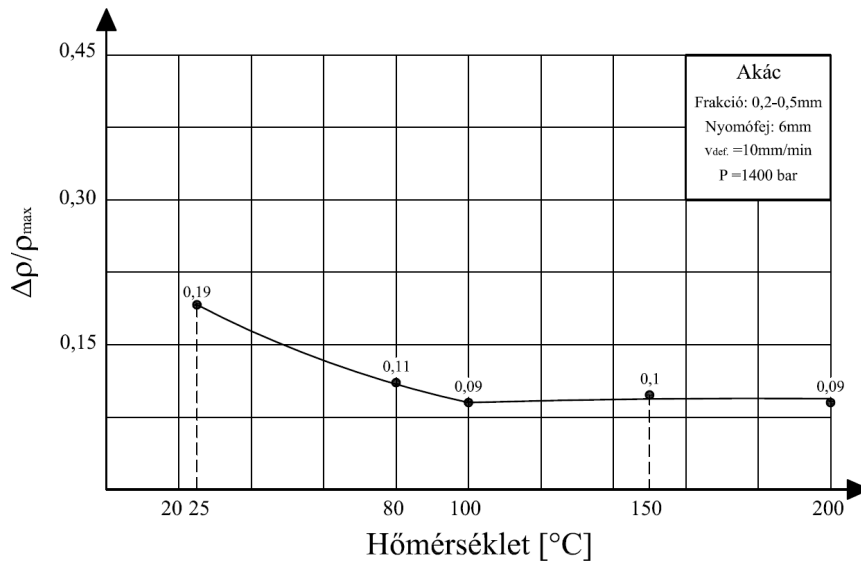
**74. ábra.** A hőmérséklet hatása a pellet sűrűsége akác mintánál 1400 bar nyomáson

Ha összevetjük a mérési eredményeinket a fenyő és az akác minták esetében (67. és 74. ábra), akkor megállapíthatjuk, hogy akác mintánál a tömör sűrűségi értékek ( $\rho_{max}$ ) szisztematikusan alacsonyabbak, mint a fenyő minta esetében, de a pellet sűrűségi értékek ( $\rho_{pellet}$ ) viszont egységesen nagyobbra adódtak. *Ez a jelenség megfigyelhető volt a korábban már bemutatott szobahőmérsékleten (25°C) történő méréseim során is!* A teljes hőmérsékleti intervallumot figyelembe véve az akác tömör sűrűségi értékek átlagosan 2-3%-kal alacsonyabbak, a pellet sűrűségi értékek ugyancsak átlagosan 2-3%-kal magasabbak a fenyő mintához képest.

A fenti elemzéseket itt is elvégezhetjük. A tömör sűrűségi értékek (74. ábra) a két szélső hőmérsékletet (25-200°C) alapul véve 44%-kal növekedtek, míg a pellet sűrűség növekedés 61%-os volt. Ezek az értékek közel azonosak a fenyő mintánál kapott értékekkel. Ha a gyakorlatra jellemző ~80°C hőmérsékletet vesszük itt is összehasonlítási alapnak, akkor a szobahőmérséklethez képest (25°C) 40%-kal növekedett a pellet sűrűség, míg a 80-200°C közötti hőmérséklet tartományban a pellet sűrűség növekedés csupán 15% volt, amit mindösszesen 12%-os tömör sűrűség változás követett. Látható, hogy akácnál a kapott értékek szinte azonosak a fenyőével. Akác esetében is tapasztaltam, hogy a hőmérséklet hatására egy elszenesedett kemény réteg alakult ki a pellet felületén, amit a 75. ábrán jól láthatunk.

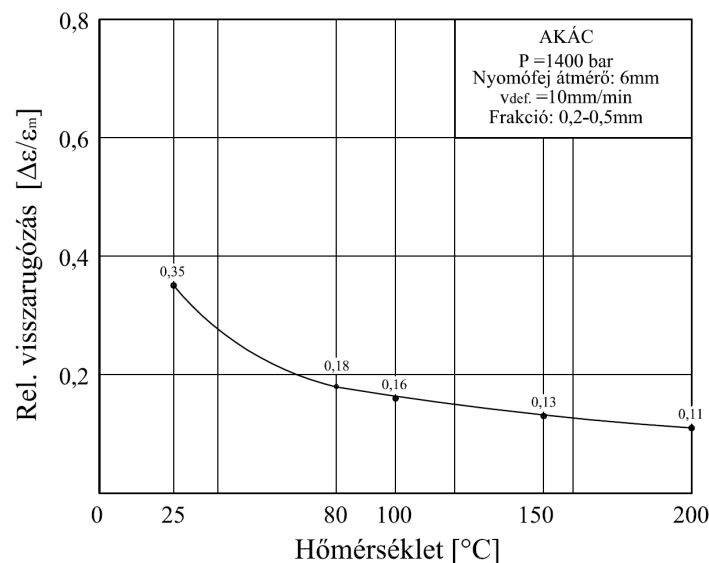


75. ábra. Elkészült akác pellet minták 80°C-on (baloldali ábra) és 200°C-on (jobboldali ábra)

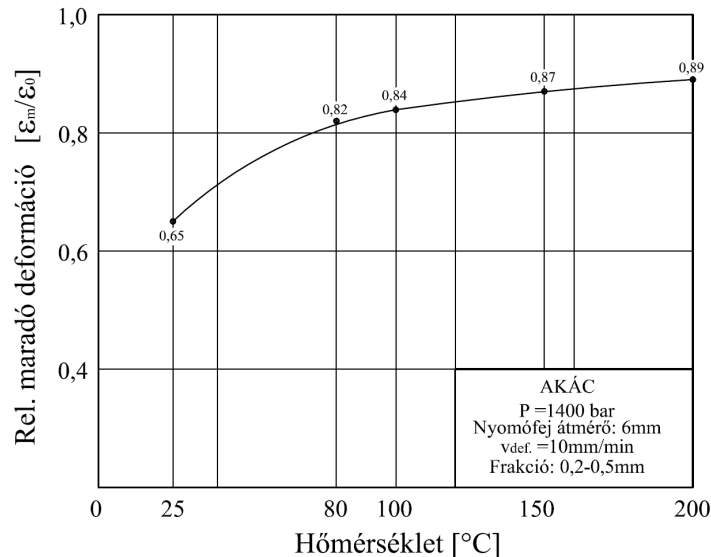


76. ábra. A relatív sűrűségcsökkenés a hőmérséklet függvényében akác mintánál 1400 bar nyomáson

A  $\Delta\rho/\rho_{max}$  értékek a hőmérséklet növekedésekor akác esetében is csökkentek (76. ábra). A változás hatása ebben az esetben is jelentősebb volt a 25-80°C közötti hőmérsékleti tartományban. A 25-80°C hőmérsékleti intervallumban 42%-kal csökkent a relatív sűrűségi érték, ami szinte megegyezett a fenyő mintánál kapott értékkel. A 100°C hőmérséklet feletti tartományban viszont a változás ebben az esetben is közel állandónak tekinthető. A 80°C hőmérséklethez képest 22%-kal csökkent a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  értéke 200°C hőmérsékletig.

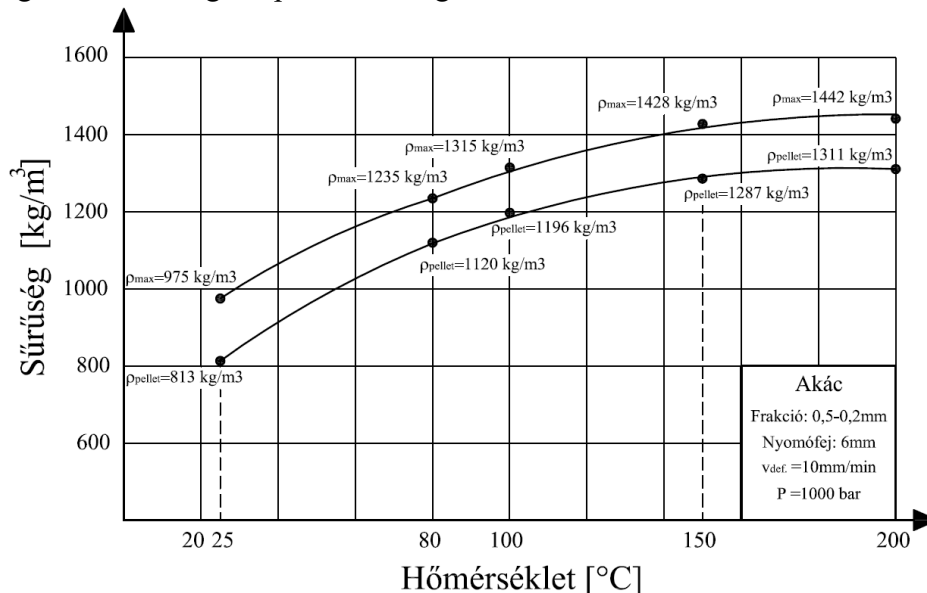


77. ábra. A relatív visszarugózás változása a hőmérséklet függvényében akác mintánál



**78. ábra.** A relatív maradó deformáció változása a hőmérséklet függvényében akác mintánál

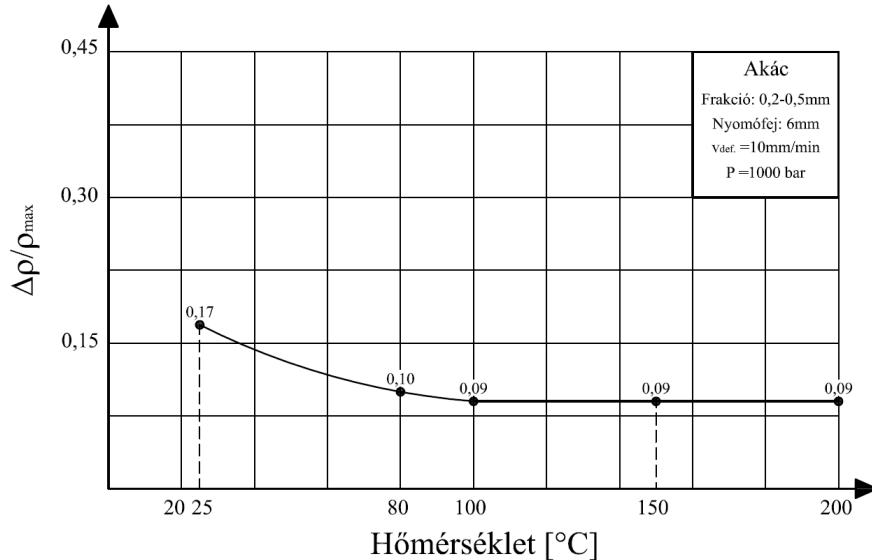
Akácnál a relatív visszarugózás-, és a relatív maradó deformáció változása is kisebb volt 25-80°C hőmérsékletig, mint a fenyő minta esetében. Ekkor a relatív visszarugózás változás mindösszesen 48% volt, míg a relatív maradó deformáció változása 26%-ra adódott. A 80-200°C hőmérsékletig terjedően a visszarugózás és a deformáció változása közel azonos volt a fenyőnél kapott értékekkel. Az akác 80°C hőmérsékleten is nagyobb maradó deformációt szenvedett, mint a fenyő, az ebből adódó  $\varepsilon_m=0,82$ -es maradó deformációhoz átlagosan  $\sim 1250 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűség tartozott. Akác mintánál a relatív visszarugózás-, és a relatív maradó deformáció változása 1000 bar nyomáson hasonlóan és szisztematikusan változott, mint a fenyőnél. A csökkenés mértéke átlagosan itt is 2-3% volt a fenti értékekhez képest. A 80°C hőmérsékletre tartozó maradó deformációs érték 1000 bar nyomáson  $\varepsilon_m=0,8$ -ra adódott, amihez átlagosan  $\sim 1120 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűség tartozott.



**79. ábra.** A hőmérséklet hatása a pellet sűrűsége akác mintánál 1000 bar nyomáson

Akác mintánál is megfigyeltem (74. és 79. ábra), hogy kisebb nyomás (1000 bar) esetén a kapott sűrűségi értékek ( $\rho_{max}$  és  $\rho_{pellet}$ ) szisztematikusan alacsonyabbak voltak, mint a magasabb nyomásnál (1400 bar). A tömör sűrűségi értékek a két szélső hőmérsékletet (25-200°C) alapul véve (79. ábra) 48%-kal növekedtek, míg a pellet sűrűség növekedés 61% volt

hasonlóan, mint a fenyő esetében (72. ábra), kivéve a pellet sűrűség növekedést. Alapul véve a 80°C hőmérsékletet láthatjuk, hogy a szobahőmérsékletéhez képest (25°C) 38%-kal növekedett a pellet sűrűség, míg a 80-200°C közötti hőmérséklet tartományban a pellet sűrűség növekedés csupán 17% volt, amit mindösszesen 17%-os tömör sűrűség változás követett. Vagyis ezek az értékek kissé alacsonyabbak lettek, mint fenyő minta esetében igazolva ezzel az alacsonyabb nyomástartományban tárgyalt póruselméletet.



**80. ábra.** A relatív sűrűség változás a hőmérséklet függvényében akác mintánál 1000 bar nyomáson

Látható (80. ábra), hogy a  $\Delta\rho/\rho_{max}$  értékek a 25-80°C hőmérséklet tartományban közel megegyeznek az 1400 bar nyomáson kapott értékekkel (76. ábra). A 100°C feletti hőmérséklet tartományban viszont jól látható, hogy a változás állandó értékű.

A hőmérséklet növekedésével láthattuk, hogy a pellet sűrűségi értékek növekedtek a faanyaghoz kedvező thermoplasztikus és deformációs képessége-, és a vele összefüggő por-forgács halmazok pórusrendszerében bekövetkező mechanikai változások miatt. A gyakorlatban a pelletálás 80-90°C hőmérsékleten megy végbe. Ilyen hőmérsékletnél már 900-1000 bar préselési nyomáson a követelményeknek megfelelően tartós pelletet tudunk előállítani, melynek átlagos sűrűségi értékei 1100 kg/m<sup>3</sup>-re adódtak. 200°C hőmérsékleten ugyan ezen pellet sűrűség eléréséhez akár 700-800 bar préselési nyomás is elegendő, vagyis közel 20-30%-os préselési energiafelhasználás csökkenést érhetünk ilyen hőmérsékleten. Vizsgálataimmal igazoltam, hogy 80°C-ról 200°C-ra történő felfűtés esetén a pellet sűrűségi értékek fenyő és akác mintánál 1400 bar nyomáson átlagosan 15%-kal növekedtek. Alacsonyabb nyomáson (1000 bar) a pellet sűrűség növekedés jelentősebb volt: fenyő 22%; akác 17%. Az 1000 bar alatti nyomásokon azért nem végeztem méréseket, mert láthattuk, hogy a pellet sűrűség változása az 1000 és 1400 bar nyomáson szisztematikusan alakult, amiből a tendencia már megfigyelhető. Másrészt pedig a gyakorlati nyomásértékek sem mennek sokkal 1000 bar alá, hiszen a szabványokban, tanúsítási rendszerekben előírt pellet sűrűségi értékeket alacsonyabb nyomáson nem tudjuk teljesíteni. A 200°C hőmérsékletre való felfűtés - mint azt korábban tárgyaltam- jelentős energia befektetéssel jár, tehát a gazdasági döntéseknél mindenképpen figyelembe kell venni. Ezen kívül a 200°C-on készített pellet mechanikailag tartósabb, kisebb végnedvességű és nagyobb sűrűségű lett, azaz energiasűrűsége megnövekedett a hagyományos 80-90°C-on készített pellethez képest nem beszélve arról, hogy a felületén kialakult elszenesedett réteg irodalmak alapján (BUORGOIS

et al., 1989) hidrofób tulajdonsággal ruházta fel. Meg kell említenem, hogy 200°C-on ún. részleges torrifikációt hajtottam végre, melyekkel kapcsolatos kutatások közel 20 évre vezethetőek vissza.

*A következőkben tekintettel a torrifikációra tekintsük át röviden a témához kapcsolódó főbb hazai és külföldi kutatásokat.*

A faanyagalmaz a hőmérsékletnövelés hatására - mint ahogyan azt az előzőekben láthattuk - jobban tömöríthető volt, melynek okai a faanyag anatómiai felépítésében keresendő. A fában lévő lignin plasztikus tulajdonságai a hőmérséklet emelkedésével kedvezően alakulnak (a lignin elkezd puhulni). A 160-170°C hőmérséklet felett - ami egyben a lignin üvegesedési hőmérséklettartománya ( $T_g$ ) - ez a plasztikus képesség nagymértékben javul. A 200°C-nál magasabb hőmérsékleten a faanyag kémiai összetevői (cellulóz, hemicellulóz, lignin) bomlásnak indulnak, de folyamat más-más hőmérsékleten megy végbe. Először a hemicellulóz bomlik 200-260°C között, ezt követi a cellulóz 240-350°C-os tartományban, és végül a lignin bomlása figyelhető meg 280-500°C-on (NÉMETH, 1997). BOURGOIS et al., (1989) különböző hőmérsékleten 30 percig hőkezelt fenyőminták analízisekor azt tapasztalták, hogy a hőmérséklet növelésével a széntartalom növekszik, míg az oxigéntartalom csökken (12. táblázat). A faanyag hidrophil karakterének drasztikus csökkenését érzékelték a pirolízis kezdeti szakaszában, ami lassan tovább csökkent, mikor a hőmérsékletet emelték. Alacsony hőmérsékleten az extraktanyagok mennyiségének csökkenését figyelték meg, amit egy éles növekedés követett 260°C-nál. A folyamatot azzal magyarázták, hogy a pirolízises reakció lejátszódott, a hemicellulóz és már a lignin molekulák is tördelődtek.

**12. táblázat.** Hőkezelt és kezeletlen fenyőminták összetételének változása (BOURGOIS et al., 1989)

Hőmérséklet (°C)	Kezeletlen	240	250	260	270	290
Elemi C, %	50,98	51,14	51,93	53,78	53,57	58,08
összetétel O, %	42,80	42,70	42,18	40,66	40,67	36,40
Pentózok, %	9,61	5,93	5,90	3,10	2,54	1,40
Lignin, %	22,84	24,90	28,72	33,44	39,23	53,47
Extraktanyag, %	14,67	8,19	14,09	19,35	16,49	17,98
Nedvesség, %	10,80	5,66	4,08	3,96	3,76	3,88

A pelletek hőkezelésével kapcsolatos kutatások már közel 20 évvel ezelőtt megkezdődtek Európában. Jelenleg a hőkezelt pelletet torrifikált pelletnek hívják a gyakorlatban. A torrifikációt egyes publikációk (WOLFGANG et. al., 2012) alapján oxigénmentes (reduktív) környezetben végzik közel 300°C préselési hőmérsékleten a hagyományos pelletálási paraméterek (nyomás, alapanyag nedvesség, stb.) mellett. A 12. táblázatban figyelemmel kísérhetjük a faanyagalmazban bekövetkező változásokat a hőmérséklet növekedésekor. Láthatjuk, hogy 300°C körüli hőmérsékleten a széntartalom és a lignintartalom növekedett, a nedvességtartalom viszont csökkent, ami külön-külön is hozzájárul pl. a fűtőérték növekedéséhez. A káros anyag kibocsátás is mérséklődött a torrifikált pelletek tüzelése esetében WOLFGANG et. al., 2012 szerint.

Összefoglalva a főbb előnyöket és hátrányokat a torrifikált pelletre vonatkozóan az alábbiakat fogalmazhatjuk meg WOLFGANG et. al., 2012 alapján:

Előnyök:

- A hagyományos pellet nedvességtartalma 7-10%, a torrifikált pelleté pedig 1-5%,
- Hidrofób tulajdonsággal bír, míg a hagyományos pellet hidrofil tulajdonságú,
- A torrifikált pellet biológiai degradációra nem hajlamos,
- Fűtőértéke 18-24 MJ/kg, a hagyományos pelleté 17-18 MJ/kg,
- Nagyobb energiasűrűség, kisebb logisztikai költség.

Hátrányok:

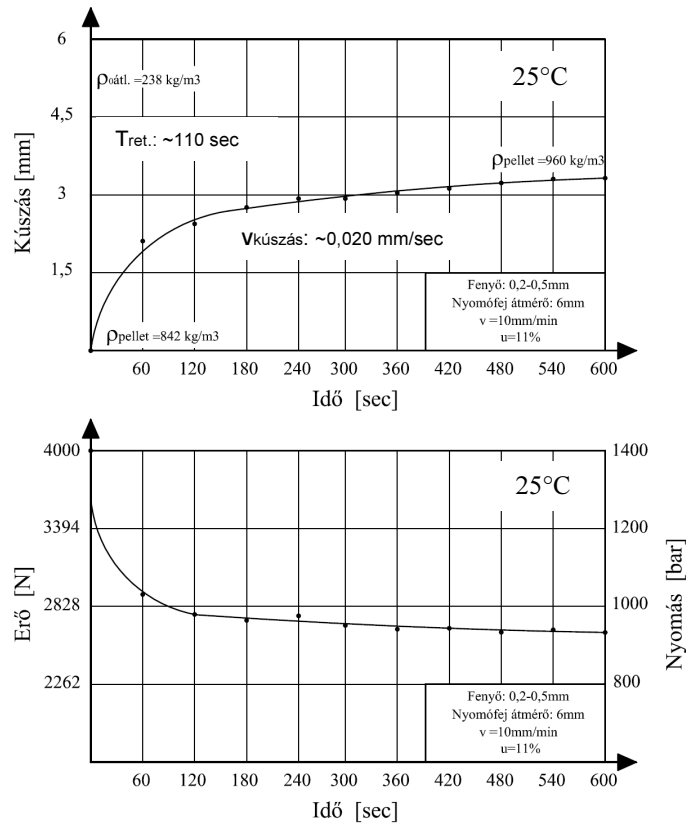
- Nagyobb a gyártás során bevitt energia a hagyományos technológiához képest,
- Tűz és robbanásveszélyes a technológia,
- Kisebb termelési kapacitás,
- Gyorsabb matricakopás,
- Drágább technológia, drágább pellet ár.

A K+F+I kutatásoknak köszönhetően a pelletálás technológiája és vele együtt a késztermék tulajdonságok is folyamatosan fejlődnek. Természetesen a torrifikált pelletek piacra kerülése számos tényező függvénye és a jelenlegi gazdasági helyzetet figyelembe véve kijelenthetjük, hogy egy ideig még csak kutatási szinten maradnak.

## **8.6.A POR-FORGÁCS HALMAZOK RELAXÁCIÓS ÉS KÚSZÁSI TULAJDONSÁGAINAK A VIZSGÁLATA**

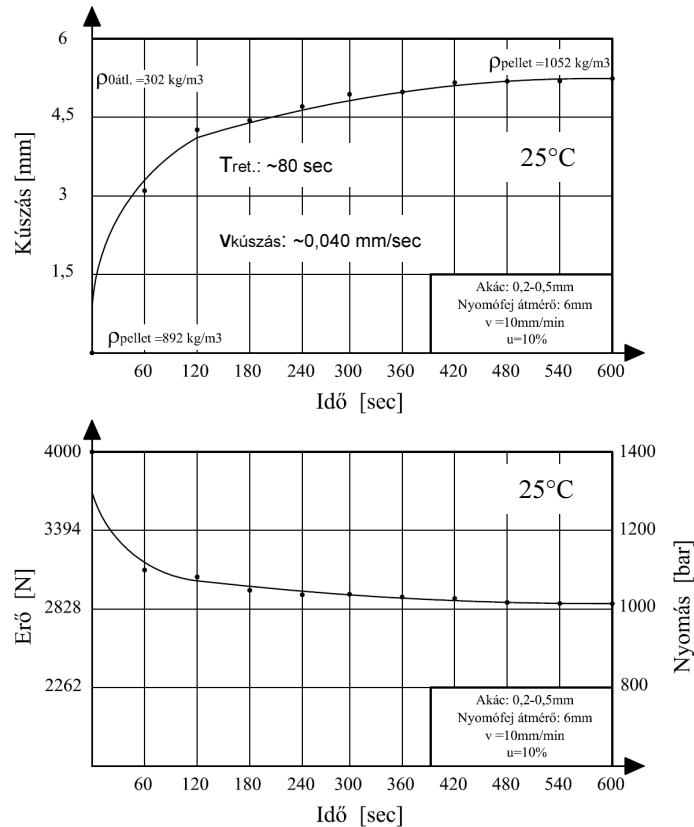
A rheológia alapvizsgálatok körébe tartozik a különféle anyagok relaxációs és kúszási tulajdonságainak a vizsgálata. A relaxáció az anyagok feszültség csökkenését írja le az idő függvényében állandó deformáció mellett, míg a kúszás az anyagok állandó terhelés (feszültség) hatására bekövetkező folyamatos deformációja (tömörödését) az idő függvényében. Ebben a fejezetben a por-forgács halmazok relaxációs és kúszási folyamatait vizsgáltam és megszerkesztettem a hozzájuk tartozó relaxációs és kúszási görbéket, melyek segítségével általános következtetéseket tettem. Minden egyes mérés után - figyelembe véve a deformáción tartási időket - felvettem a relaxációs görbéket. Mivel a szakítógéppel nem tudtam biztosítani az állandó nyomáson tartást, úgy, hogy közben regisztrálva legyen az elmozdulás, ezért egy közelítő módszert alkalmaztam a kúszás megbecsülésére. A méréseket úgy végeztem el, hogy a maximális terhelés eléréskor megállítottam a nyomófejet és figyeltem a nyomófejre ható erő csökkenését az időben melyek ismeretében meg tudtam szerkeszteni a relaxációs görbéket úgy, hogy a relaxációs értékekből közelítőleg visszszámoltam a kúszási értékeket az adott kompresszió görbe ismeretében. A gyakorlatban mivel a por-forgács halmazok terhelési és tehermentesítési görbéi mechanikai hiszterézis szerűen alakulnak (11/c ábra) a nem-lineáris viszkoelasztikus tulajdonságuk miatt, ezért a kapott kúszási görbék csak egyfajta közelítést, becslést adtak a kúszásról, de a mérnöki pontosság határain belül megfelelően jellemzik a valóságot. A deformáción tartási idők megválasztását az indokolta, hogy ha időben minél hosszabban vizsgálok egy adott folyamatot, akkor annál pontosabb képet kaphatok a por-forgács halmazok mechanikai viselkedéséről, jelen esetben a relaxációról és a kúszásról. A választott deformáción tartási időket 1 perctől egészen 10 percig mértem percenkénti leolvasással. Az eredményeket a leggyakoribb frakciótartományra (0,2-0,5mm) mutatom be. A vizsgálati frakció intervallumot (0,2-1mm) figyelembe véve megállapítottam, hogy a szemcseméret hatása itt is átlagosan  $\pm 5\%$ -ban változtatta a fejezetben bemutatott eredményeket.





**81. ábra.** Fenyőminta relaxációs és becsült kúszási görbéje az idő függvényében 1400 bar nyomáson 25°C vizsgálati hőmérsékleten

A 81. ábrán láthatjuk a fenyőminta relaxációs és becsült kúszási görbét állandó nyomás mellett 25°C vizsgálati hőmérsékleten. A kúszási görbe alakja és tulajdonsága megfelel a 4.3. fejezetben leírtaknak. Láthatjuk, hogy a maximális terhelés elérése pillanatában, a deformáción tartási idő első percében jelentős relaxációs és vele együtt kúszási folyamatok indultak meg a faanyaghalmozban (degresszív szakasz), ezzel együtt növekedett a deformáció sebessége is. A 2. perctől viszont a folyamatot már egy lassúbb lefutású (laposabb) szakasz jellemezte a vizsgálat időszakasz (10 perc) végéig. A fenyőminta sűrűsége a tömörítés végén 842 kg/m<sup>3</sup> volt, ami 10 perc deformáción tartási idő elteltével 960 kg/m<sup>3</sup>-re növekedett. A kúszás során a faanyaghalmoz továbbtömörödik, a tömörítés hatására a sűrűsége megnő. A 10 perc deformáción tartási idő elteltével a faanyaghalmoz becsült kúszási értéke 3,3 mm volt, amely mintegy 14%-os pellet sűrűség növekedést eredményezett. Ugyanez megfigyelhető akác minta esetében is (82. ábra). Az ábrán (81. ábra) megfigyelhetjük, hogy a relaxációs és a relaxációból becsült kúszási görbék alakja szinte megegyezik, a különbség csupán a görbék futásában és meredekségében van.

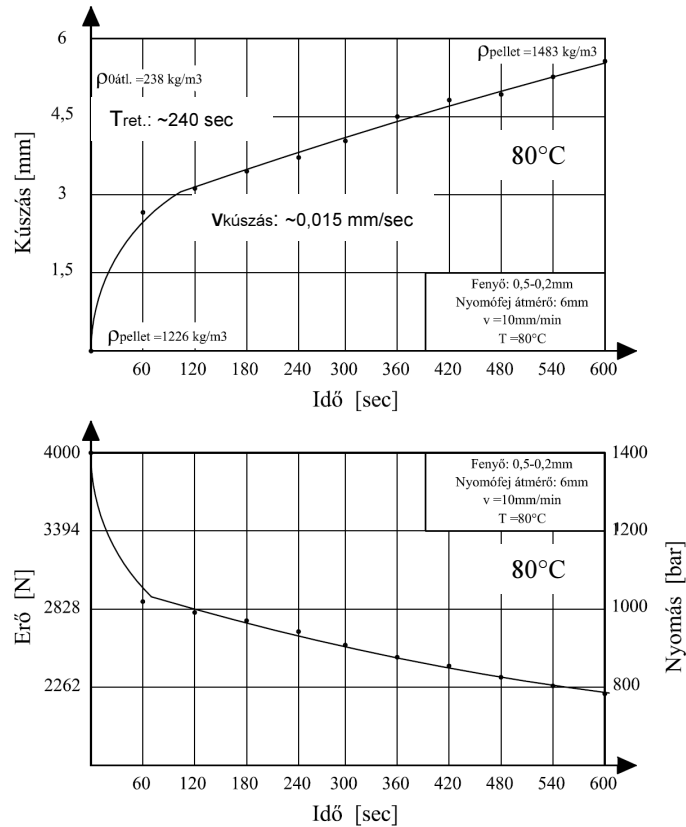


**82. ábra.** Akácminta relaxációs és becsült kúszási görbéje az idő függvényében 1400 bar nyomáson  $25^\circ\text{C}$  vizsgálati hőmérsékleten

Akác minta esetében ugyanolyan mérési paraméterek mellett jelentősebb relaxáció és kúszás figyelhető meg (82. ábra). A folyamatot 18%-os pellet sűrűség növekedés jellemezte, 5,2 mm becsült kúszási érték mellett. Mivel a fenyő adott nyomáson jobban összetömöríthető (nagyobb fajlagos alakváltozás a jellemző), mint az akác, ezért nagyobb lett a tömör sűrűsége és ezáltal kisebb lett a kúszás mértéke. Az akác szemcsék ezzel szemben nagyobb maradó deformációt szenvedtek, amit igazol a 18%-os pellet sűrűség növekedés a fenyőpellet 14%-os sűrűség növekedésével szemben.

Eredményeimmel igazoltam, hogy 1400 bar nyomáson, 6 mm-es nyomófej esetében a porforgács halmazok minden 1 mm-es becsült kúszási értékéhez, - figyelembe véve a vizsgálati frakció intervallumot (0,2-1mm) - átlagosan 2-4% pellet sűrűség növekedés tartozik szobahőmérsékleten (az arányok linearizáltak!).

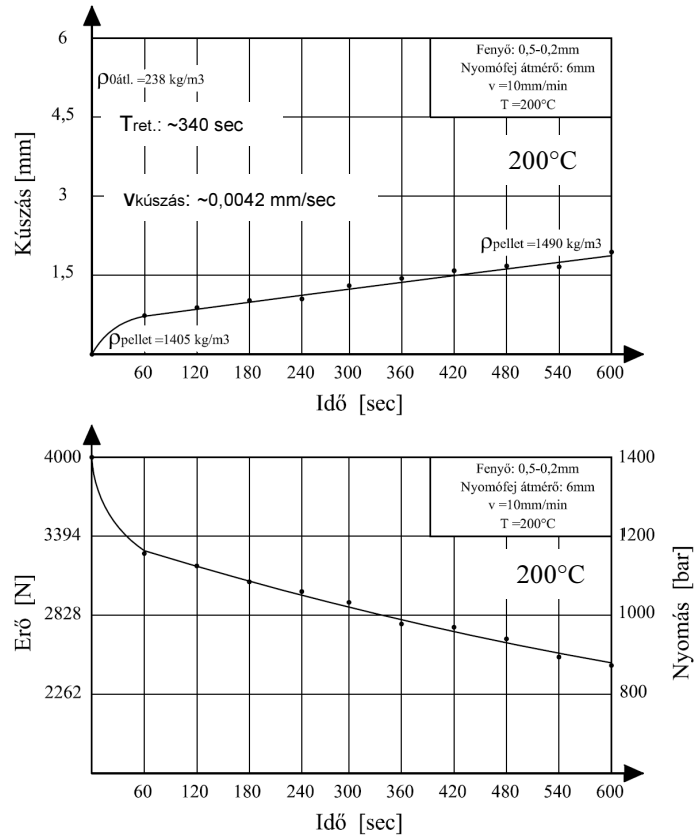
A továbbiakban vizsgáltam a  $80^\circ\text{C}$  és a  $200^\circ\text{C}$ -on kapott relaxációs és a becsült kúszási görbéket fenyő és akác mintáknál.



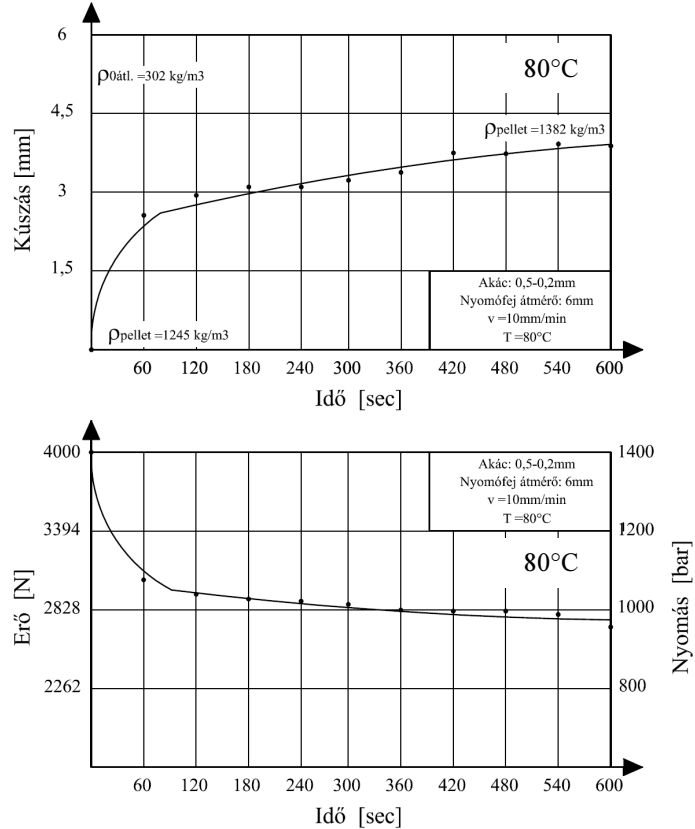
**83. ábra.** Fenyőminta relaxációs és becsült kúszási görbéje az idő függvényében 1400 bar nyomáson,  $80^\circ\text{C}$  vizsgálati hőmérsékleten

A hőmérséklet hatására jelentősebb relaxációs és kúszási folyamatok indultak meg (83. ábra) fenyő minta esetében  $80^\circ\text{C}$  hőmérsékleten, mint szobahőmérsékleten a faanyag kedvező thermoplasztikus képessége miatt. A folyamatot 21%-os pellet sűrűség növekedés jellemezte 5,5 mm becsült kúszási érték mellett. A 84. ábrán megfigyelhetjük a  $200^\circ\text{C}$  hőmérsékletre tartozó becsült kúszási folyamatokat. Láthatjuk, hogy a pellet sűrűség változás csupán 6% volt, 1,6 mm becsült kúszási érték mellett. Megállapítottam, hogy a tömör sűrűségi érték jelentősen befolyásolja a relaxációs és kúszási folyamatokat. Minél nagyobb a faanyag halmaz tömör (kezdeti) sűrűsége, annál kisebb mértékben relaxál és kúszik adott terhelés hatására.

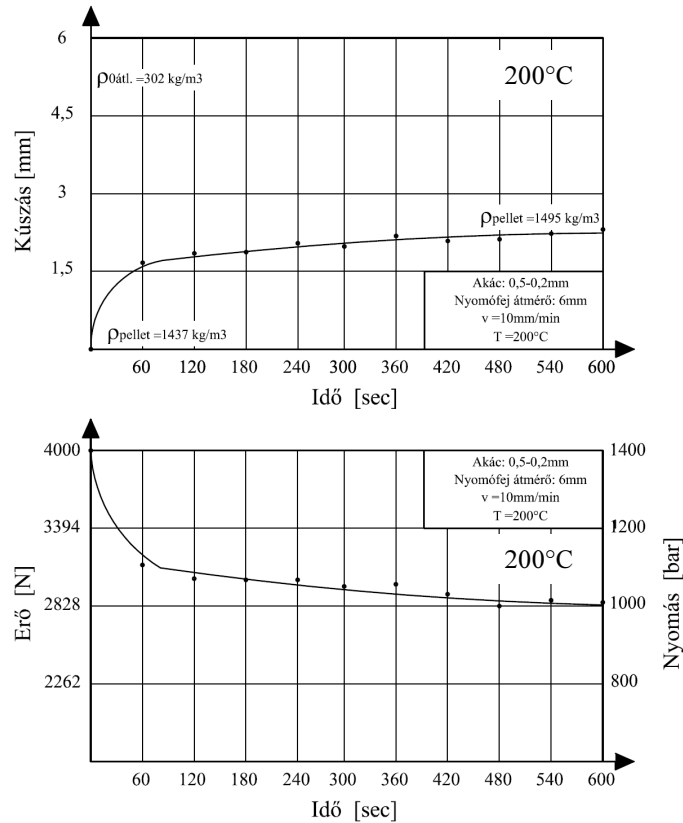
A 85. ábrán akác minta relaxációs és kúszási görbét láthatjuk  $80^\circ\text{C}$  prézelési hőmérsékletnél.



**84. ábra.** Fenyő minta relaxációs és becült kúszási görbéje az idő függvényében 1400 bar nyomáson,  $200^\circ\text{C}$  vizsgálati hőmérsékleten



**85. ábra.** Akác minta relaxációs és becült kúszási görbéje az idő függvényében 1400 bar nyomáson,  $80^\circ\text{C}$  vizsgálati hőmérsékleten



**86. ábra.** Akácminta relaxációs és becsült kúszási görbéje az idő függvényében 1400 bar nyomáson,  $200^\circ\text{C}$  vizsgálati hőmérsékleten

A por-forgács halmazok relaxációs és kúszási vizsgálata során meghatároztam a legfontosabb befolyásoló tényezőket, melyek a faj, a szemcseméret, a préselési nyomás, a kezdeti sűrűség és a hőmérséklet. Az alacsonyabb szilárdságú faanyaghalmoz adott nyomáson nagyobb sűrűsége tömöríthető, mert nagyobb fajlagos alakváltozást ( $\epsilon$ ) szenved, vagyis ezáltal nagyobb a bevitt deformációs feszültség nagysága is. A nagyobb deformációs feszültség hatására a faanyaghalmoz kisebb mértékben kúszik és a nagyobb feszültség hatására jobban kirugózik. A kirugózás és a kúszás (továbtömörödés) ellentétes folyamatok, ezért azonos mérési paraméterek mellett a fenyő kisebb mértékben kúszott, mint az akác (81-82. ábra). A hőmérséklet növekedésének hatására – mint azt a korábbiakban is tárgyaltam – a faanyaghalmoz plasztikus és deformációs tulajdonságai nagymértékben javultak, ezért a hőmérséklet növekedésekor a tömör sűrűség is növekedett. Megállapítottam, hogy a relaxáció és a kúszás összefügg a faanyaghalmoz tömör sűrűségével (tömörödés mértékével), és a tömörítéskor bevitt deformációs feszültség nagyságával (ami a fajlagos alakváltozással ( $\epsilon$ ) van összefüggésben), ezért minél nagyobb a tömörödés mértéke és vele együtt a deformációs feszültség, annál kisebb mértékben relaxál és kúszik időben a faanyaghalmoz.

### 8.7.A RELATÍV FALSÚRLÓDÁS HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA, A PELLETTÁTMÉRŐ HATÁSA

A 7. fejezetben már tettem utalást a relatív fasúrlódás hatásának jelentőségére. A relatív falsúrlódás a tömörítő csatorna átmérőjének - ami közel azonos a pellet átmérővel - ( $D$ ) és a pellet magasságának ( $L$ ) a viszonya. Az irodalmak (BIOT, 1954; FINDLEY és mtsai, 1989; HEIKO és mtsai, 2005; HOFKO, 2006) ezt  $L/D$  viszonyként említik. Ennek értelmében minél kisebb a tömörítő csatorna átmérője a pellet magasságához képest (vagyis az  $L/D$  hányados nagy), annál nagyobb lesz a relatív falsúrlódás mértéke a kompresszió erőkhöz viszonyítva (megnő a relatív súrlódási ellenállás) vagyis nagyobb lesz a nyomáskülönbség és ez által a sűrűség gradiense is a pellet hossza mentén. A pellethossz mentén létrejövő nyomásváltozás az (70) egyenlet alapján jó közelítéssel meghatározható (BIOT, 1954; SACHT, 1967):

$$p_x = p_k e^{-kx}$$

ahol:

$p_k$  – a nyomófej által kifejtett nyomás, (N/mm<sup>2</sup>)

$p_x$  – a csökkent nyomás a pellet hossza mentén, (N/mm<sup>2</sup>)

$x$  – a pellet hosszmenti koordinátája (relatív koordináta hely), (mm)

$k$  – állandó.

A nyomáscsökkenés tehát a pellet hossza ( $x$  koordináta) mentén az (70) egyenlet alapján exponenciális jellegű. A függvény lefutását, meredekségét nagyban befolyásolja a kitevőben szereplő  $k$  állandó értéke. Minél kisebb a  $k$  értéke, annál kisebb a nyomás gradiense a pellet hossza mentén, aminek következtében kisebb lesz a sűrűség hosszmenti gradiense is. A kitevőt befolyásolja egyrészt a falfelület ( $F_{fal}$ ) / térfogat ( $V$ ) viszonya, amely az alábbiak szerint számítható azonos pellet magasságot feltételezve:

$$k' = \frac{A}{V} = \frac{D \cdot \pi \cdot L}{\frac{D^2 \pi}{4} \cdot L} = \frac{4}{D} \quad (77)$$

A méréseket 6 mm; 8 mm és 16 mm-es nyomófejjel végeztem el, így az  $F_{fal}/V$  arány sorban: 0,67; 0,5 és 0,25 1/mm értékre adódott. A gyakorlatban a relatív falsúrlódás meghatározása ennél összetettebb feladat, ugyanis a súrlódási tényező ( $\mu$ ) és a Poisson-tényező ( $\nu$ ) befolyásoló hatását az (71) egyenletben figyelembe kell venni. Ezek alapján a  $k'$  állandó értéke az alábbiak szerint módosul (FINDLEY és mtsai, 1989):

$$k = \frac{4}{D} \mu \frac{\nu}{1 - \nu}$$

ahol:

$\mu$  – a faanyagfal (pellet) és a tömörítő csatorna fala között létrejött súrlódási tényező,

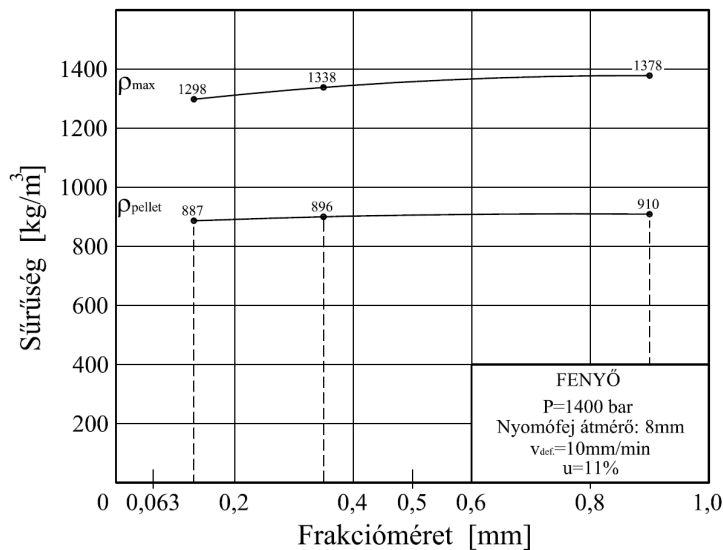
$\nu$  – a Poisson-tényező (oldalnyomás-tényező).

A (71) egyenlet használatához ismernünk kell az anyagok Poisson-tényezőjét ( $\nu$ ) és a súrlódási tényező ( $\mu$ ) értékét fa-acél súrlódási anyagpárra jellemzően, a nyomás, a nedvességtartalom, a szemcseméret és a fafaj függvényében. A pelletálási tartományban a faanyagfal Poisson-tényezője  $\nu = 0,35-0,45$  között alakul (SACHT, 1967). A súrlódási tényező elsősorban a fafaj, szemcseméret és a nedvességtartalom függvénye, azonban a nyomás is jelentős hatással van rá. Ez utóbbi hatás abban nyilvánul meg, hogy egyrészt a nagy nyomás deformálja a faanyagfalat, így az érintkező felület módosul, másrészt víz préselődik ki az anyagból, amely a súrlódási felületet keni csökkentve ezáltal a tényező

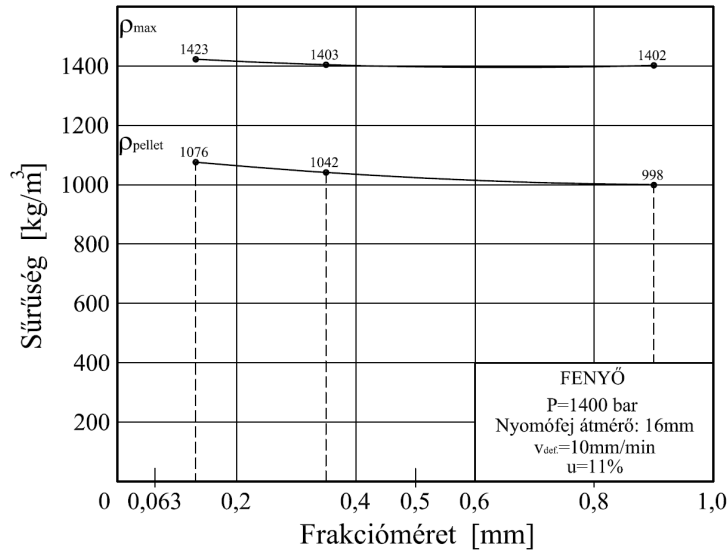
értékét. A különféle faporok súrlódási tényezőjével összefüggő kutatások megtalálhatók az alábbi irodalmakban (a teljesség igénye nélkül: VARGA, 1983; VARGA, 1993; SITKEI, 1981).

A falsúrlódás hatására bekövetkező nyomáscsökkenés meghatározását egy összetett súrlódási problémára vezethetjük vissza, melyben a súrlódási tényező ( $\mu$ ) és a Poisson-tényező ( $\nu$ ) nem ismert és a meghatározásuk is nehéz. Mérésekkel kimutattam, hogy egyrészt a kitolási erő jó közelítéssel lineárisan csökken a pellet hossza mentén, melyből következik, hogy változik a nyomásesés függőleges irányban ( $x$  koordináta mentén). Másrészt pedig a kitolási erő csökkenésének hatására a Poisson-tényezővel figyelembe vett súrlódási erő, majd a belőle számított oldalnyomás ( $\sigma_e$ ) is változik a kitolási úthossz függvényében. A gyakorlatban, mivel a pelletálásnál folyamatos a kitolás (folyamatos az anyaghalmaz) a  $\mu$  értéke közel állandó, de ha egy pelletre vonatkoztatjuk, - vagyis véges hosszal vesszük figyelembe - akkor változik. A későbbiekben levezetett elméletnél bizonyos megfontolások alapján  $\mu$  értékét állandónak tekintettem. *Méréseim segítségével bizonyos elméleti megfontolások alapján jó közelítéssel, iterációs alapon meghatározásra került a kitolási erő változása ( $F_x$ ) a pellet hosszkoordinátájának ( $x$  koordináta) függvényében bevezetve a relatív felületcsökkentési tényező ( $\psi_{vég}$ ) fogalmát.*

A további két átmérőnél (8 mm és 16 mm) végzett kutatási eredményeimet a következőkben ismertetem. A 8 mm-es nyomófejjel végzett mérési adatok szisztematikusan a 6 mm (8.3. fejezet) és a 16 mm nyomófejjel végzett mérési eredmények közé estek. A kapott eredmények továbbra is három azonos mérés átlagából származnak.

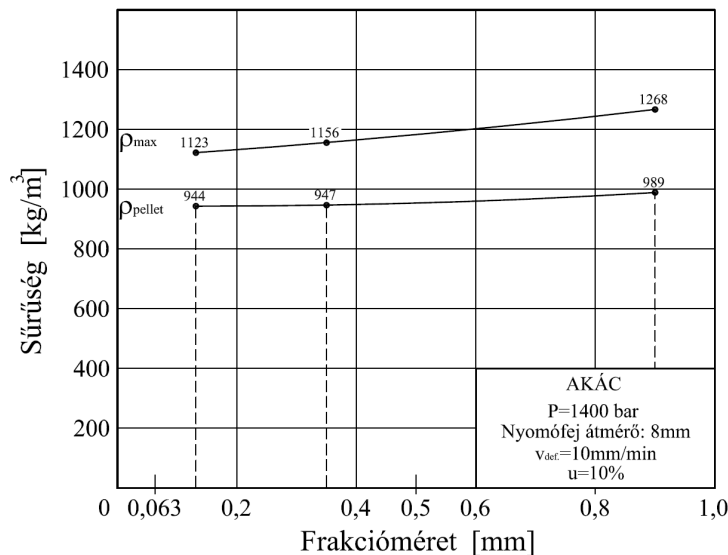


**87. ábra.** A pellet sűrűség változása a frakcióméret függvényében fenyő mintánál 8 mm-es nyomófej átmérőnél



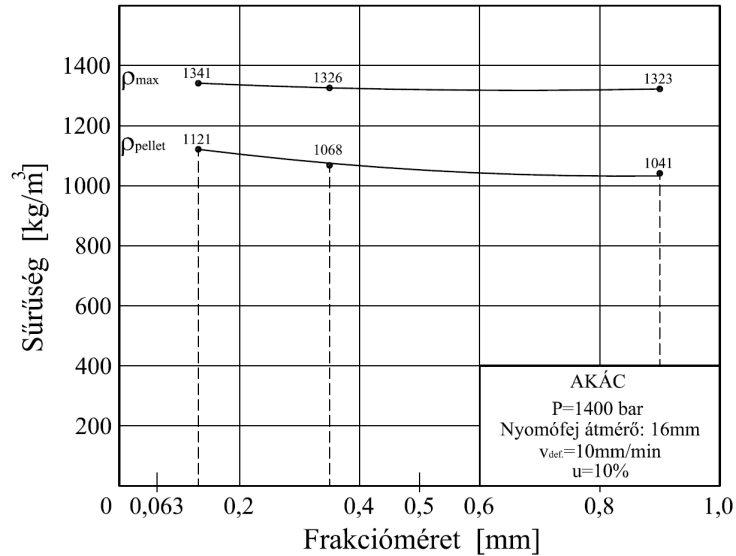
**88. ábra.** A pellet sűrűség változása a frakcióméret függvényében fenyő mintánál 16 mm-es nyomófej átmérőnél

Látható (87-88. ábra), hogy a tömörítő csatorna átmérőjének növelésével a pellet sűrűség növekedett, tehát kisebb volt a relatív falsúrlódás hatása (csökkent a tengelyirányú súrlódási ellenállás) és ezáltal a nyomás-, és vele együtt a sűrűség gradiens is pellet hossza mentén. A pellet sűrűség növekedés a két szélső átmérőnél (6 mm és 16 mm) fenyő mintánál átlagosan 22% volt 2,7 szerez átmérő növekedés mellett. Érdekesség, hogy a 88. ábrán látható görbék alakja ellentétes a korábbiakkal. A 6 mm és a 8 mm átmérővel végzett mérések során ugyanis a szemcseméret csökkenésével a tömör és a pellet sűrűség is csökkent, 16 mm-nél viszont pont fordított a helyzet. Ennek az oka a relatív falhatásban keresendő, vagyis 16 mm-es átmérőnél a falhatás sokkal kisebb, méréseim alapján mintegy 15%-a a 6 mm-es átmérőhöz képest. Ebből adódóan a kisebb szemcsék jobban tömöríthetők, aminek következtében a tömör-, és a pellet sűrűség nagyobb lett. Ugyanez ezt tapasztaltam akác mintánál is.



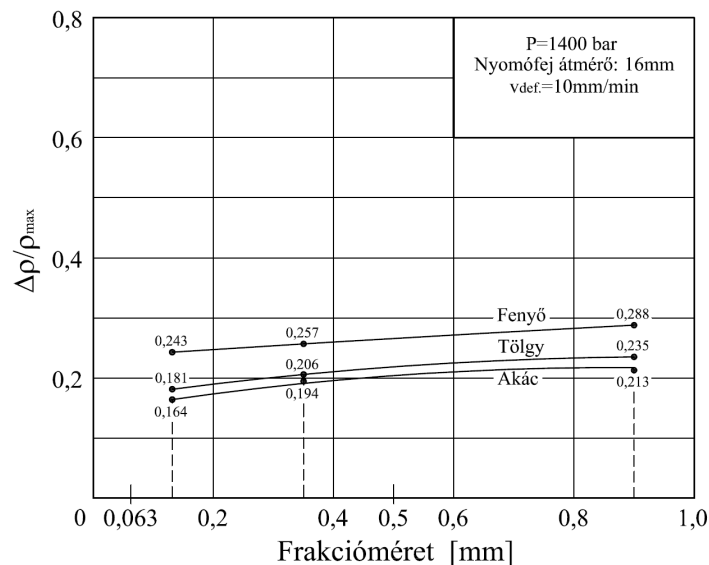
**89. ábra.** A pellet sűrűség változása a frakcióméret függvényében akác mintánál 8 mm-es nyomófej átmérőnél





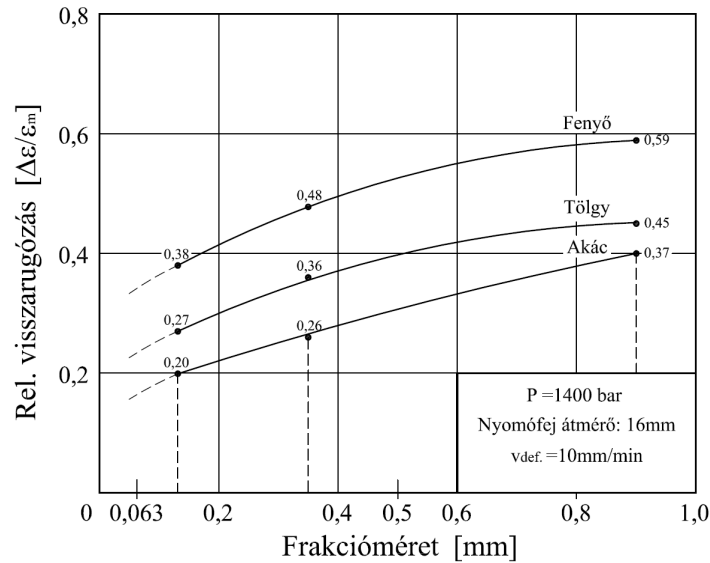
**90. ábra.** A pellet sűrűség változása a frakcióméret függvényében akác mintánál 16 mm-es nyomófej átmérőnél

Akác mintánál - követve az eddigi tendenciát - nagyobb pellet sűrűségi érték adódott, kisebb tömör sűrűség mellett, mint a fenyő minta esetében. A relatív visszarugózási értékek 16 mm-es átmérőnél csökkentek a 6 mm-es átmérőhöz képest a falhatás csökkenése következtében. A csökkenés mértéke átlagosan 15% volt. A maradó deformáció ezzel szemben 16 mm-es átmérőnél növekedett átlagosan mintegy 20%-kal a 6 mm átmérőhöz képest.

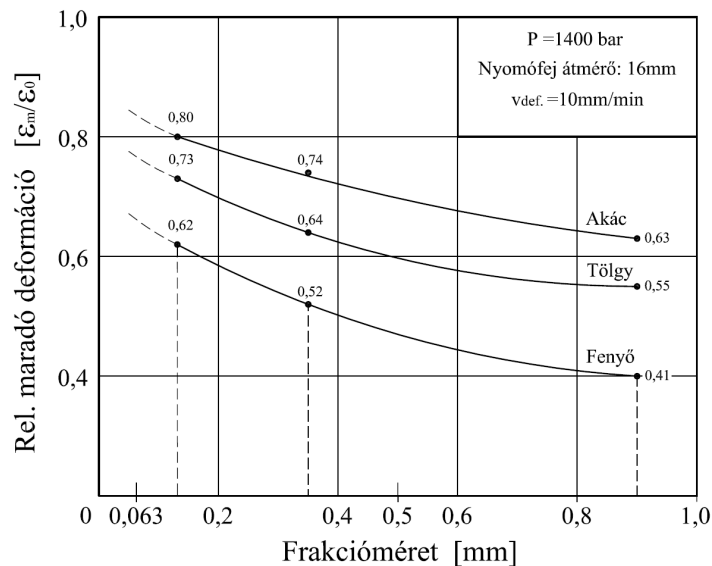


**91. ábra.** A kirugózás okozta relatív sűrűség változása a frakcióméret függvényében

A relatív sűrűség változás mind a három átmérőnél hasonlóan alakult, az eltérés átlagosan 7% -ra adódott a 6 és 16 mm között.

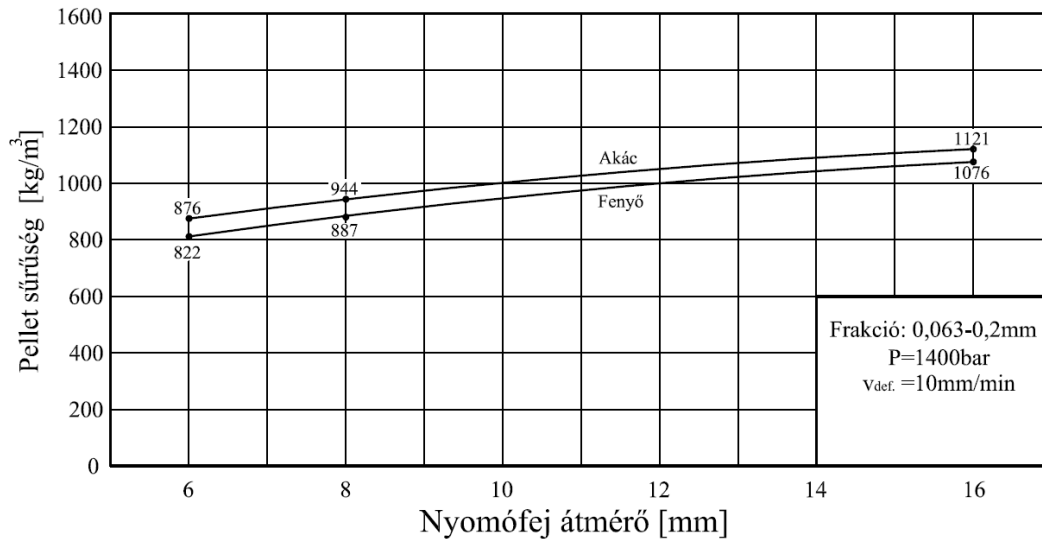


92. ábra. A relatív visszarugózás változása a frakcióméret függvényében

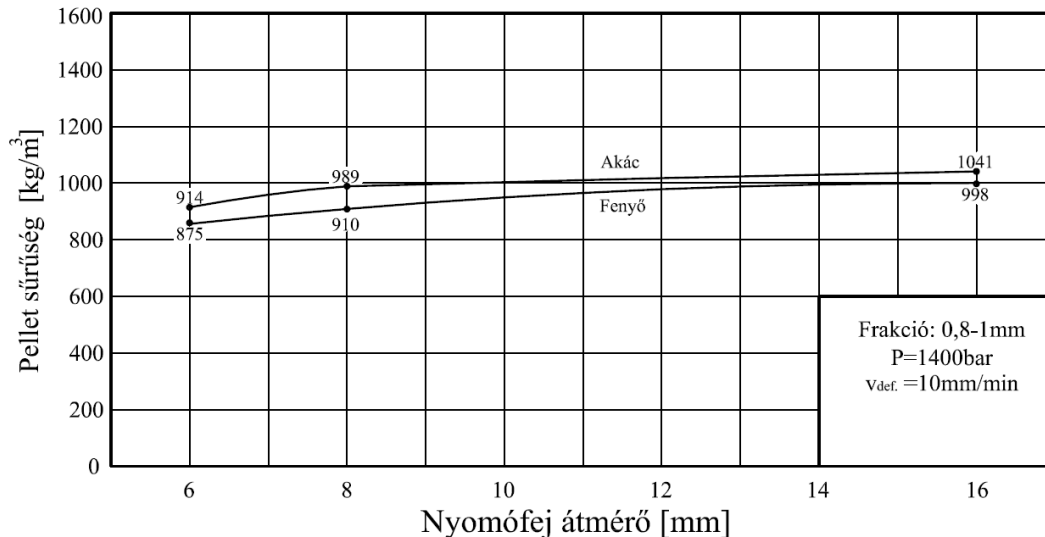


93. ábra. A relatív maradó deformáció változása a frakcióméret függvényében

A relatív visszarugózási értékek 16 mm-nél csökkentek a 6 mm-es átmérőhöz képest a falhatás csökkenése következtében (92. ábra). A csökkenés átlagosan 15% volt. A maradó deformáció ezzel szemben növekedett, átlagosan mintegy 20%-kal a 6 mm-es átmérőhöz képest.  $\varepsilon_m = 0,8$ -as relatív maradó deformáció mellett 1400 bar nyomáson akác minta esetében átlagosan  $1121 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűséget kaptam a vizsgált (0,063-0,2mm) frakciótartományban.



**94. ábra.** A pellet sűrűségének a változása az átmérő függvényében 0,063-0,2mm frakciótartományban

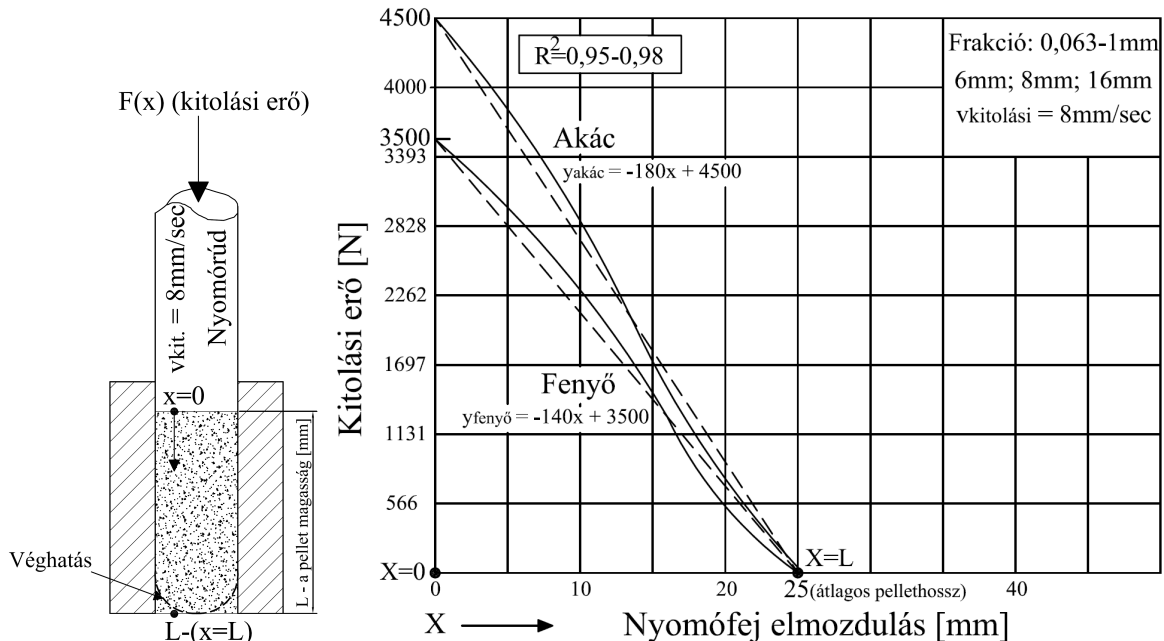


**95. ábra.** A pellet sűrűségének a változása az átmérő függvényében 0,8-1mm frakciótartományban

A 94-95. ábrákon láthatjuk a pellet sűrűség változását a vizsgált két szélső frakcióintervallumban különböző nyomófej átmérők mellett 1400 bar nyomáson fenyő és akác mintánál. Megállapítható, hogy átmérőtől függetlenül egy adott pellet sűrűség eléréséhez fenyő esetében nagyobb nyomás szükséges, mint az akácnál igazolva ezzel a korábban már említett gyakorlatban alkalmazott eltérő matricaszélességek alkalmazását. A 0,8-1mm-es szemcseméret tartományban készített pelletek a 6 mm és a 8 mm átmérőnél nagyobb sűrűségűre adódtak, mint a kisebb szemcseméret tartományban készült pelletek. A 16 mm-es átmérőnél viszont a jelentős falhatás miatt pont fordított a helyzet. A kisebb szemcsék jobban tömörödtek és kisebb volt a visszarugózásuk is, tehát nagyobb pellet sűrűségi érték adódott. Megállapítottam, hogy azonos nyomófej átmérő esetén egy adott pellet sűrűség eléréséhez fenyőnél ~30 százalékkal nagyobb nyomás szükséges az akáchoz képest. Továbbá nagyobb nyomófej átmérőnél (16 mm) 25-30 százalékkal kisebb nyomás és durvább frakció (1-2,5 mm) is elegendő a kisebb nyomófejhez (6 mm) képest a kívánt pellet sűrűség (~1100 kg/m<sup>3</sup>) elérése érdekében.

### 8.7.1. A KITOLÁSI ERŐ KÖZELÍTŐ MODELLEZÉSE

A nyomás hosszmenti gradiensének változását – utalva a fentiekre – egy összetett súrlódási problémára vezettem vissza, ahol a  $\mu$  és a  $\nu$  értékét csak mérésekkel lehet volna közelítőleg meghatározni, ugyanis véges pellet hosszánál ezek nem állandók. Ezért célul tűztem ki, hogy a vizsgálati frakciótartományban (0,063-1 mm) meghatározzam a kitolási erő változását a pellet hossz mentén ( $x$  koordináta) három átmérőnél, amellyel kimutatható a falhatás és  $p_x$  is nagyobb pontossággal számítható a mérési eredményeim alapján. Másrészt pedig az általam levezetett elméleti összefüggés felhasználásával a rugalmas deformációból származó feszültség is meghatározható, amely elsősorban a pellet radiális kirugózását (kitágulását) okozza a kitolást követően fenyő és akác mintáknál. Első lépésben megmértem fenyő és akác mintánál az előzetesen 1400 bar nyomáson tömörített faanyagalmazok kitolási erő csökkenését a pellet hosszkoordinátája ( $x$  koordináta) mentén a vizsgálati frakció intervallumban (0,063-1 mm) a három nyomófej átmérőnél (6 mm, 8 mm, 16 mm) állandó kitolási sebesség ( $v_{kit.} = 8\text{mm/s}$ ) mellett. A kapott mérési adatok alapján megállapítottam, hogy a kitolási erő jó közelítéssel lineárisan csökken a pellet hosszkoordinátájának ( $x$  koordináta) függvényében (96. ábra szaggatott vonal). Méréseim során a kitolási erő értékekre illesztett egyenes korrelációs koefficiens ( $R^2$ ) értéke 0,95-0,98 között alakult az átlagos pellet hossz (25 mm) figyelembevételével (96. ábra). A következő lépésben mérésekkel meghatározásra került a három nyomófej átmérőnél a frakcióintervallumra (0,063-1 mm) jellemző maximális kitolási erő fenyő és akác mintánál, amely alapját képezte az elméleti levezetésnek. Megállapítottam, hogy a maximális kitolási erő fafajon belül közel azonos volt mind a három átmérő esetében. Ebből is érzékelhető a relatív falsúrlódás jelentős hatása.



96. ábra. A maximális kitolási erő csökkenése az átlagos pellethossz függvényében

A maximális kitolási erő változását láthatjuk a 96. ábrán a vizsgált frakcióintervallumban a három nyomófej átmérőnél fenyő és akác mintánál. A maximális kitolási erők az alábbiak szerint alakultak:

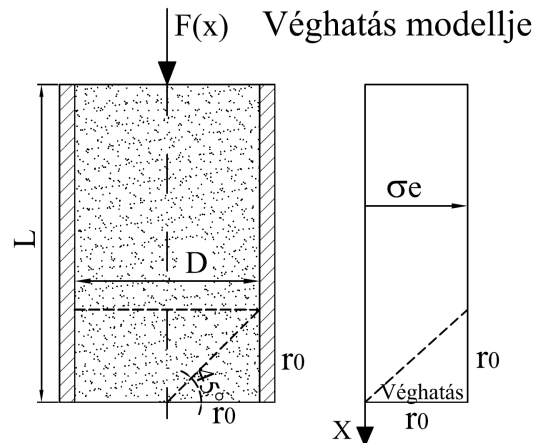
- Fenyő:  $F_{max\ kitolási} = 3500\text{ N}$
- Akác:  $F_{max\ kitolási} = 4500\text{ N}$

A maximális kitolási erő ( $F_{max\ kitolási}$ ) arányának változása fenyő és akác mintánál az adott tömörítési nyomáshoz (1400 bar) tartozó nyomóerőkhöz képest ( $F_{max\ kitolás}/F_{max}$  [%]):

- Fenyő: 6 mm átmérőnél: 88%
- Fenyő: 8 mm átmérőnél: 50%
- Fenyő: 16 mm átmérőnél: 12%
- Akác: 6 mm átmérőnél: 112%
- Akác: 8 mm átmérőnél: 64%
- Akác: 16 mm átmérőnél: 16%

Láthatjuk, hogy a kapott kitolási erő arányok akác esetében mindhárom átmérőnél szisztematikusan nagyobbra adódtak, mint a fenyőnél. Mivel az akác szemcsék nagyobb szilárdságúak és ezáltal ridegebbek is, mint a fenyő, ezért a szemcsék az adott tömörítési nyomáson (1400 bar) feltehetően jobban töredezték, így változott a relatív súrlódási felület nagysága (Lsd. függelék, szemcsék alakai meghatározása). A relatív súrlódási felület változásával (növekedésével), valamint a maradó deformáció miatt megnőtt a kitolási erő a fenyőhöz képest, sőt előfordult, hogy meghaladta a maximális tömörítési nyomásból származó nyomóerő értékeket is (112%). Ezen kívül természetesen a kezdeti szemcsék alakja is nagyban befolyásolja a súrlódási tényező értékét (Lsd. függelék, szemcsék alakai meghatározása).

A kitolási erő közelítő elméleti meghatározását a következőkben ismertetem:



97. ábra. A véghatás mechanikai modellje

Tömörítéskor a por-forgács halmaz szabad végén ún. véghatás lép fel (96-97. ábra), tehát expandál (kigurózik) a halmaz (96-97. ábra). Ennek következtében a szabad végnél a faanyag halmaz leépíti a  $\sigma_e$  oldalnyomásból származó feszültséget (97. ábra). A gyakorlatban a kirugózás valamilyen függvény szerint változik. Ezt a változást ún. relatív felületcsökkentési tényezővel ( $\psi_{vég}$ ) vettem figyelembe. A rugalmas féltér elméleteknek megfelelően az egyes irodalmak (TIMOSHENKO és WOJNOWSKY-KRIEGER, 1966; CSANADY és MAGOSS, 2013) a  $\sigma_e$  oldalnyomásból származó feszültség csökkenést tömör anyagok esetében  $45^\circ$ -os súrlódási félkúpszög alatt veszik figyelembe. Jó közelítéssel a pellet is tömör anyagnak tekinthető, tehát nem tévedek nagyot, ha a levezetett elméletnél a  $45^\circ$ -os súrlódási félkúpszöget vesszem alapul. Az  $x$  koordináta mentén halad kifelé a pellet a tömörítő csőből. A nyomófej elmozdulása, tehát az  $x$  koordináta mentén történik (96. ábra).

A pellet a nyomócső falával érintkező felülete:  $A = D\pi(L - x)$ , kezdetben  $x=0$  (78)

ahol:

$L$  – a pellet hossza, (mm)

$D$  – a nyomófej átmérő, (mm)

$x$  – a pellet függőleges irányú elmozdulása az  $x$  koordináta mentén, (mm) (kezdetben  $x=0$ )

A kitolási erő az (67) egyenlet felhasználásával:  $F_{(x)} = A_x \sigma_e \mu$  (79)

ahol:

$\sigma_e$  – a megmaradt rugalmas deformációból származó nyomófeszültség (oldalnyomás), (N/mm<sup>2</sup>)

$\mu$  – a pellet és a tömörítő csatorna fala között fellépő súrlódási tényező

A súrlódási tényező nem függ a felület nagyságától, csak akkor, ha adhézió jön hozzá (VARGA, 1993). Esetünkben az adhézió nem jelentős, ezért elhanyagolhatjuk.

A felületet helyettesítve:

$$F_{(x)} = D\pi\sigma_e\mu(L-x), \quad \text{induláskor } x=0! \quad (80)$$

A pellet radiális irányú kitágulása (kirugózása) meghatározható az alábbi módon, a Hooke-törvény értelmében:

$$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{1-\nu}{E} \sigma_e, \quad r_0 = D/2 \quad (81)$$

ahol:

$\Delta r$  – a pellet radiális irányú kirugózása, (mm)

$r_0$  – a nyomófej sugara, (mm)

$\nu$  – a Poisson-tényező

$E$  – a rugalmassági modulus, amely a falterhelést adja, (N/mm<sup>2</sup>)

A (81) egyenlet átrendezésével  $\sigma_e$  kifejezhető:  $\sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r}{r_0}$  (82)

A pellet szabad végén tehát leépül a  $\sigma_e$  feszültség a  $D/L$  viszony függvényében, ezért az effektív felület csökken (97. ábra). Ha a feszültség leépítést a végeken 45°-os súrlódási félkúpszög szerint vesszük, akkor a relatív felületcsökkentési tényező felírható az alábbi módon:

$$\psi_{\text{vég}} = \frac{D\pi(L-r_0)}{D\pi \cdot L} = \frac{L-r_0}{L} \quad (83)$$

Esetemben az átlagos pellet hossz:  $L_{\text{pellet}}=25$  mm. Ebben az esetben a relatív felületcsökkenés a három ármérőnél:

$$\psi_6 = 0,88$$

$$\psi_8 = 0,84$$

$$\psi_{16} = 0,68$$

A kitolási erő ( $F_x$ ) közelítő elméleti kifejezése ezzel:

$$F_{(x)} = 2\pi \frac{E}{1-\nu} \mu \Delta r (L-x) \psi_{\text{vég}} \quad (84)$$

A radiális és a relatív radiális kirugózás ( $\Delta r_i$ , illetve  $\Delta r_i/r_{0i}$ ) méréseim alapján fenyőre és akácra a három vizsgált átmérőknél:

$$\phi 6 \rightarrow \Delta r_6 \cong 0,25 \text{ mm} \quad \Delta r_6 / r_{06} = 0,0833 \quad (8,3\%)$$

$$\phi 8 \rightarrow \Delta r_8 \cong 0,3 \text{ mm} \quad \Delta r_8 / r_{08} = 0,075 \quad (7,5\%)$$

$$\phi 16 \rightarrow \Delta r_{16} \cong 0,52 \text{ mm} \quad \Delta r_{16} / r_{016} = 0,065 \quad (6,5\%)$$

A  $\Delta r_i \cdot \psi_i$  szorzatok értékei, ennek megfelelően:

$$\phi 6 \rightarrow \Delta r_6 \cdot \psi_6 = 0,25 \cdot 0,88 = 0,22$$

$$\phi 8 \rightarrow \Delta r_8 \cdot \psi_8 = 0,3 \cdot 0,84 = 0,25$$

$$\phi 16 \rightarrow \Delta r_{16} \cdot \psi_{16} = 0,52 \cdot 0,68 = 0,35$$

A súrlódási tényező értékei 10%-os nedvességtartalom esetén 0,2-1 mm-es szemcseméret tartományban, fa-acél súrlódási anyagpárosítás mellett (VARGA, 1983):

Fenyő:  $\mu = 0,65$

Akác:  $\mu = 0,55$

A fenti adatokkal és az ismert maximális kitolási erővel a rugalmassági modulus, amely létrehozza a  $\sigma_e$  feszültséget, meghatározható felhasználva az (84) egyenletet:

$$\text{Fenyő: } \frac{E}{1-\nu} = 156 \text{ N/mm}^2 \quad (6 \text{ mm átmérő esetében})$$

$$\text{Akác: } \frac{E}{1-\nu} = 237 \text{ N/mm}^2 \quad (6 \text{ mm átmérő esetében})$$

Ez a  $\frac{E}{1-\nu}$  által meghatározott feszültség van a pelletbe „bezárva” összenyomott állapotban és ez fogja a radiális irányú kirugózást (tágulást) okozni. A tehermentesítés után ezzel a feszültséggel fog expandálni (kirugózni) a pellet. A por-forgács halmazok súrlódási tényezőinek vizsgálataival kapcsolatos korábbi kutatásokban (VARGA, 1983; VARGA, 1993) találhatunk a pelletálásra jellemző szemcseméretnek és nedvességtartalomnak megfelelő súrlódási tényező értékeket, melyek alapján a fenti feszültség jó közelítéssel már meghatározható a vizsgált frakciótartományban (0,063-1 mm).

A  $\sigma_e$  feszültség nagysága fenyő és akác mintánál mind a három átmérőre:

$$\phi 6 \rightarrow \sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r_6}{r_{06}} = 156 \cdot 0,083 = 12,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Fenyő: } \phi 8 \rightarrow \sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r_8}{r_{08}} = 137 \cdot 0,075 = 10,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\phi 16 \rightarrow \sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r_{16}}{r_{016}} = 98 \cdot 0,065 = 6,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\phi 6 \rightarrow \sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r_6}{r_{06}} = 237 \cdot 0,083 = 19,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Akác: } \phi 8 \rightarrow \sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r_8}{r_{08}} = 208 \cdot 0,075 = 15,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\phi 16 \rightarrow \sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r_{16}}{r_{016}} = 149 \cdot 0,065 = 9,7 \text{ N/mm}^2$$

Ha a tömörítési folyamatoknál  $\nu$  értékét 0,35-re választjuk, akkor a falterhelést adó rugalmassági modulus az (84) egyenlet felhasználásával már meghatározható a pelletátmérő függvényében:

$$\text{Fenyő: } E = 101,4 \text{ N/mm}^2 \quad (6 \text{ mm átmérő esetében})$$

$$\text{Akác: } E = 154,1 \text{ N/mm}^2 \quad (6 \text{ mm átmérő esetében})$$

A fenti rugalmassági modulusok a falterhelést adják. Nem szabad összetéveszteni a „deformáció modulussal”, amely a tömörítő erőre vonatkozik. Utóbbi a kompresszió görbe egyenletéből határozható meg. Alapul véve az 1400 bar nyomáson előállított pelletet, aminek átlagosan  $\varepsilon=0,8$  a fajlagos alakváltozása, ekkor a kompresszió görbe kitevője jó közelítéssel  $n=2$ . Ezek alapján a nem-lineáris rheológiai egyenletek (57; 58; 59) felhasználásával az alábbiak számolhatók:

A feszültség-alakváltozás ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) összefüggés alapján  $A$ -állandó értéke meghatározható:

$$P = A \left( \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^n \Rightarrow 1400 = A \left( \frac{0,8}{1-0,8} \right)^2 \rightarrow A = 87,5$$

A deformáció modulus az  $A$ -állandó ismeretében már számítható:

$$E = \frac{\partial P}{\partial \varepsilon} = A \cdot n \left( \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^{n-1} / (1-\varepsilon)^2 = 87,5 \cdot 2 \left( \frac{0,8}{1-0,8} \right)^{2-1} / (1-0,8)^2 = 17500 \text{ bar} = 1750 \text{ N/mm}^2$$

Vagy a közepes (szekáns) modulus:

$$E_K = A \frac{\varepsilon^{n-1}}{(1-\varepsilon)^n} = 87,5 \frac{0,8^{2-1}}{(1-0,8)^2} = 1750 \text{ bar} = 175 \text{ N/mm}^2$$

A rugalmas komponens az előzőek szerint a deformáció modulusnak kb. az egytizede. A tehermentesítés után (kirugózás) a pellet deformáció modulusa csökken a számítottéhoz viszonyítva minimum a rugalmas komponensnek megfelelően. A tömörítés folyamán a pellet deformációs modulusa akár ezerszeresére is változhat ( $1750 \text{ N/mm}^2$ ). A fenti példa megfelel a fenyő mintánál kapott kutatási eredményeknek. Akác mintánál átlagosan  $\varepsilon=0,75$  fajlagos alakváltozást kaptunk. Ezek alapján a deformációs modulusa  $1590 \text{ N/mm}^2$ -re adódott. A fenyő esetében nagyobb volt a faanyaghalmozba bevitt deformációs feszültség nagysága. Az ok, amiért a fenyő jobban kirugózik, mint az akác abban keresendő, hogy a tömörítés végén nagyobb a faanyaghalmozba bevitt deformációs feszültség nagysága, ezáltal nagyobb a belső erők a szemcsékre gyakorolt hatása is. A fafaji sajátosságokból adódóan a fenyő szemcsék kisebb szilárdságúak és sűrűségűek, mint az akác, így azokra a nagyobb belső feszültségből származó ellenerők jobban kifejtik hatásukat, tehát a faanyag nem-lineáris viszkoeasztikus tulajdonsága miatt visszarugózásuk is nagyobb lesz.



### 8.7.2. A NYOMÁSTARTÁSHOZ SZÜKSÉGES PRÉSCSATORNAHOSSZ KÖZELÍTŐ MEGHATÁROZÁSA

Kísérleteimben a tömörítést szakaszosan végeztem el zárt térben, azaz a préscsatorna egyik vége a tömörítés során le volt zárva. A gyakorlatban viszont a pelletálás folyamatosan megy végbe, tehát a tömörítési nyomást a préscsatorna hossza mentén kialakuló falsúrlódásnak kell megtartani (ellentartani). A falsúrlódás, tehát függ a préscsatorna átmérőjétől, a préscsatorna hosszától, a pelletálási nyomásviszonyoktól és az alapanyag tulajdonságtól (fafaj, szemcseméret, nedvességtartalom, stb.). Az előző fejezetben levezetett egyenlet (84) alapján, valamint kísérleti eredményeimmel közelítőleg meghatároztam azt a szükséges préscsatorna hosszát, amely megtartja (ellentart) a  $p_k$  terhelési nyomást. A levezetett elméletnél szintén figyelembe vettem a relatív felületcsökkentési tényezőt:  $\psi_{\text{vég}} = \frac{L - r_0}{L}$

Ennek megfelelően a három átmérőre számolt relatív felületcsökkenés:

$$\psi_6 = 0,88$$

$$\psi_8 = 0,84$$

$$\psi_{16} = 0,68$$

Az egyensúlyi egyenlet az alábbiak szerint írható fel:

$$F_{\text{tömörítési}} = F_{\text{kitolási}} \rightarrow r_0^2 \pi \cdot p_k = 2\pi \frac{E}{1-\nu} \mu \Delta r L_{\text{csatorna}} \cdot \psi_{\text{vég}}$$

A préscsatorna hossza ( $L_{\text{csatorna}}$ ) rendezve az egyenletet:

$$L_{\text{csatorna}} = \frac{r_0 p_k}{2 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r}{r_0} \cdot \psi_{\text{vég}}} \quad (85)$$

Vagy dimenzió nélküli alakban:

$$\frac{L_{\text{csatorna}}}{D} = \frac{p_k}{4 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r}{r_0} \psi_{\text{vég}}} \quad (85a)$$

ahol:

$L_{\text{csatorna}}$  – a préscsatorna hossza, (cm)

$r_0$  – a nyomófej sugara, (cm)

$p_k$  – a nyomófej által kifejtett nyomás, (N/cm<sup>2</sup>)

$E$  – a rugalmassági modulus, amely a falterhelést adja, (N/cm<sup>2</sup>)

$\nu$  – a Poisson-tényező,

$\mu$  – a faanyagfal (pellet) és a cső fala között létrejött súrlódási tényező,

$\Delta r$  – a pellet radiális irányú kirugózása. (cm)

Felhasználva a 8.7.1. fejezetben számított értékeket, a három pelletátmérő esetében fenyő és akác mintáknál az alábbi csatorna hosszak tartanak ellent a  $p_k = 1400$  bar tömörítési nyomásnak:

**Fenyő esetében:**

$$L_6 = \frac{r_{06} P_k}{2 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r_6}{r_{06}} \cdot \psi_{6\text{vég}}} = \frac{0,3 \cdot 14000}{2 \cdot 15600 \cdot 0,65 \cdot 0,0833 \cdot 0,88} = 2,83 \text{ cm} \quad (28,3 \text{ mm})$$

$$L_8 = \frac{r_{08} P_k}{2 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r_8}{r_{08}} \cdot \psi_{8\text{vég}}} = \frac{0,4 \cdot 14000}{2 \cdot 13700 \cdot 0,65 \cdot 0,075 \cdot 0,84} = 4,99 \text{ cm} \quad (49,9 \text{ mm})$$

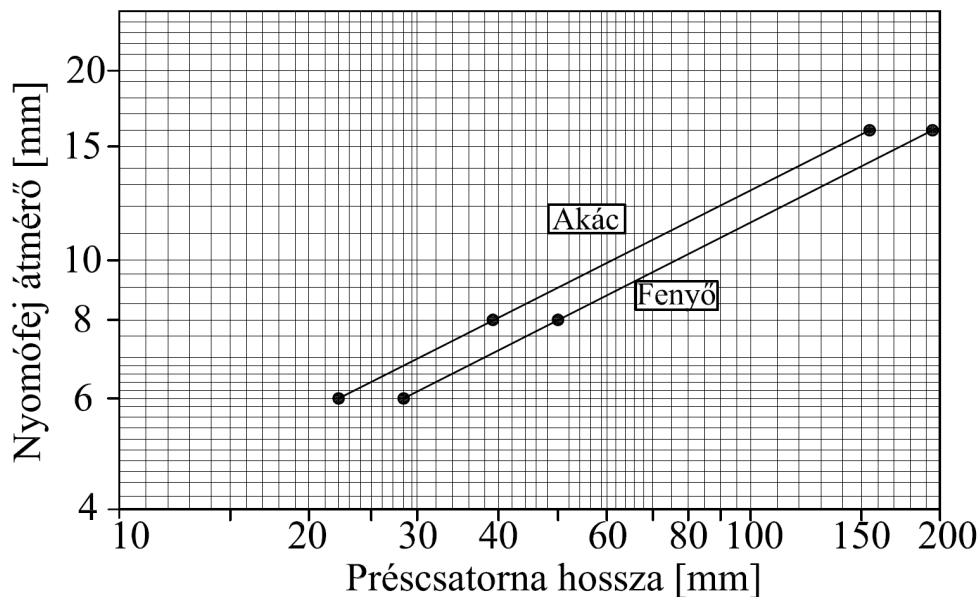
$$L_{16} = \frac{r_{016} P_k}{2 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r_{16}}{r_{016}} \cdot \psi_{16\text{vég}}} = \frac{0,8 \cdot 14000}{2 \cdot 9800 \cdot 0,65 \cdot 0,065 \cdot 0,68} = 19,88 \text{ cm} \quad (198,8 \text{ mm})$$

**Akác esetében:**

$$L_6 = \frac{r_{06} P_k}{2 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r_6}{r_{06}} \cdot \psi_{6\text{vég}}} = \frac{0,3 \cdot 14000}{2 \cdot 23700 \cdot 0,55 \cdot 0,0833 \cdot 0,88} = 2,20 \text{ cm} \quad (22,0 \text{ mm})$$

$$L_8 = \frac{r_{08} P_k}{2 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r_8}{r_{08}} \cdot \psi_{8\text{vég}}} = \frac{0,4 \cdot 14000}{2 \cdot 20800 \cdot 0,55 \cdot 0,075 \cdot 0,84} = 3,88 \text{ cm} \quad (38,8 \text{ mm})$$

$$L_{16} = \frac{r_{016} P_k}{2 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r_{16}}{r_{016}} \cdot \psi_{16\text{vég}}} = \frac{0,8 \cdot 14000}{2 \cdot 14900 \cdot 0,55 \cdot 0,065 \cdot 0,68} = 15,46 \text{ cm} \quad (154,6 \text{ mm})$$



**98. ábra.** Az 1400 bar préselési nyomáshoz tartozó précsatorna hosszának változása a nyomófej átmérő függvényében akác és fenyő minták esetében

A 98. ábráról megállapítható, hogy egy adott pelletálási nyomás (1400 bar) megtartásához fenyő minta esetében azonos pelletátmérő mellett nagyobb préscsatorna hossz szükséges, mint az akác esetében. Ezzel ismét alátámasztottam a gyakorlatban alkalmazott eltérő matricaszélességek alkalmazását. A 98. ábráról azt is megállapíthatjuk, hogy 6mm-es pelletátmérőnél a kialakult pellethossz (ami esetemben átlagosan 25mm) a jelentős falhatás miatt képes megtartani a préselési nyomást. Ennél nagyobb átmérőtartományokban viszont növelni kell a préscsatorna hosszát. Fenyő pellet esetében 1400 bar préselési nyomáson 6mm pelletátmérő felett minden további 1mm-es pelletátmérő növekedés átlagosan 17mm-es préscsatorna hossz növekedést von maga után, míg akácnál ez az érték 13mm-re adódott. Megállapítottam, hogy 2,7 szerez pelletátmérő növekedés 7 szerez préscsatorna hossz növekedést eredményezett fenyő és akác minta esetében. Azaz 16mm-es átmérőnél a falhatás 15%-a a 6mm átmérőből adódó falhatáshoz képest.

### 8.8.A DIMENZIÓ NÉLKÜLI SZÁMOK ALKALMAZÁSA A POR-FORGÁCS HALMAZOK TÖMÖRÍTÉSI FOLYAMATINÁL

A kutatások egyik problémája szokott lenni a viszonylag nagyszámú független változó kezelése, valamint az adatok általánosan érvényes feldolgozása. Ehhez nagy segítséget nyújt a hasonlósági elmélet alkalmazása dimenzió nélküli számok segítségével. Az összefüggések keresése alapvetően kétféle módszerrel történhet. Az egyik módszer az összefüggést leíró egyenletek elméleti úton való levezetése a meglévő alapelvek alapján, az alaptudományok felhasználásával. Az elméleti levezetések esetén is bizonyos feltételezésekből indulunk ki, ezért az elméleti összefüggések helyességét is célszerű kísérletileg ellenőrizni. A jelenséget leíró egyenletek elméleti levezetése csak akkor lehetséges, ha a jelenség mechanizmusát pontosan ismerjük, vagyis a jelenséget befolyásoló összes változó hatását figyelembe tudjuk venni és helyesen le tudjuk írni. Amint a feladatok összetettebbé válnak, az összes változó számbavétele nehezebbé válik és a jelenség mechanizmusa részleteiben nem lesz ismert. Előfordulhat az is, hogy az alaptudományok nem nyújtanak elegendő ismereteket a jelenség leírásához. Különösen fontos a változók megállapítása, hiszen a szisztematikus kísérletek tervezéséhez és elvégzéséhez ennek ismerete nélkülözhetetlen. A hasonlósági kritériumok, mint dimenzió nélküli komplexek a jelenséget leíró differenciálegyenletekből vagy pedig dimenzióanalízis útján nyerhetők. Mivel a differenciálegyenletek megoldása a kezdeti és a peremfeltételektől is függ, ezért ezeknek az egyértelműségi feltételeknek is azonosnak kell lenni. A differenciálegyenletek útján nyert hasonlósági kritériumok minden esetben megfelelnek a fizikai folyamat lényegének, tehát azok biztonsággal használhatók. Sok esetben viszont a jelenséget leíró differenciálegyenletek nem írhatók fel és ilyenkor csak a dimenzióanalízis módszere nyújthat segítséget. A hasonlósági elméletek szerint bármilyen jelenséget leíró összefüggés kifejezhető a jelenségre jellemző hasonlósági kritériumok függvényében.

$$f(\pi_1, \pi_2 \dots \pi_n) = 0, \text{ ahol } \pi - \text{ a hasonlósági számok}$$

Az ilyen alakú egyenleteket kritériumi egyenleteknek nevezzük. Ha tehát valamilyen kísérlet eredményeit hasonlósági kritériumok alakjában dolgozzuk fel, akkor olyan általános érvényű összefüggéshez jutunk, ami az összes egymással hasonló jelenségekre érvényes. A kritérium egyenletekben, a hasonlósági kritériumok lehetnek úgynevezett szimplexek is, amik azonos dimenziójú mennyiségek hányadosaként adódnak. A hasonlóság elmélete szerint a kritériumi egyenletek kifejezhetők hatványfüggvények szorzataként is, vagyis:

$$\pi_1 = C \cdot \pi_2^a \cdot \pi_3^b \dots \pi_i^n,$$

ahol  $C$  és  $a, b, \dots, n$  állandókat a kísérleti eredmények alapján kell meghatározni. A dimenzióanalízis során két fontos kritériumot kell szem előtt tartani. Az egyik, hogy a dimenzió nélküli mennyiségekben szereplő változóknak függetlennek kell lenni egymástól, a másik kritérium pedig, hogy minden dimenzió nélküli számban kell lenni egy változónak, ami a többiben nem fog szerepelni.

A kutatásom során kapott eredmények figyelembe vételével megalkottam egy kritérium egyenletet a következő megfontolások alapján: Sorba vettem azokat a változókat, melyek befolyással vannak a kialakult pellet tulajdonságaira és vele összefüggésben a fajlagos energiára. A dimenzióanalízis módszerét (SITKEI, 2013) alkalmazva a következő dimenzió nélküli számok nyerhetők:

$$W = f(p, \gamma, d, \sigma_{ny}, \vartheta, \vartheta_0); \quad \pi_1 = \frac{W}{p}; \quad \pi_2 = \frac{\gamma \cdot d}{\sigma_{ny}}; \quad \pi_3 = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}$$

Ezek alapján a hasonlósági egyenlet a következő alakban írható fel:

$$\frac{W}{P} = f\left(\frac{\gamma \cdot d}{\sigma_{ny}}; \frac{\vartheta}{\vartheta_0}\right) \quad (86)$$

vagy

$$\frac{W}{P} = \text{áll.} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot d}{\sigma_{ny}}\right)^n \cdot \left(\frac{\vartheta}{\vartheta_0}\right)^m \quad (87)$$

ahol:

$P$  – a nyomás, (N/m<sup>2</sup>)

$W$  – a fajlagos energia, (Nm/m<sup>3</sup>)

$\gamma$  – a pellet térfogatsúly, (N/m<sup>3</sup>)

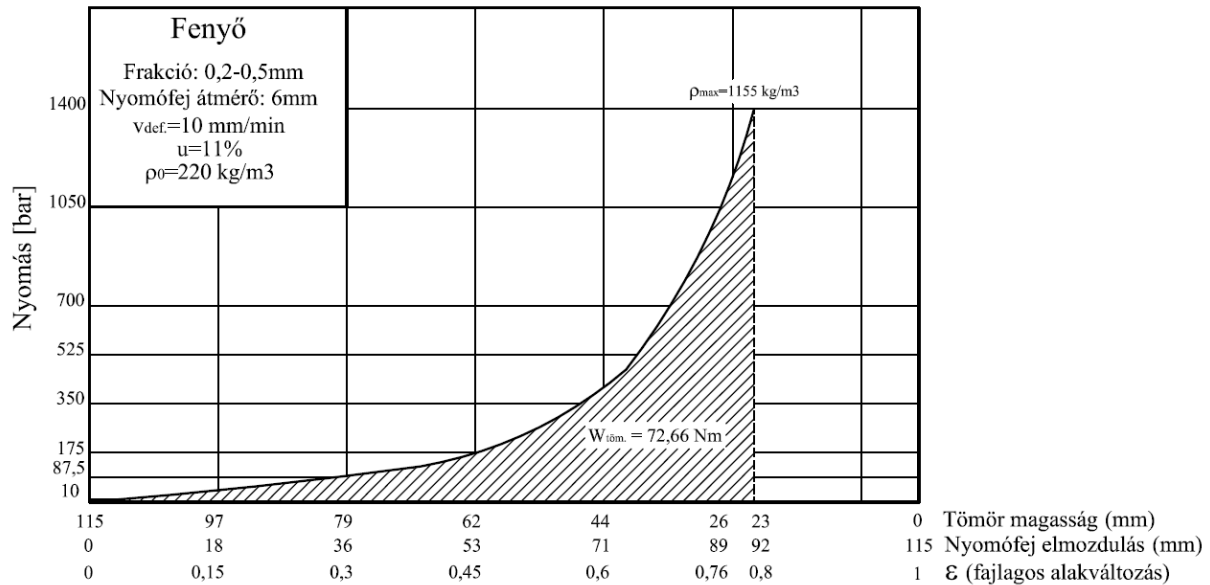
$d$  – a pellet átmérő, (m)

$\sigma_{ny}$  – az adott fafaj szilárdsági jellemzője, esetünkben nyomószilárdság, (N/m<sup>2</sup>)

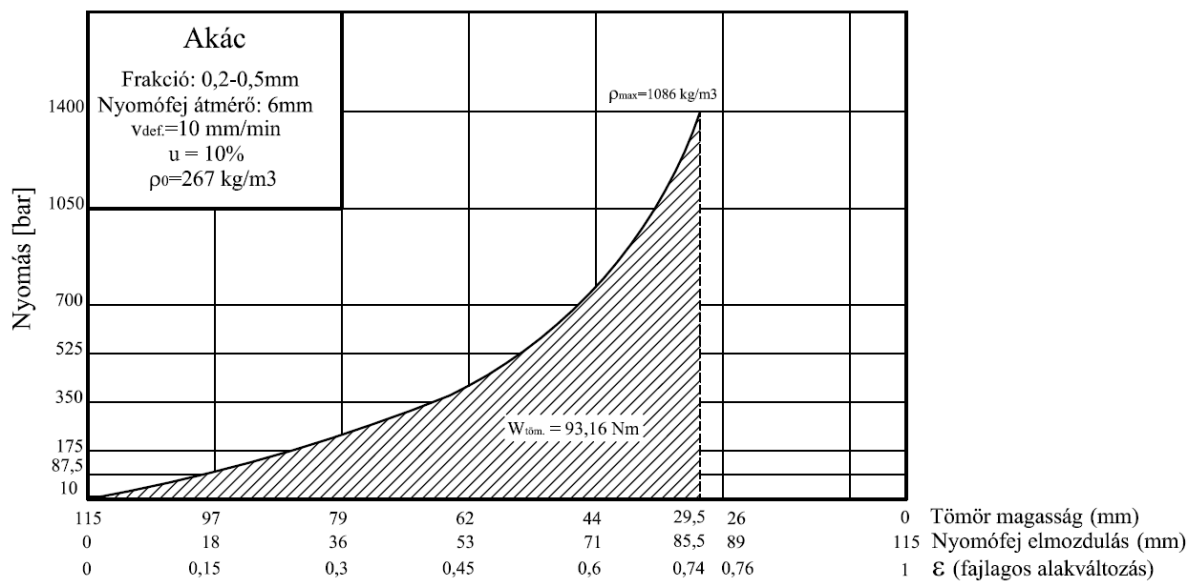
$\vartheta$  – a pellet hőmérséklet, (°C)

$\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}$  – a vonatkoztatási hőmérséklet.

A kritérium egyenletben szereplő dimenzió nélküli számok, melyek invariánsok, tehát univerzálisan jellemzik a faanyagok nyomás-sűrűség változását a tömörítési munka és a préhőmérséklet függvényében különböző pelletátmérők mellett. A pelletálási folyamatra jellemzően az összmunka a tömörítési ( $W_{töm.}$ ) és a kitolási ( $W_{kit.}$ ) munkákból tevődik össze. A tömörítési munkákat a kompresszió görbe alatti terület adta, melyeket frakciótartományonként vizsgáltam, és minden tömörítési folyamat végén a hozzá tartozó kitolási munkákat meghatároztam, melyek az előző fejezetben tárgyalt görbe alatti területből adódtak. Példaképpen bemutatom a fenyő és akác mintáknál kapott kompresszió görbéket egy adott frakciótartományra jellemzően (99-100. ábra). Minden frakció tartományban három azonos mérést végeztem, majd a mérések átlagából határoztam meg az adott szemcseméret tartományra jellemző összmunkát.



99. ábra. Fenyő minta nyomás-alakváltozás görbéje 1400 bar nyomáson



100. ábra. Akác minta nyomás-alakváltozás görbéje 1400 bar nyomáson

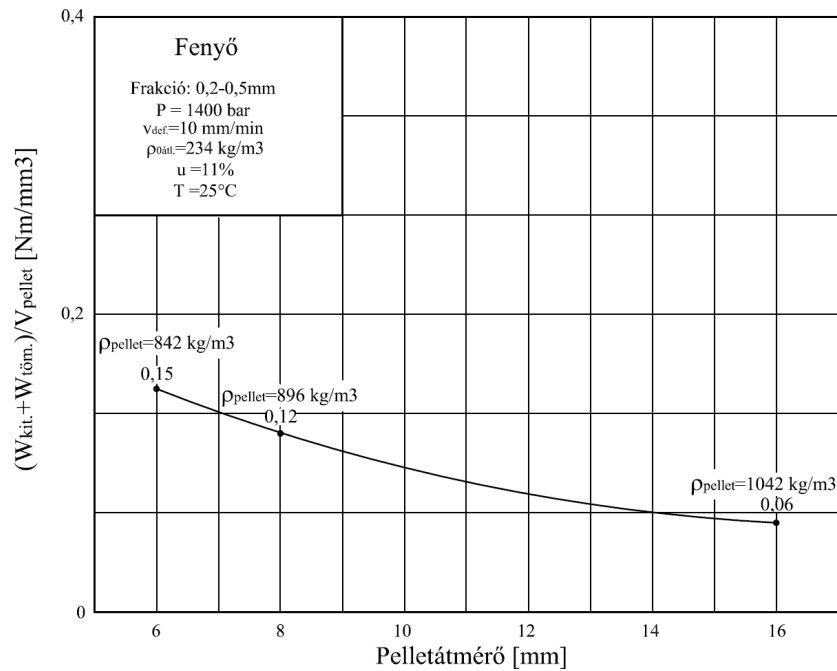
Az ábrákon (99-100. ábra) látható a fenyő és az akác minta kompresszió görbéje. A tömörítő csatorna átmérője 6 mm, a hossza pedig 115 mm volt. Megfigyelhető, hogy a bemutatott példában 1400 bar nyomáson a fajlagos alakváltozás fenyőnél  $\varepsilon=0,8$ -ra, akácnál pedig  $\varepsilon=0,74$ -re adódott, amit jelentős térfogatváltozás kísért. A térfogatváltozással párhuzamosan jelentős sűrűségváltozás is végbement, vagyis a kiinduló laza halmaz sűrűségéhez ( $\rho_0$ ) képest fenyőnél 5,25-szeresére, akácnál pedig 4-szeresére növekedett a tömör sűrűség. A por-forgács halmazok nagynyomáson történő tömörítésével összefüggő tömörítési arányokat az irodalmak (R.C.AKDENIZ, 2013) 4-5-szeres értékben határozzák meg, ami megfelel a valóságnak. Megfigyeltem továbbá, hogy a por-forgács halmazok kezdő sűrűségének ( $\rho_0$ ) növekedésével a tömörítés arány csökkent állandó nyomáson. A terhelés növekedésével a rugalmassági modulus is növekszik, vagyis a folyamatot jellemzi egy kezdő ( $E_0$ ) egy pillanatnyi ( $E$ ) és egy közepes ( $E_k$ ) ún. szekáns modulus.

Ahhoz, hogy fajlagos energiát kapjak az összmunkákat ( $W_{\text{töm.}} + W_{\text{kit.}}$ ) a pellet volumenre ( $V_{\text{pellet}}$ ) vonatkoztattam. A tömörítési munkákat a kompresszió görbe alatti terület adta, ami, az (57) egyenlet integrálásából meghatározható.

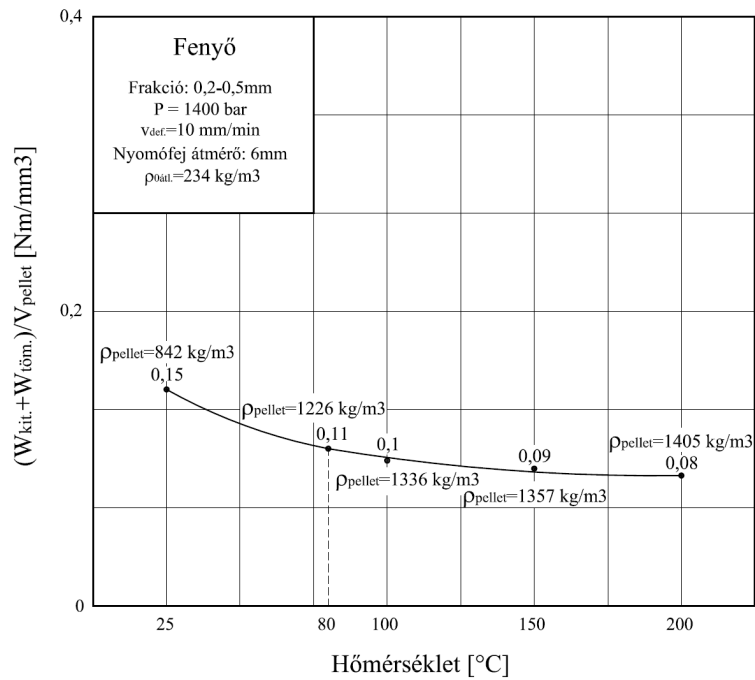
Kutatási eredményeim alapján megállapítottam, hogy a gyakorlatban  $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$  sűrűségű pelletet csak  $\varepsilon=0,8-0,85$  fajlagos alakváltozás mellett érhetünk el. A kitevő értéke ekkor  $n=2-2,5$ -re adódik. A fentiek ismeretében az anyagtól függő állandó ( $A$ ) az (57) egyenletből már meghatározható. Hivatkozva a 8.7. fejezetre, a kitolási erő közelítőleg lineárisan csökken a kitolási úthossz (tömör pellet hossz) függvényében. Tehát a kitolási munka így egyszerűen számolható a nyomóerő ( $F$ ) és az elmozdulás ( $s$ ) ismeretében:

$$W_{\text{kit.}} = \frac{F \cdot s}{2}, \text{ (Nm)} \quad (88)$$

A kapott fajlagos munkákat fenyő és akác minták esetében különféle pelletátmérők és hőmérséklet függvényében a következő ábrákon mutatom be (101-104. ábra). Az ábrákon a pellet sűrűségének változását is nyomon követhetjük.

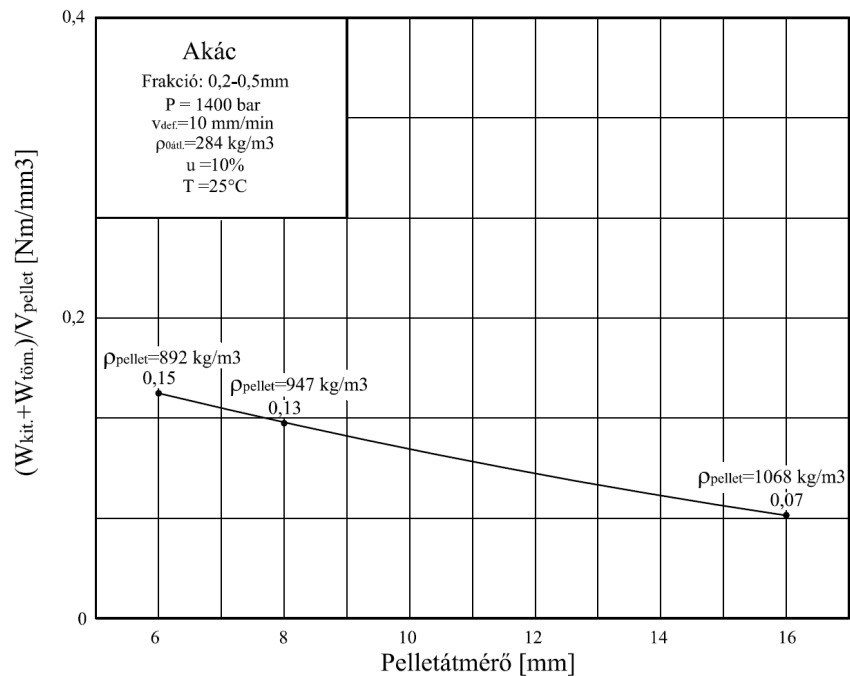


**101. ábra.** A fajlagos munka változása a pelletátmérő függvényében fenyő mintánál

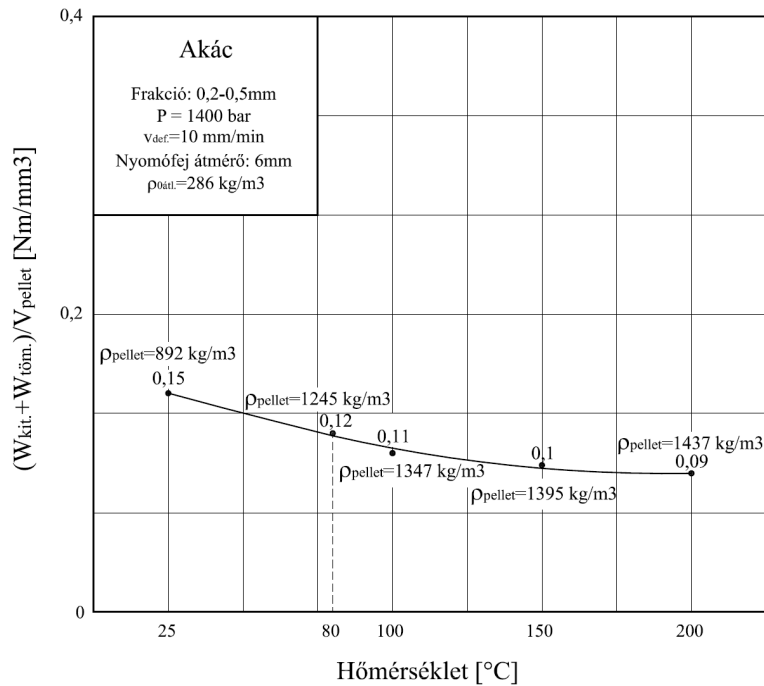


**102. ábra.** A fajlagos munka változása a hőmérséklet függvényében fenyő mintánál

Megjegyzendő, hogy az akác esetében is ugyan ilyenek a görbe lefutások, sőt még a fajlagos értékek is közel azonosak (akác estében kicsit magasabbak). Ennek oka, hogy a fenyő kisebb munkával jobban összetömríthető volt, ellentétben az akáccal, tehát az egyes tényezők különböző mértékben változtak, amiből adódtak a közel azonos értékek, melyek a 103-104. ábrán láthatóak.



**103. ábra.** A fajlagos munka változása a pelletátmérő függvényében akác mintánál



104. ábra. A fajlagos munka változása a hőmérséklet függvényében akác mintánál

A 101-104. ábrák alapján energetikai számításokat is végezhetünk. Vegyük például a  $T=25^{\circ}\text{C}$ -on kapott fajlagos munka értékeket, melyek fenyőnél és akácnál egységesen  $0,15 \text{ Nm/mm}^3$ . Ezek alapján  $1 \text{ m}^3$  pellet deformációs és súrlódási munkája  $150 \text{ MJ}$  ( $41,7 \text{ kWh}$ ). Ugyanez  $80^{\circ}\text{C}$ -on átlagosan  $115 \text{ MJ}$  ( $31,9 \text{ kWh}$ ), vagyis 23%-os energiacsökkenés tapasztalható. Fenyő és akác pelletek  $200^{\circ}\text{C}$ -on történő előállításakor átlagosan 25-30%-kal csökkenthető a préselési energia a  $80^{\circ}\text{C}$ -hoz képest 14%-os pellet sűrűség növekedés mellett. Továbbá 6 mm-es átmérő esetében az  $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűség eléréséhez  $180\text{-}198 \text{ MJ}$  ( $50\text{-}55 \text{ kWh}$ ) összmunka (tömörítési és súrlódási) szükséges  $1 \text{ m}^3$  (tömör  $\text{m}^3$ ) pellet előállítására vonatkozóan.

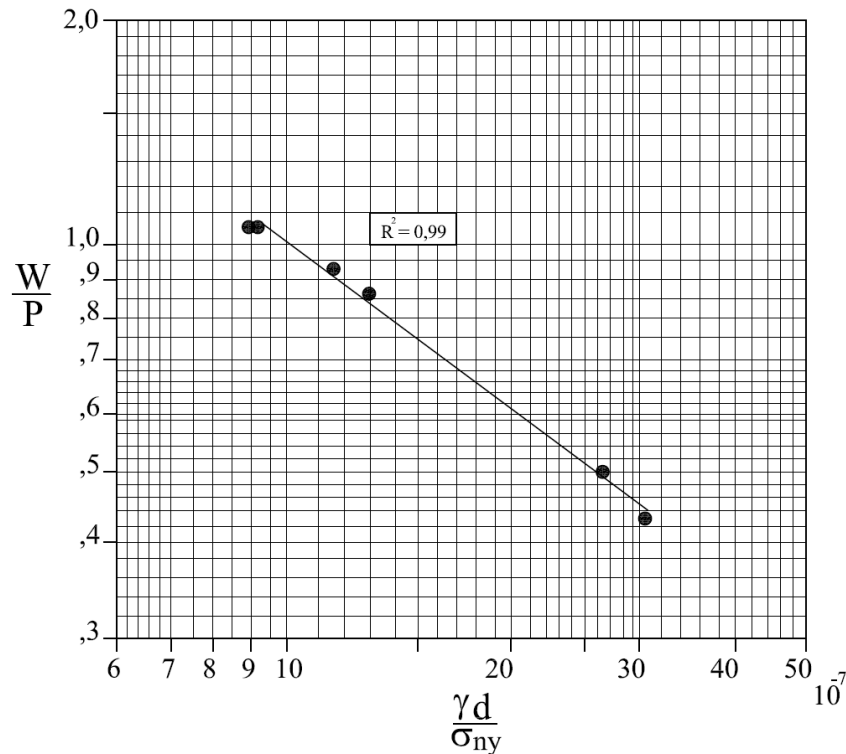
Az alapul vett nyomószilárdsági értékek fenyő esetében:  $\sigma_{\text{fenyő}}: 45\text{-}55 \text{ N/mm}^2$ ; míg akácnál:  $\sigma_{\text{akác}}: 60\text{-}65 \text{ N/mm}^2$  (MOLNÁR, 1999). A kutatási eredményeket a következő táblázatokban foglaltam össze (13-14. táblázat)

13. Táblázat. Kutatási eredmények összefoglaló táblázata 1400 bar nyomáson, 0,2-0,5mm frakcióméretnél különböző pelletátmérők mellett

Fafaj	Nyomás	Fajlagos energia W	Fajlagos energia W	W/P	Pellet térfogat súly	Pellet átmérő	$\sigma_{\text{ny}}$	$\gamma d / \sigma_{\text{ny}}$
	P				$\gamma$	d		
	$\text{N/m}^2$				$\text{Nm/m}^3$	m		
AKÁC	$1,4 \cdot 10^8$	0,15	$1,5 \cdot 10^8$	<b>1,07</b>	8920	0,006	$65 \cdot 10^6$	<b><math>8,93 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,13	$1,3 \cdot 10^8$	<b>0,93</b>	9470	0,008	$65 \cdot 10^6$	<b><math>11,65 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,07	$0,7 \cdot 10^8$	<b>0,50</b>	10680	0,016	$65 \cdot 10^6$	<b><math>26,28 \cdot 10^{-7}</math></b>
FENYŐ	$1,4 \cdot 10^8$	0,15	$1,5 \cdot 10^8$	<b>1,07</b>	8420	0,006	$55 \cdot 10^6$	<b><math>9,18 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,12	$1,2 \cdot 10^8$	<b>0,86</b>	8960	0,008	$55 \cdot 10^6$	<b><math>13,03 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,06	$0,6 \cdot 10^8$	<b>0,43</b>	10420	0,016	$55 \cdot 10^6$	<b><math>30,31 \cdot 10^{-7}</math></b>



Ha a kritérium egyenletnek (87) megfelelően a táblázatban lévő dimenzió nélküli számokat log-log koordinátarendszerben ábrázolom, akkor a kapott pontok (fenyő és akác esetében) egy egyenesre kell, hogy essenek (105. ábra). Előfordulhat, hogy a tömör faanyagra érvényes szilárdsági értéken kismértékben változtatni kell. Ennek oka, hogy a faanyagra jellemző nyomószilárdság veszt karakteréből, ha nagyon kicsik a szemcsék. Vagyis a különböző fafajú por-forgács halmazok nyomószilárdsági értékei (és vele összefüggésben a mechanikai tulajdonságok) a szemcseméret függvényében változhatnak a kiindulási faanyaghoz képest.



**105. ábra.** A pelletátmérő változásának figyelembe vétele az adott frakciótartomány mellett

A kritériumegyenlet, tehát a fentiek alapján a következő alakban adható meg:

$$\frac{W}{P} = \text{áll.} \cdot \left( \frac{\gamma \cdot d}{\sigma_{ny}} \right)^n \cdot \left( \frac{g}{g_0} \right)^m \quad (89)$$

ahol:

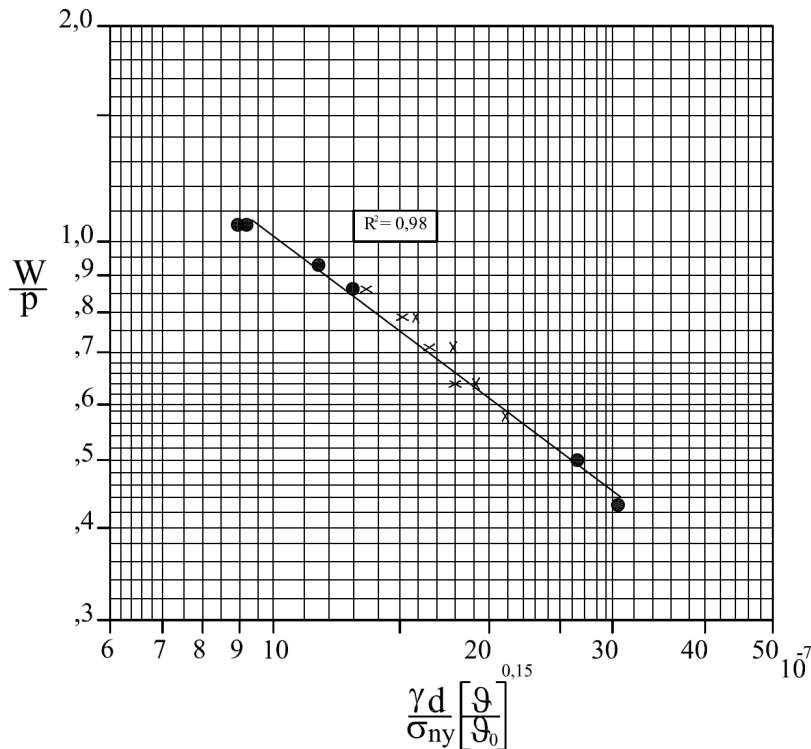
$n = -0,75$  (a 105. ábra alapján az egyenes kitevője)

$m \cong 0,15$  (a hőmérsékleti görbék kitevője)

Ahhoz, hogy a (89) egyenletet teljes mértékben igazolni tudjam az adott nyomástartományban, szükség van a hőmérséklet kompenzáló hatásának figyelembevételére is. A megfontolások alapján a különböző hőmérsékletre tartozó értékeknek a 105. ábrán látható egyenes körül kell megfelelő szórási sávon belül elhelyezkedni (106. ábra).

**14. Táblázat.** Kutatási eredmények összefoglaló táblázata 1400 bar nyomáson, 0,2-0,5mm frakcióméretnél a hőmérséklet hatásának figyelembe vételével

Fafaj	Nyomás	Fajlagos energia W	Fajlagos energia W	W/P	Pellet térfogat súly	Pellet átmérő	$\sigma_{ny}$	$(\frac{\gamma d}{\sigma_{ny}})(\frac{\vartheta}{\vartheta_0})^{0,15}$
	P				$\gamma$	d		
	N/m <sup>2</sup>	Nm/mm <sup>3</sup>	Nm/m <sup>3</sup>		N/m <sup>3</sup>	(m)		
AKÁC	1,4·10 <sup>8</sup>	0,12	1,2·10 <sup>8</sup>	<b>0,86</b>	12450	0,006	65·10 <sup>6</sup>	<b>13,67·10<sup>-7</sup></b>
	1,4·10 <sup>8</sup>	0,11	1,1·10 <sup>8</sup>	<b>0,79</b>	13470	0,006	65·10 <sup>6</sup>	<b>15,29·10<sup>-7</sup></b>
	1,4·10 <sup>8</sup>	0,10	1,0·10 <sup>8</sup>	<b>0,71</b>	13950	0,006	65·10 <sup>6</sup>	<b>16,74·10<sup>-7</sup></b>
	1,4·10 <sup>8</sup>	0,09	0,9·10 <sup>8</sup>	<b>0,64</b>	14370	0,006	65·10 <sup>6</sup>	<b>18,04·10<sup>-7</sup></b>
FENYŐ	1,4·10 <sup>8</sup>	0,11	1,1·10 <sup>8</sup>	<b>0,79</b>	12260	0,006	55·10 <sup>6</sup>	<b>15,91·10<sup>-7</sup></b>
	1,4·10 <sup>8</sup>	0,10	1,0·10 <sup>8</sup>	<b>0,71</b>	13360	0,006	55·10 <sup>6</sup>	<b>17,92·10<sup>-7</sup></b>
	1,4·10 <sup>8</sup>	0,09	0,9·10 <sup>8</sup>	<b>0,64</b>	13570	0,006	55·10 <sup>6</sup>	<b>19,24·10<sup>-7</sup></b>
	1,4·10 <sup>8</sup>	0,08	0,8·10 <sup>8</sup>	<b>0,57</b>	14050	0,006	55·10 <sup>6</sup>	<b>20,84·10<sup>-7</sup></b>



**106. ábra.** A hőmérséklet hatásának figyelembe vétele 1400 bar nyomáson

Megállapítottam a 106. ábra alapján, hogy a hőmérsékleti értékek megfelelően korrigálták a kísérleti adatokat, vagyis látható, hogy a pontok az egyenes köré rendeződtek kis szórással. A mechanikai tulajdonságok ugyanis a hőmérséklet függvényében változnak (Lsd. 8.5. fejezet). Látható, hogy a fenti nyomástartományban (1400 bar) adott szemcseméret esetén (0,2-0,5mm) jól alkalmazható az (87) egyenlet.

Alacsonyabb nyomástartományban is végeztem vizsgálatokat (1000 bar) és figyelembe vettem továbbá a különféle frakcióméretnek (0,063-1mm) fajlagos munkára gyakorolt hatását, hiszen az elmélet alapján a kapott pontoknak szintén a 106. ábrán látható egyenes köré kell rendeződni és megfelelő szóráson belül maradni. Az így kapott eredményeket a következő táblázatokban foglaltam össze (15-16. táblázat):

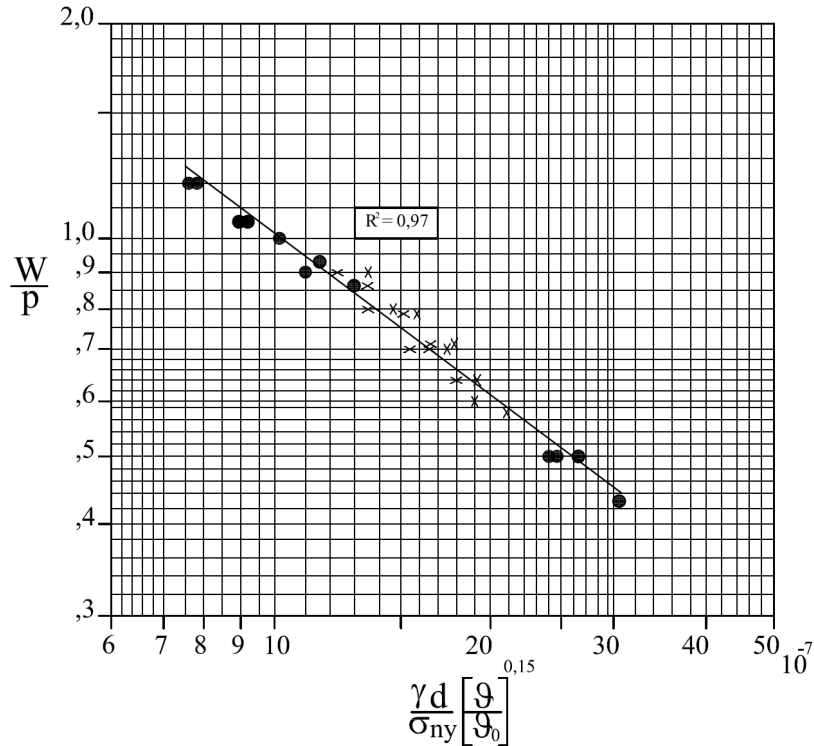
**15. táblázat.** Kutatási eredmények összefoglaló táblázata 1000 bar nyomáson, 0,2-0,5mm frakcióméretnél különböző pelletátmérők mellett

Fafaj	Nyomás	Fajlagos energia W	Fajlagos energia W	W/P	Pellet térfogat súly	Pellet átmérő	$\sigma_{ny}$	$\gamma d / \sigma_{ny}$
	P				$\gamma$	d		
	N/m <sup>2</sup>				Nm/mm <sup>3</sup>	Nm/m <sup>3</sup>		
AKÁC	1,0.10 <sup>8</sup>	0,12	1,2.10 <sup>8</sup>	<b>1,20</b>	8130	0,006	65.10 <sup>6</sup>	<b>7,50.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,10	1,0.10 <sup>8</sup>	<b>1,00</b>	8340	0,008	65.10 <sup>6</sup>	<b>10,26.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,05	0,5.10 <sup>8</sup>	<b>0,50</b>	9720	0,016	65.10 <sup>6</sup>	<b>23,92.10<sup>-7</sup></b>
FENYŐ	1,0.10 <sup>8</sup>	0,12	1,2.10 <sup>8</sup>	<b>1,20</b>	7030	0,006	55.10 <sup>6</sup>	<b>7,67.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,09	0,9.10 <sup>8</sup>	<b>0,90</b>	7500	0,008	55.10 <sup>6</sup>	<b>10,90.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,05	0,5.10 <sup>8</sup>	<b>0,50</b>	8450	0,016	55.10 <sup>6</sup>	<b>24,58.10<sup>-7</sup></b>

**16. táblázat.** Kutatási eredmények összefoglaló táblázata 1000 bar nyomáson, 0,2-0,5mm frakcióméretnél a hőmérséklet hatásának figyelembe vételével

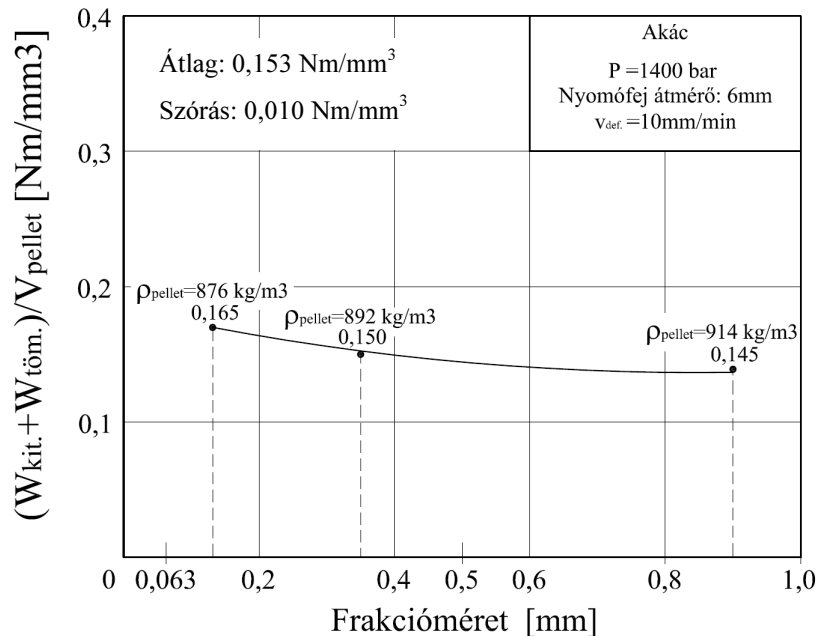
Fafaj	Nyomás	Fajlagos energia W	Fajlagos energia W	W/P	Pellet térfogat súly	Pellet átmérő	$\sigma_{ny}$	$(\frac{\gamma d}{\sigma_{ny}})(\frac{\vartheta}{\vartheta_0})^{0,15}$
	P				$\gamma$	d		
	N/m <sup>2</sup>				Nm/mm <sup>3</sup>	Nm/m <sup>3</sup>		
AKÁC	1,0.10 <sup>8</sup>	0,09	0,9.10 <sup>8</sup>	<b>0,90</b>	11200	0,006	65.10 <sup>6</sup>	<b>12,30.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,08	0,8.10 <sup>8</sup>	<b>0,80</b>	11960	0,006	65.10 <sup>6</sup>	<b>13,58.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,07	0,7.10 <sup>8</sup>	<b>0,70</b>	12870	0,006	65.10 <sup>6</sup>	<b>15,44.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,07	0,7.10 <sup>8</sup>	<b>0,70</b>	13110	0,006	65.10 <sup>6</sup>	<b>16,46.10<sup>-7</sup></b>
FENYŐ	1,0.10 <sup>8</sup>	0,09	0,9.10 <sup>8</sup>	<b>0,90</b>	10520	0,006	55.10 <sup>6</sup>	<b>13,65.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,08	0,8.10 <sup>8</sup>	<b>0,80</b>	11100	0,006	55.10 <sup>6</sup>	<b>14,89.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,07	0,7.10 <sup>8</sup>	<b>0,70</b>	12360	0,006	55.10 <sup>6</sup>	<b>17,53.10<sup>-7</sup></b>
	1,0.10 <sup>8</sup>	0,06	0,6.10 <sup>8</sup>	<b>0,60</b>	12860	0,006	55.10 <sup>6</sup>	<b>19,08.10<sup>-7</sup></b>

A 15. és a 16. táblázat adatait felhasználva ábrázoltam a pontokat a 106. ábrának megfelelően. Látható (107. ábra), hogy a kapott pontok továbbra is az egyenes körül rendeződtek és megfelelő szórási sávon belül maradtak. Az egyenes korrelációs koefficiense csak kismértékben változott ( $R^2=0,97$ ), tehát ez is igazolja, hogy a kapott pontok megfelelően illeszkedtek az egyenesre.



**107. ábra.** Az 1000 bar nyomás hatásának figyelembe vétele a hozzá tartozó korrigált hőmérsékleti értékekkel összevontan

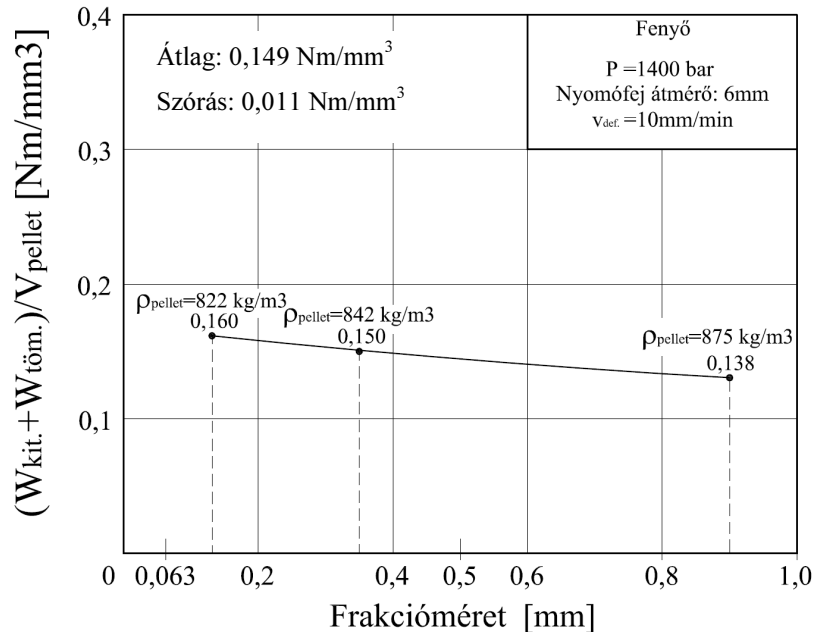
A továbbiakban vizsgáltam a szemcseméret fajlagos munkára gyakorolt hatását 1400 bar nyomáson, melyek eredményeit akác és fenyő mintákra a következő ábrákon mutatom be (108-109. ábra).



**108. ábra.** A fajlagos munka változása a szemcseméret függvényében akác mintánál

Láthatjuk, hogy a szemcseméret változása nem módosította jelentősen a fajlagos munka értékeket (Lsd. szórás). A 108. ábrán látható görbe kitevője a 0,063-1mm közötti frakcióintervallumban -0,08 körüli értékre tehető. Az utánaprítás során a leggyakrabban előforduló frakcióméreteket (0,2-1mm) figyelembe véve viszont a kitevő értéke -0,05-re

csökkent. Ebből is látszik, hogy a frakcióméret nem befolyásolta jelentősen a fajlagos munka értékeket átlagosan csupán  $\pm 5\%$ -ban a 0,2-1mm-es frakciótartományban. Ugyanez megfigyelhető volt a fenyő minta esetében is.



**109. ábra.** A fajlagos munka változása a szemcseméret függvényében fenyő mintánál

**17. táblázat.** A fajlagos munka értékek összefoglaló táblázata 1400 bar nyomáson különböző frakcióméreték mellett: 0,063-0,2mm; 0,2-0,5mm; 0,8-1mm

Fafaj	Nyomás	Fajlagos energia W	Fajlagos energia W	W/P	Pellet térfogat súly	Pellet átmérő	$\sigma_{ny}$	$\gamma d/\sigma_{ny}$
	P				$\gamma$	d		
	N/m <sup>2</sup>				N/m <sup>3</sup>	m		
<b>AKÁC</b>	$1,4 \cdot 10^8$	0,165	$1,65 \cdot 10^8$	<b>1,18</b>	8760	0,006	$65 \cdot 10^6$	<b><math>8,08 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,150	$1,5 \cdot 10^8$	<b>1,07</b>	8920	0,006	$65 \cdot 10^6$	<b><math>8,93 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,145	$1,45 \cdot 10^8$	<b>1,04</b>	9140	0,006	$65 \cdot 10^6$	<b><math>8,74 \cdot 10^{-7}</math></b>
<b>FENYŐ</b>	$1,4 \cdot 10^8$	0,160	$1,6 \cdot 10^8$	<b>1,14</b>	8220	0,006	$55 \cdot 10^6$	<b><math>8,96 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,150	$1,5 \cdot 10^8$	<b>1,07</b>	8420	0,006	$55 \cdot 10^6$	<b><math>9,18 \cdot 10^{-7}</math></b>
	$1,4 \cdot 10^8$	0,138	$1,38 \cdot 10^8$	<b>0,99</b>	8750	0,006	$55 \cdot 10^6$	<b><math>9,54 \cdot 10^{-7}</math></b>

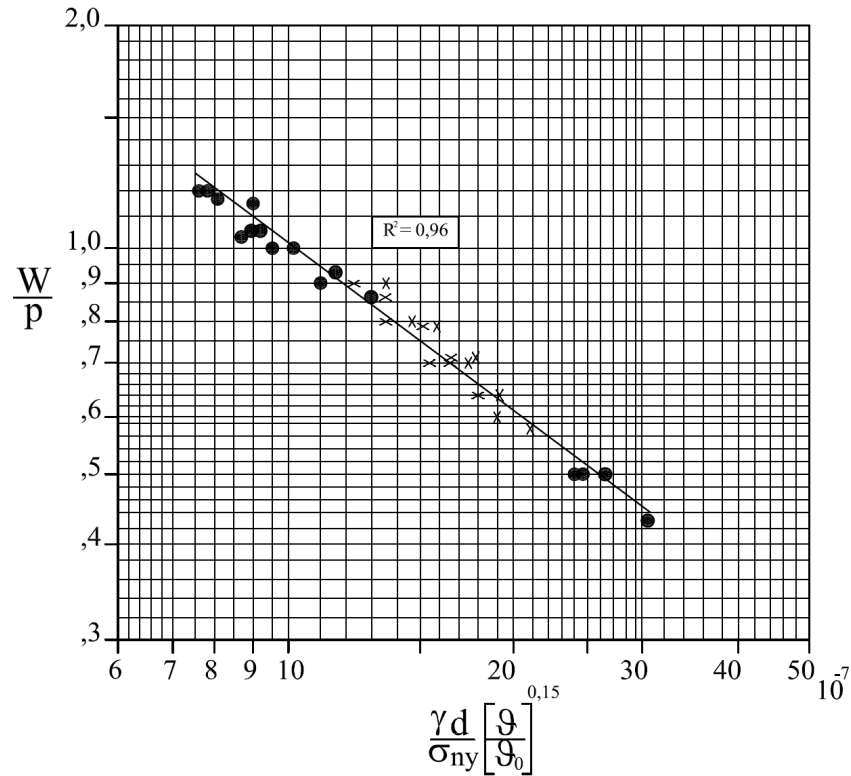
A 17. táblázat adatait felhasználva, láthatjuk, hogy a pontok továbbra is megfelelően illeszkedtek ( $R^2=0,96$ ) a kritériumegyenlet alapján felállított egyenesre (110. ábra).

Ezzel igazoltam a kritérium egyenlet helyességét és gyakorlati alkalmazhatóságát, melyet konkrétan az alábbi közelítő hatványfüggvénnyel adhatok meg:

$$\frac{W}{P} = C \cdot \left[ \frac{\gamma \cdot d}{\sigma_{ny}} \right]^{-0,75} \cdot \left[ \frac{9}{9_0} \right]^{0,15} \quad (90)$$

a változók helyettesítésével  $C$  állandó értéke  $3,12 \cdot 10^{-5}$  adódott.

$$\frac{W}{P} = 3,12 \cdot 10^{-5} \cdot \left[ \frac{\gamma \cdot d}{\sigma_{ny}} \right]^{-0,75} \cdot \left[ \frac{g}{g_0} \right]^{0,15} \quad (91)$$



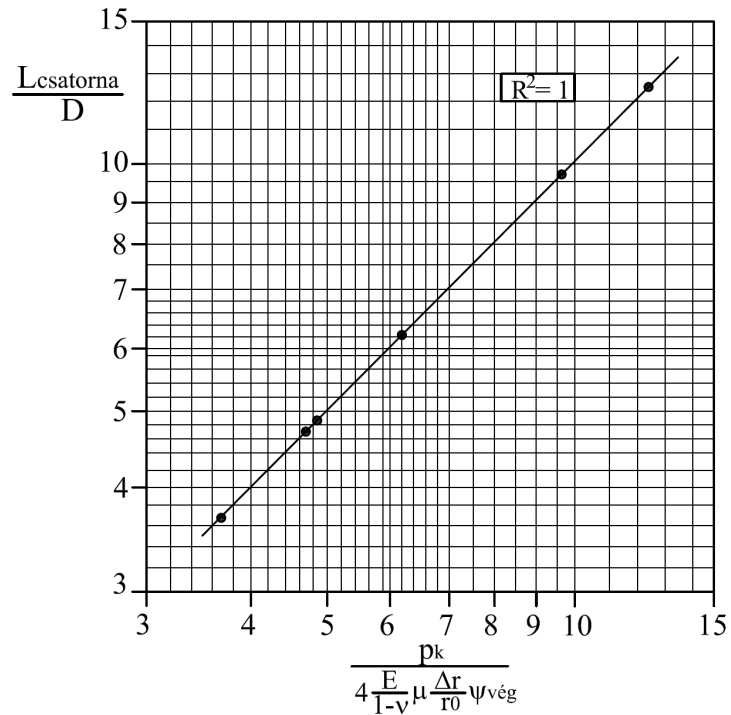
110. ábra. A frakcióméret befolyásoló hatásának figyelembe vétele

### 8.8.1. A NYOMÁSTARTÁSHOZ SZÜKSÉGES PRÉSCSATORNAHOSSZ DIMENZIÓNÉLKÜLI ÁBRÁZOLÁSA

A (85a) dimenzió nélküli összefüggés alapján az eredmények itt is általánosíthatók az alábbi módon felhasználva a 8.7.1. és a 8.7.2. fejezet mérési eredményeit.

18. táblázat. A kapott eredmények összefoglaló táblázata 1400 bar préselési nyomásnál

Fafaj	Nyomófej átmérő	Préscsatorna hossz ( $L_{csatorna}$ )	$L_{csatorna}/D$	$\frac{p_k}{4 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r}{r_0} \psi_{vég}}$
	D			
	mm	mm		
AKÁC	6	22,0	3,67	3,67
	8	38,8	4,85	4,85
	16	154,6	9,67	9,67
FENYŐ	6	28,3	4,72	4,72
	8	49,9	6,23	6,23
	16	198,8	12,42	12,42



**111. ábra.** A dimenzió nélküli mennyiségek grafikus ábrázolása

A 111. ábra alapján a görbe kitevője ( $n$ ) és itt a konstans ( $C$ ) értéke is: 1. Ennek megfelelően a kritérium egyenlet a végső formában az alábbi alakban írható fel:

$$\frac{L_{\text{csatorna}}}{D} = \frac{p_k}{4 \frac{E}{1-\nu} \mu \frac{\Delta r}{r_0} \psi_{\text{vég}}} \quad (93)$$

Vagyis az  $L/D$  viszony az fent látható hatványfüggvénnyel közelíthető.

*„Azok az emberek, akik nem tartják fenn a fákat, hamarosan olyan világban fognak élni, ami nem tudja fenntartani az embereket.” /Bryce Nelson/*

## 9. ÖSSZEFOGLALÁS

A Dolgozat a kitűzött célokat elérte és bemutatta azokat a főbb kutatási eredményeket, melyek segítségével pontosabb képet kaphattunk a faalapú por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörödési folyamatiról. Meghatározásra kerültek azok a főbb befolyásoló tényezők (fafaj, pellet átmérő, préselési sebesség, présnyomás, szemcseméret, nedvességtartalom, deformáción tartási idő, préselési hőmérséklet), melyek nagyban befolyásolják a pellet sűrűségét. A különböző szemcseátmérőjű és szemcsekeménységű halmazok kompresszió görbéi rámutattak a külső és belső pórusok szerepére a tömörítés során, vagyis a szemcsekeménység növekedése először a külső pórusok csökkenését teszi lehetővé és csak adott nyomásnál (~250 bar) lép be a szemcse belső pórusainak csökkenése. A szemcseméret csökkenésével a pellet sűrűség csökkent, a relatív maradó deformáció pedig nőtt. Minél kisebb a szemcse szilárdsága (fenyő) annál jobban összetömöríthető a faanyag halmaz adott nyomáson, de ugyanakkor a tömörítési folyamat végén kisebb maradó deformáció jellemezte a faanyag halmazt, ezért a pellet sűrűségek is kisebbre adódtak a nagyobb szilárdságú fafajból (akác) készült pelletekhez képest. Megfigyelésre került, hogy az alacsony nyomástartományban (500 bar alatt) a por-forgács halmazok terhelés hatására bekövetkező mechanikai viselkedése ellentétes a magasabb nyomástartományban kapott tendenciákhoz képest, vagyis a faalapú por-forgács halmazok tömörödésének mechanikájában anomáliák figyelhetők meg a préselési nyomás csökkenése hatására, melyek magyarázata a szemcsék különböző keménységével és a külső és belső pórusok arányaival, az ún. póruselmélettel lett megadva. A terhelési (tömörítési) sebesség is befolyásolja a pellet sűrűségét. Ha túl gyors (60 mm/min) a sebesség, akkor kisebbre adódtak a pellet sűrűségi értékek a lassúbb (2 mm/min) tömörítési sebességhez képest. Ennek oka, hogy túl gyors sebesség esetén a faanyag halmazban lévő deformációs folyamatok nem tudnak kellő képen lezajlani, vagyis a deformáció változás nem tudja követni a sebességváltozást a faanyag viskoelasztikus tulajdonsága miatt. Alacsonyabb sebességnél a faanyag halmaznak több ideje van a deformációra, kúszásra. Megállapításra került, hogy a vizsgált frakcióintervallumban (0,063-1mm) a szemcseméret változása nem befolyásolta jelentősen a pellet sűrűségi értékeket, így az eltérések átlagosan a leggyakoribb frakcióméret (0,2-0,5mm) körül mindhárom fafaj esetében a  $\pm 5\%$ -os szórási sávon belül maradtak. A keményebb és nagyobb szilárdságú szemcse (akác) jobban ellenállt a nyomásnak, ezért a tömörítés során kisebb fajlagos alakváltozást ( $\varepsilon$ ) szenvedett. A kisebb fajlagos alakváltozás miatt csökkent a faanyag halmazba bevitt deformációs feszültség nagysága, aminek következtében kisebb lett a pellet relatív visszarugózása a fenyőhöz képest. Minél kisebb a szemcseméret, annál kisebb mértékben rugózott vissza a pellet, tehát annál nagyobb lett a maradó deformáció. A gyakorlatban az elvárt minőségi követelményeknek megfelelő  $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$  sűrűségű pelletet a kutatások alapján minimum  $\varepsilon_m = 0,8$ -as relatív maradó deformáció mellett érhető el, amihez tömörítéskor  $\varepsilon = 0,8-0,85$  fajlagos alakváltozás szükséges. Azonos sűrűségi értéket a fenyő nagyobb nyomással érte el, mint az akác. Ezzel igazolódott a gyakorlatban alkalmazott eltérő matricaszélességek létjogosultsága.

Az alapanyag nedvességtartalmának növekedésével a faanyag plasztikus és deformációs képessége növekedett, vagyis adott pellet sűrűség kisebb nyomással érhető el egy meghatározott alapanyag nedvességi határértékig. Nyomás hatására egyrészt a szemcsék felülete deformálódik (érintkező felület változik) másrészt a farészekből nedvesség távozik, melyek csökkentik a cső fala és a halmaz közti súrlódási tényező értékét. A



nedvességtartalom növekedésével  $12\% < u < 20\%$  közötti nedvességtartományban a pellet mechanikai tartóssága (növekvő nedvességtartalom mellett a fűtőértéke is) gyengült, de a sűrűsége átlagosan 7%-kal nőtt. A 20% os alapanyag nedvességtartalom felett a vizsgált frakcióintervallumban (0,2-1mm) a pellet sűrűségi értékek csökkentek és sok esetben a pellet szétesett. Az alapanyagot a gyakorlatban, tehát mindenképpen 20%-os nedvességtartalom alá célszerű szárítani. A faanyag, mint komplex makromolekulás rendszer, hő hatására rendkívül bonyolult, összetett kémiai és fizikai-kémiai változásokon megy keresztül. A hőmérséklet növekedésével a pellet sűrűségi értékek növekedtek a faanyagalmaz kedvező thermoplasztikus és deformációs képessége-, és a vele összefüggő por-forgács halmazok pórusrendszerében bekövetkező mechanikai változások miatt. A hőmérséklet növekedésével a pellet sűrűségi értékek növekedtek, a relatív kirugózás csökkent a relatív maradó deformáció pedig nőtt. Fenyő és akác pelletek sűrűsénövekedése a 80°C-200°C-os hőmérsékleti tartományban 15%-ra adódott a vizsgálati szemcseméret tartományon belül (0,2-1mm). A gyakorlatban a pelletálás 80-90°C hőmérsékleten megy végbe. Ilyen hőmérsékletnél 900-1000 bar préselési nyomás is elegendő a követelményeknek megfelelő pellet ( $1100 \text{ kg/m}^3$ ) elkészítéséhez. 200°C-os préselési hőmérsékleten ugyanez a pellet sűrűség akár 700-800 bar préselési nyomás mellett is előállítható, vagyis közel 20-30%-os préselési energiafelhasználás csökkenést érhetünk el ilyen hőmérsékleten. A 200°C-on készített pellet mechanikailag tartósabb, kisebb végnedvességű és nagyobb sűrűségű lett, azaz energiasűrűsége megnövekedett a hagyományos gyártástechnológiával készített pellethez képest (részleges torrifikáció). A 200°C-on elkészített pellet felületén kialakult elszenesedett réteg irodalmak alapján hidrofób tulajdonsággal ruházta fel. Mivel a 200°C hőmérsékletre való matricafelfűtés jelentős energia befektetéssel jár, ezét a gazdasági döntéseknél mindenképpen figyelembe kell venni.

A por-forgács halmazok relaxációs és kúszási vizsgálatai során meghatározásra kerültek a legfontosabb befolyásoló tényezők, melyek jelentős hatással voltak a relaxációs és kúszási folyamatokra, ilyenek: a fafaj, a szemcseméret, a préselési nyomás, a kezdeti halmazsűrűség és a hőmérséklet. A relaxáció és a kúszás összefügg a faanyagalmaz tömör sűrűségével (tömörödés mértékével), és a tömörítéskor bevitt deformációs feszültség nagyságával, ezért minél nagyobb a tömörödés mértéke és vele együtt a deformációs feszültség, annál kisebb mértékben relaxál és kúszik a faanyagalmaz.

A relatív falsúrlódás is jelentősen befolyásolta a pellet sűrűséget. A tömörítő csatorna átmérőjének növelésével a pellet sűrűség növekedett, vagyis az átmérő növekedésével arányosan csökkent a relatív falsúrlódás hatása és ezáltal a nyomás gradiense is a pellet hossza mentén (6 mm-es átmérőnél 7 szerez falhatás jött létre a 16mm-es átmérőhöz képest). Azonos nyomófej átmérő esetén egy adott pellet sűrűség eléréséhez fenyőnél ~30 százalékkal nagyobb nyomás szükséges az akáchoz képest. Nagyobb nyomófej átmérőnél (16 mm) 25-30 százalékkal kisebb nyomás és durvább frakció (1-2,5 mm) is elegendő a kisebb nyomófejhez (6 mm) képest a kívánt pellet sűrűség ( $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$ ) elérése érdekében. A relatív falsúrlódással összefüggő kutatások során bevezetésre került az ún. relatív felületcsökkentési tényező ( $\psi_{\text{vég}}$ ), mely segítségével, valamint mérésekkel bizonyos elméleti megfontolások alapján közelítőleg meghatározásra került a kitolási erő változása a pellet hossz függvényében. A kitolási erő közelítő elméleti összefüggését felhasználva, valamint a kitolási erő értékek ismeretében meghatározásra került a nyomástartáshoz szükséges préscsatornahossz, mely megtartja a tömörítési nyomást különböző pelletátmérők mellett. A kapott egyenlet dimenzió nélküli (általános érvényű) alakban is megadásra került.

A dolgozat a por-forgács halmazok rheológiáján túlmenően energetikai oldalról is végzett kutatásokat, melyek eredményei alapján 6 mm-es nyomófej átmérőnél egy  $1000-1100 \text{ kg/m}^3$  pellet sűrűség eléréséhez, mintegy 180-198 MJ (50-55 kWh) összmunka (tömörítési és súrlódási) szükséges  $1 \text{ m}^3$  (tömör  $\text{m}^3$ ) pellet előállítására vonatkozóan.

Az energiafelhasználással összefüggő további kutatások során a dimenzióanalízis módszerének alkalmazásával kidolgozásra került egy olyan dimenzió nélküli kritériumegyenlet a pelletálási energiaszükséglet számítására, mely univerzálisan (fafajtól függetlenül) jellemzi a faanyagok nyomás-sűrűség változását a tömörítési munka és a prëshőmérséklet függvényében különböző pelletátmérők mellett. Megállapításra került, hogy az utánaprítás során figyelembe vett leggyakoribb frakciónál (0,2-1mm) 1400 bar nyomáson történő tömörítés hatására a kapott fajlagos munkaváltozást jellemző görbék lapos lefutásúak (így azok kitevő értéke -0,05 körülire tehető), vagyis nem változik szignifikánsan a fajlagos munkaérték a szemcseméret függvényében. Az elméleti megfontolások alapján létrehozott kritérium egyenlet hitelessége és alkalmazhatósága a mérési eredményekkel igazolásra kerültek. A kapott eredmények mind az elmélet mind pedig a gyakorlat számára hasznosíthatók a mérnöki pontosság határain belül.

## 10. TÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA

A részletes elméleti és kísérleti vizsgálatok alapján az alábbi tudományos megállapításokat tettem:

1. Meghatároztam a tömörítés törvényszerűségeiben mutatkozó különbségeket különböző szemcsekeménységű por-forgács halmazokra beleértve a tömörítési végsűrűséget (pellet sűrűséget), a kirugózást, a maradó deformációt, az energiafelvételt és annak komponenseit, a szemcseméret, a tömörítési nyomás, a tömörítési sebesség, a nedvességtartalom, a deformáción tartási idő, a hőmérséklet és a pelletátmérő függvényében. Az eltérések elméleti magyarázatát is megadtam.
2. A pellet állékonyságának (sűrűségi követelményeinek) figyelembe vételével megadtam a minimális nyomást és energiaszükségletet a fafaj, a szemcseméret, a pelletátmérő és a hőmérséklet függvényében.
3. A relatív falsúrlódással kapcsolatos kutatásaimban a pellet kitolás utáni átmérő növekedéséből, valamint a maximális kitolási erő értékek ismeretében bizonyos elméleti megfontolások alapján megadtam a kitolási erő közelítő mechanikai számítási modelljét, mely segítségével meghatározhatóvá vált a tömörítés során létrejött deformáció modulus rugalmas komponense, amely a falsúrlódást okozza a pellet kitolásakor. Az adatokat általánosítottam (dimenzió nélküli alakban is), amelyekből egy adott pelletátmérőhöz tartozó kritikus csatornahossz is meghatározható, amely az ellenhatást biztosítja tetszőleges végnyomás és pelletátmérő esetén.
4. Dimenzióanalízis alkalmazásával hasonlósági egyenletet nyertem az energiaszükséglet számítására tetszőleges bemenő paraméterek mellett, a fafajtól függetlenül.

## 11. IRODALOMJEGYZÉK

1. BABOS, K.; FILLÓ, Z.; SOMKUTI, E. (1979): Haszonfák, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
2. BERG, G.; P. GRAU. (1989): The viscosity of viscoelastic solids based on a three-parameter model, *J. Am. Ceram.*
3. BIOT, M.A. (1954): Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena. *J. Appl. Phys.* Vol. 25, No. 11, pp. 1385-1391.
4. BURJÁN, E. (2009): „A Pelletgyártás helyzete és fejlődési irányai”. InnoLignum konferencia, Sopron, 2009.09.04.
5. BURJÁN, Z. (2009): Faalapú pelletgyártás alapanyagai, gyakorlati tapasztalatok. InnoLignum Erdészeti és Faipari Szakvásár és Rendezvénysorozat, Sopron.
6. BOURGOIS, J.; BARTHOLIN, M. C.; GUYONNET, R. (1989): Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product. *Wood Sci. Technol.* 23. pp. 303-310.
7. BUSSE, W. (1964): Die Theorie auf dem Gebiete des Verdichtens landwirtschaftlicher Halmgüter. *Landtechnische Forschung*, No. 1.
8. CARLOS, S. et al. (2010): Compression rheology and physical quality of wood pellets pre-handled with four different conditions. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, Norwegian, pp. 87-93.
9. CREUS, G.J. (1985): Viscoelasticity-Basic theory and applications to concrete structures in *Lecture notes in engineering*, ed., Brebbia, C.A. and S.A. Orszag, vol. 16 New York: Springer-Verlag, pp.18-42.
10. CSANÁDY, E.; MAGOSS, E. (2013): *Mechanics of Wood Machining*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013. DOI 10.1007/978-3-642-29955-1. pp. 25-30.
11. DOLGOV, I. (1970): Zakonomernosztji szszatija szeno-szolomisztjih matyeri ralov. *Mechanizacija elektr. szelszk. hozj.*
12. FINDLEY, W.N.; LAI-K, J.; S. ONARAN (1976): Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. *North Holland Publ. Comp., Amsterdam.*
13. FINDLEY, W. N., J. S. LAI, AND K. ONARAN, (1989): *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials with an Introduction to Linear Viscoelasticity*. Dover Publication, Inc., Mineola, New York.
14. FODOR, T. (1994): A faanyag viszkoelasztikus tulajdonsága. In: *A faipari műveletek elmélete*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
15. HEIKO, T. et al. (2005): Modeling the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites. Part II. Rheology. Published online: 28 September 2005. Springer-Verlag.
16. HORVÁTH, A. (2013): „Merre halad tovább a magyar megújuló energetika” előadás. Agripellet konferencia. Bükk, 2013.10.04.
17. HOFKO, B. (2006): Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten; Betreuer/in(nen): R. Blab, K. Kappl; Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung; Abschlussprüfung: 24.11.2006. pp. 145-268.
18. HOFKO, B. (2008): Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten.
19. JANCSÓ, I. (2013): „Üzlet-e a pellet Magyarországon?” Agripellet konferencia. Bükk, 2013.10.04.
20. KOLLMANN F. (1951): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, Erster Band. Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg-JF. Bergmann-München, 391.
21. KOLLMANN F. (1959): Über die Sorption von Holz und ihre exakte Bestimmung. *HRW* (17) 5, 165-170.

22. KORKUT, D.; AKGÜ, M.; DÜNDAR, T. (2008): The effects of heat treatment on some technological properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Bioresource Technology*, 99, pp. 1861-1868.
23. MATTHIES, H. (1963): Entwicklung und Forschung auf dem Gebiete des Verdichtens von Halmgut. *Landtechnische Forschung*, No. 6.
24. MEVES, E. (1959): Verdichtungsgesetzmässigkeiten nach Presstopfversuchen. *Landtechnische Forschung*, No. 3.
25. MOLNÁR, S. (1999): Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
26. MOHSENIN, N.; ZASKE, J. (1975): Effect of Stress Relaxation on Wafer Density and Durability and Energy Requirement on Compaction of Unconsolidated Materials. *Proceedings of a Workshop at the Pennsylvania State University*
27. MÓZES, GY.; VÁMOS, E. (1968): Reológia és reometria. Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
28. NÉMETH, K. (1997): Faanyagkémia, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
29. NÉMETH, K. (1998): A faanyag degradációja. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
30. NILSSON, - HOPMAN, - ISACSSON (2002): Influence of Different rheological Models on Predicted Pavement responses in Flexible Pavement. *Road Materials and Pavement Design*. Volume 3 – No 2/2002.
31. NIELSEN, N.P.K.; D. GARDNER, J.; C. FELBY. (2010): Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. *Fuel*, 89: p. 94-98.
32. PINTO, J.F.; F. PODCZECK, F.; J.M NEWTON. (1997): Investigations of tablets prepared from pellets produced by extrusion and spheronisation. II. Modelling the properties of the tablets produced using regression analysis, *International Journal of Pharmaceutics*, pp.7- 16.
33. PRONK, C. (2005): The Huet–Sayegh Model; a Simple and Excellent rheological Modell for Master Curve of Asphaltic Mixes. *Geotechnical Special Publication No. 146. Asphalt Concrete*.
34. R.C. AKDENIZ; S. HAGHIGHAT. (2013): The effect of die dimensions, raw material moisture content and particle size on pelletizing characteristics of olive cake. Department of Agricultural Machinery, *International Conferences Engineering, Agriculture, Waste Management and Green Industry Innovation*. Gödöllő, Hungary, 13-19. october.
35. RADOK, J.R.M. (1957): Viscoelastic stress analysis, *Quart. Appl. Math*, 15.
36. ROLLER, B. (1980): Viszkoelasztikus anyagú rúdszerkezetek állapotváltozási vizsgálata. Akadémiai doktori értekezés, Budapest.
37. RÓNAI, F. (1980): A kúszás előrejelzése alakváltozási felülettel tartós hajlításra igénybevett fatartóknál. *Erdészeti és Faipari Tudományos közlemények*, 1.sz. Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron.
38. SACHT, H. (1957): Über den Verdichtungs Vorgang bei landwirtschaftlichen Halmgütern. *Grundlagen der Landtechnik*, No. 2.
39. SACHT, H. (1967): Über den Verdichtungs Vorgang bei landwirtschaftlichen Halmgütern und die dabei auftretende Wandreibung. *Grundl. Landtechn.* Bd. 17 (1967) Nr. 2. DK 621-5: 631.358.44: 631.362: 633.004.12. pp. 47-52.
40. SCHWANGHART, H. (1969): Messung und Berechnung von Druckverhältnissen und Durchsatz in einer Ringkoller-Strangpresse. *Aufbereitungs-Technik*, No. 12.
41. SITKEI, GY. (1981): A mezőgazdasági anyagok mechanikája. Akadémiai Kiadó, Budapest.
42. SITKEI, GY. (1986): *Mechanics of Agricultural Materials*. Elsevier, Amsterdam-New York.

43. SITKEI, GY. (1992): Plasztikus deformáció leírása mezőgazdasági anyagok préselésekor. OTKA támogatással végzett kutatási részjelentés, Sopron.
44. SITKEI, GY. (1993): Non-Linear Rheological Method for describing Compaction Processes. Paper No. 93-1170, ICPPAM Conference, Bonn.
45. SITKEI, GY. (1994): A faipari műveletek elmélete. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
46. SITKEI, GY. (1998): Plasztikus deformáció leírása mezőgazdasági anyagok préselésekor. OTKA támogatással végzett kutatási részjelentés, Sopron.
47. SITKEI, GY. (2000): Plasztikus deformáció leírása mezőgazdasági anyagok préselésekor. OTKA támogatással végzett kutatási zárójelentés, Sopron.
48. SITKEI, GY. (2013): Hasonlósági törvények alkalmazása a műszaki tudományokban. Előadások az Akadémián kiadvány, Sopron.
49. TIMOSHENKO, S.; WOINOWSKY-KRIEGER, S. (1966): Lemezek és héjak elmélete. Műszaki könyvkiadó, Budapest.
50. TÓTH, S. (2000): Reológia, reometria. Veszprémi Egyetemi kiadó.
51. VARGA, M. (1983): Por-forgács halmazok mechanikai tulajdonságai, különös tekintettel a tartályból való kifolyásra. Doktori értekezés. Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron.
52. VARGA, M. (1993): Fapor és forgács-halmazok mechanikai tulajdonságainak vizsgálata. Kandidátusi értekezés, Sopron.
53. WOLFGANG, S.; JONAS, D.; NIELS, P.; HANS, O. (2012): Densification concepts for torrefied biomass. Torrefaction workshop. European Biomass Conference, Milano.

#### **EGYÉB FELHASZNÁLT IRODALMAK**

1. Magyarország megújuló energia hasznosítási cselekvési terve 2010-2020. (Kiadvány: Nemzeti Fejlesztési Minisztérium; 2011.01.07.)
2. Megújuló energiák hasznosítása. MTA Budapest, 2010.

#### **INTERNETES HIVATKOZÁSOK**

1. [http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Plast\\_graph.PNG](http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Plast_graph.PNG)  
Szerző: Dr. Zana János, forrás: my own drawing, 2009. május 11.
2. [www.mapellet.hu](http://www.mapellet.hu). Megtekintés: 2013.10.27.

## 12. A DOLGOZAT TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

### *Idegen nyelvű lektorált tudományos folyóiratban megjelent szakkikkek, előadások*

1. Kocsis, Z.; Csanády, E. (2014): *Study of the energy requirements of wood chip compaction. DRVNA INDUSTRIJA 65.: Lektorált idegen nyelvű tudományos folyóirat, ISSN 0012-6772, impakt faktor: 0.146 (Megjelenés alatt!)*

### *Idegen nyelvű konferencia kiadványban megjelent szakkikkek, előadások*

1. Kocsis, Z.; Csanády, E. (2014): Mechanics of chip compaction. The 9<sup>th</sup> International Science Conference. Chip and Chipless Woodworking Processes. Proceedings of Papers. Technical University in Zvolen, September 11-13, 2014. pp. 83-89. ISBN: 978-80-228-2658-7 angol nyelvű előadás és konferencia kiadvány.
2. Kocsis, Z.; Varga M. (2013): Application of a Non-linear Rheological Method for the Compaction of Wood-based Materials. 21st International Wood Machining Seminar (IWMS-21) Tsukuba, Japán, 2013.08.04-2013.08.07. Wood Research Society, pp. 315-322. ISBN: 978-4-9903467-9-9
3. Varga, M.; Kocsis, Z.; Németh, G.; Bakki-Nagy Imre, S. (2012): The rationalization possibility of energy consumption in Hungarian wood factories. Tagungsband des 15. Holztechnologischen Kolloquiums Dresden, pp. 217-228. ISBN: 978-3-86780-266-6
4. Németh, G.; Kocsis, Z.; Varga, M. (2012): Energy Balanace of Pelleting of Wood Based By-product. TRIESKOVÉ A BEZTRIESKOVÉ OBRÁBANIE DREVA. Technical University Zvolen, pp. 247-253. ISBN: 978-80-228-2385-2
5. Varga, M.; Németh, G.; Kocsis, Z.; Bakki-Nagy Imre, S. (2011): Energy Consumption Structure of the Hungarian Wood Industry. 20th International Wood Machining Seminar. Skeleftea, pp. 267-274. ISBN: 978-91-7439-264-7
6. Németh, G.; Kocsis, Z.; Varga, M. (2012): Energy Demand of Briquetting and Pelleting of Wood Based By-product. The Impact of Urbanization, Industrial and Agricultural Technologies on the Natural Environment. International Scientific Conference on Sustainable Development and Ecological Footprint. Nemzeti Tankönyvkiadó, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, pp. 393-400. ISBN: 978-963-19-7352-5

### *Magyar nyelvű lektorált tudományos folyóiratban megjelent szakkikkek*

1. Kocsis, Z.; Csanády, E. (2014): A nem-lineáris rheológia alkalmazása a faalapú anyagok pelletálásával, tömörítésével összefüggésben. II. kísérleti rész. FAIPAR - A faipar tudományos folyóirata, [S.l.], v. 62, n. 2, oct. 2014. ISSN 2064-9231. Elérhető: <<http://www.woodscience.hu/Woodscience/article/view/12>>.doi:[http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN\\_2014\\_12](http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN_2014_12). pp.8-17.

2. Kocsis, Z.; Csanády, E. (2014): A nem-lineáris rheológia alkalmazása a faalapú anyagok pelletálásával, tömörítésével összefüggésben I. kísérleti rész. FAIPAR - A faipar tudományos folyóirata, [S.l.], v. 62, may. 2014. ISSN 2064-9231. Elérhető: <<http://www.woodscience.hu/Woodscience/article/view/1/4>>.doi:[http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN\\_2014\\_1](http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN_2014_1). pp.1-8.
3. Kocsis, Z.; Borsos, G. (2013): Biomassza alapú kapcsolt energia előállításának lehetőségei faipari üzemeknél. FAIPAR, 61:(1) pp. 20-28. HU-ISSN: 0014-6897
4. Varga, M.; Németh, G.; Kocsis, Z.; Bakki-Nagy Imre, S. (2010): A magyar fafeldolgozás energiaszerkezetének vizsgálata és energiafelhasználási összefüggései. FAIPAR, 58:(3-4) pp. 12-18. HU-ISSN: 0014-6897

#### *Magyar nyelvű könyvrészlet*

1. Varga, M.; Kocsis, Z.; Németh, G. (2011): A fatermékek gyártási energiaszükséglete. Örök társunk a fa. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 35-37. ISBN: 978-963-334-009-7

#### *Magyar nyelvű konferencia kiadványban megjelent szakcikk*

1. Kocsis, Z.; Varga, M.; Németh, G. (2013): A dendromassza alapú pelletálás energiaszükségletének csökkentésére irányuló kutatások. Dendromassza alapú energiaforrások című konferencia kiadvány, Sopron, pp. 25-29. ISBN: 978-963-359-021-8
2. Kocsis, Z.; Borsos, G. (2012): Biomassza alapú kapcsolt energia előállításának lehetőségei faipari üzemeknél. Hallgatói tudományos konferencia. Tanulmánykötet a "Talentum program" hallgatói kutatásainak eredményeiről, előadásanyagairól. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 36-42. ISBN: 978-963-9883-96-3

#### **EGYÉB PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG**

Megtekinthető az MTMT adatbázisban az alábbi linken:

<https://vm.mtmt.hu/search/slist.php?lang=0&AuthorID=10023240>

### 13. A KUTATÁS TÉMÁJÁVAL ÖSSZEFÜGGŐ PUBLIKÁCIÓKRA TÖRTÉNŐ FÜGGETLEN HIVATKOZÁSOK

1. RICHTER, Z.; VITYI, A.; MAGOSS, E. (2014): *Közönséges nád (Phragmites australis) pelletálási technológiájának vizsgálata – I. rész, FAIPAR 62. évf. (2014), ISSN: 0014-6897 (Megjelenés alatt!)*
2. Németh, G. (2014): Kis teljesítményű faalapú pellet tüzelő berendezés környezeti hatásainak vizsgálata I.. FAIPAR - A faipar tudományos folyóirata, [S.l.], v. 62, n. 2, oct. 2014. ISSN 2064-9231.  
Elérhető:<<http://www.woodscience.hu/Woodscience/article/view/14>>.  
doi:[http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN\\_2014\\_14](http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN_2014_14).
3. Novák, D. (2014): A faalapú por-forgács halmazok tömörödési folyamatának vizsgálata különös tekintettel a pelletgyártásra c. szakdolgozat. Sopron, 2014.
4. Csitári, Cs.; Németh, G. (2013): Parabolikus napkollektor alkalmazhatóságának lehetőségei technológiai hő előállítására a faiparban, FAIPAR 61. évf. 2013/ 1. szám, pp. 10-15. HU-ISSN: 0014-6897
5. Varga, M.; Németh, G.; Csitári, Cs.; Kovács, P. (2013): Potential applicability of the parabolic solar collector technology to produce heat in the wood industry; The 21st International Wood Machining Seminar (IWMS-21), to be held August 4-7, 2013 in Tsukuba, Japan. pp. 140-146; ISBN 978-4-9903467-9-9
6. Csitári, Cs.; Németh, G. (2012): „Parabolikus napkollektor alkalmazhatóságának lehetőségei technológiai hő előállítására a faiparban” Hallgatói tudományos konferencia. Tanulmánykötet a "Talentum program" hallgatói kutatásainak eredményeiről, előadásanyagairól. Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, Sopron, pp. 31-35. ISBN: 978-963-9883-96-3.

### 14. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

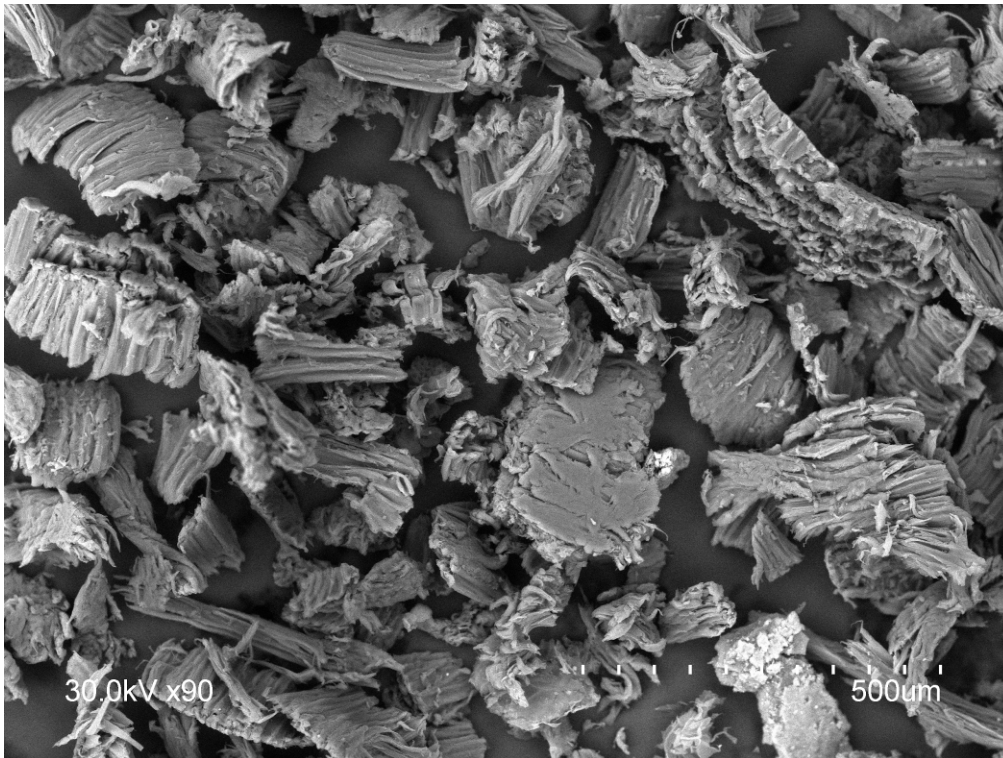
Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Prof. Dr. Varga Mihálynak a segítőkész szakmai tanácsaiért és Prof. Dr. Csanády Etelének a segítőkész szakmai tanácsai mellett a külföldi publikációimmal kapcsolatos segítségnyújtásáért. Külön köszönettel tartozom Prof. Dr. Sitkei György akadémikus Úrnak a dolgozatom szakmai részeinek véleményezéséért, valamint a kutatási eredményeim alapján felállított elméletek kidolgozásában nyújtott nélkülözhetetlen segítségéért. Köszönöm továbbá Bakki-Nagy Imre Sándor villamosmérnök kollégámnak, a hőmérsékletmérő és szabályozó rendszer tervezésében és kivitelezésében nyújtott segítségét. Nem feledkezhetek meg természetesen közvetlen kollégáimról sem, a Gépészeti és Mechatronikai Intézet dolgozóiról, akik segítségükkel lehetővé tették számomra, hogy az oktatási időben is el tudjam végezni a méréseimet. Köszönöm továbbá családomnak, hogy kitartóan támogattak a dolgozat megírása alatt.



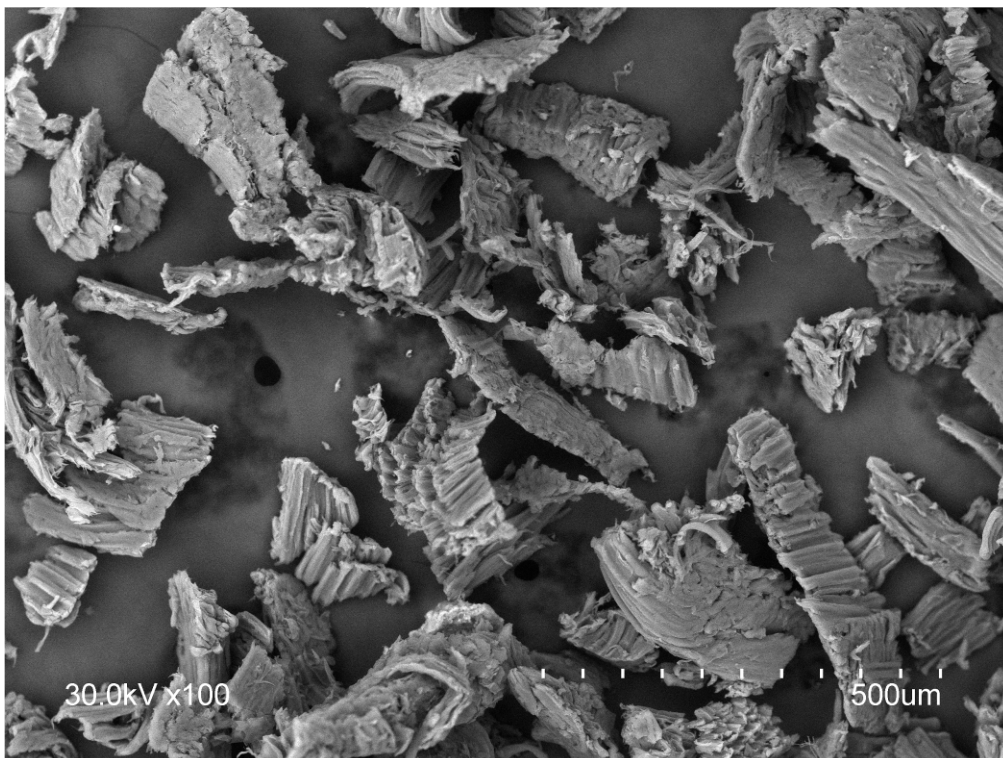
## **15. FÜGGELÉK**

### **15.1. MÉRÉSEI PARAMÉTERTÁBLÁZAT**

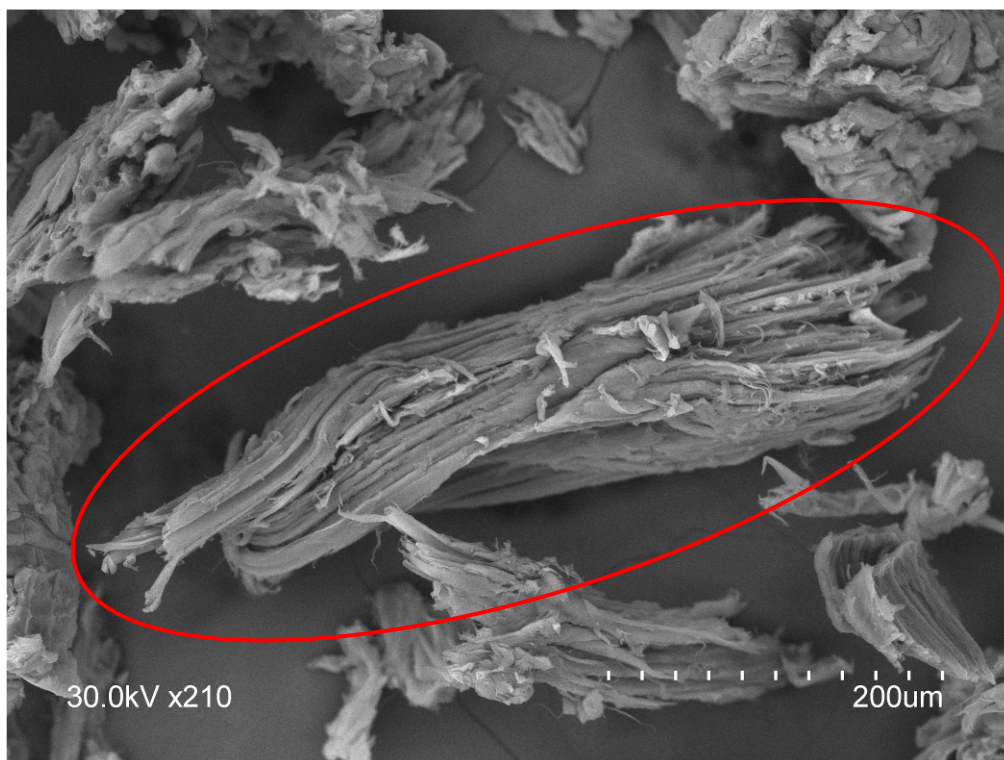
## 15.2. FENYŐ ÉS AKÁC SZEMCSÉK ALAKI MEGHATÁROZÁSA ELEKTRONMIKROSKÓPOS FELVÉTEL SEGÍTSÉGÉVEL



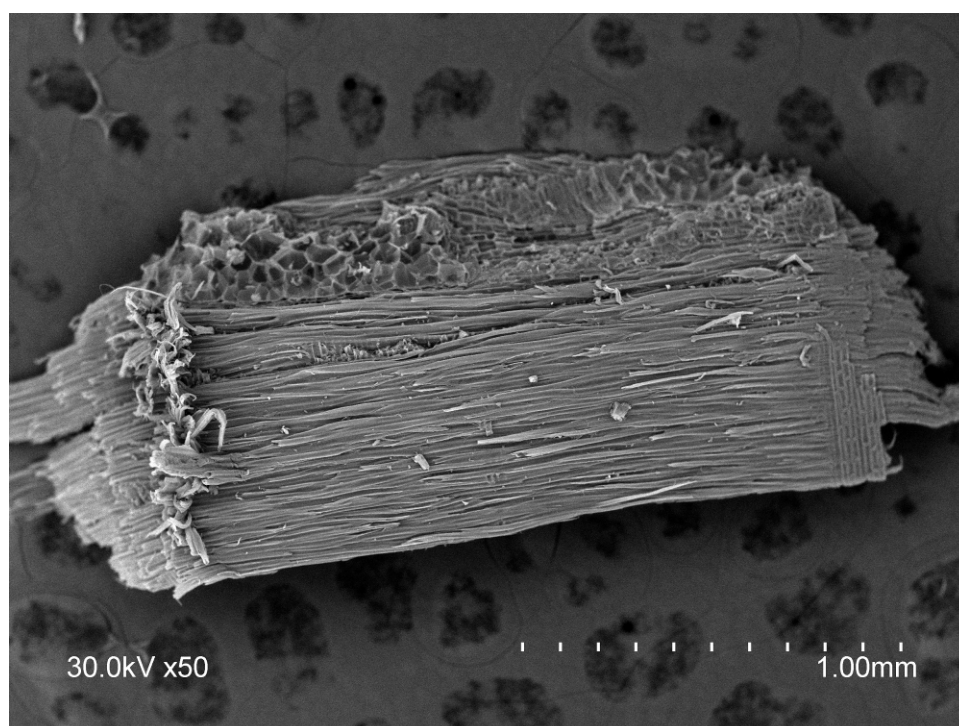
**112. ábra.** Akác szemcsék aprítás után a 0,063-0,2mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



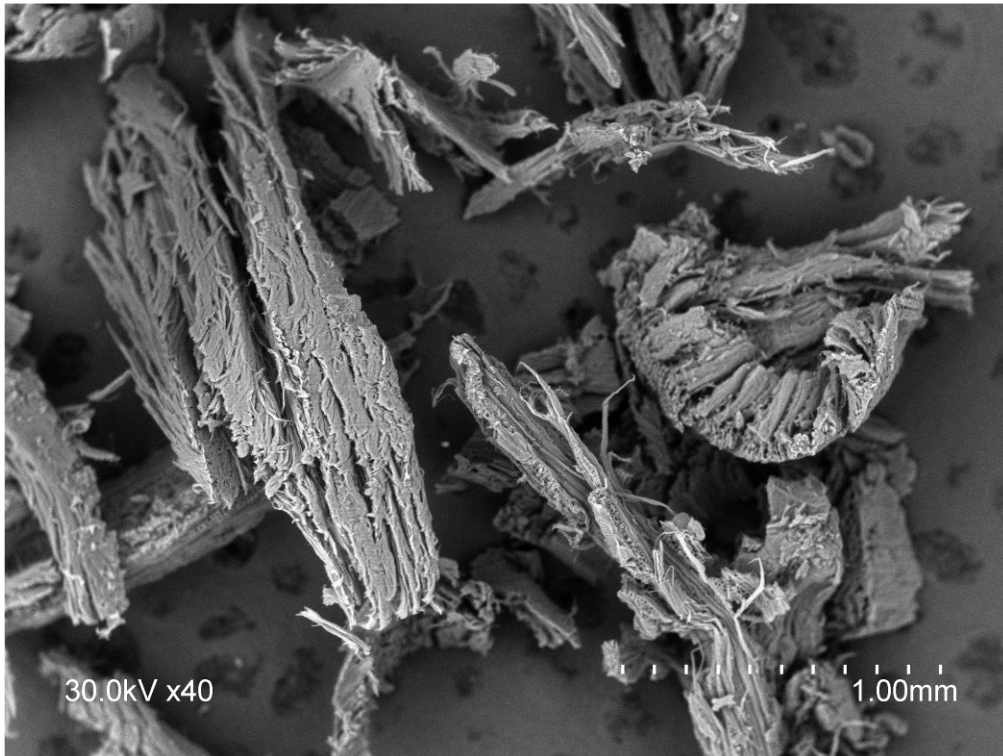
**113. ábra.** Akác szemcsék aprítás után a 0,063-0,2mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



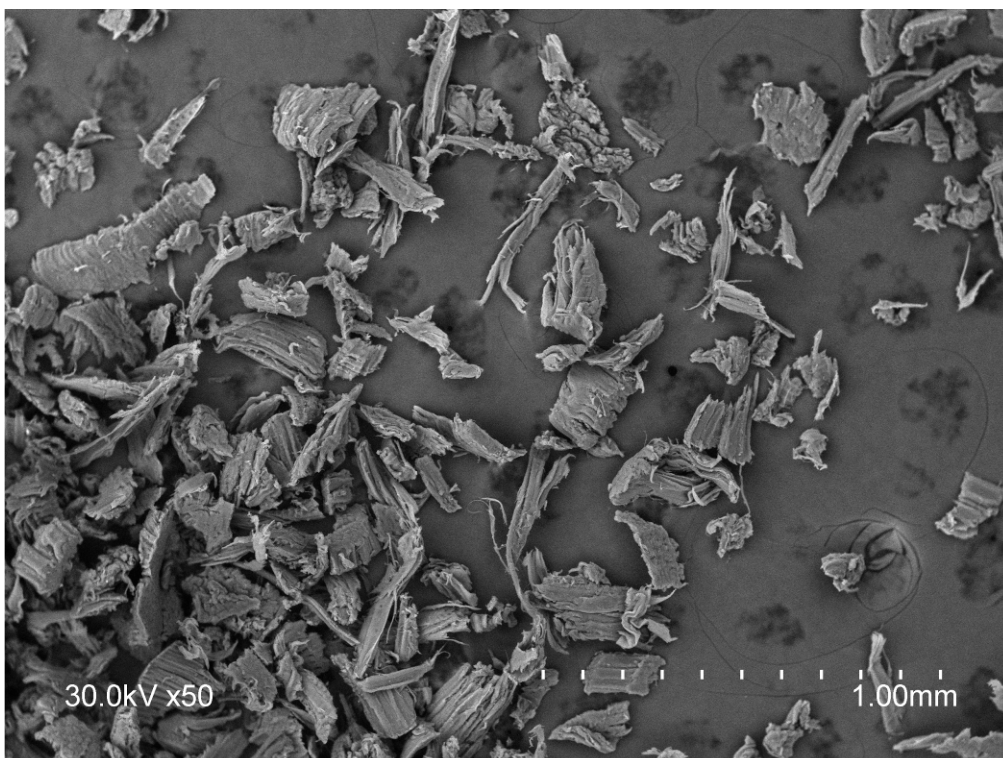
**114. ábra.** Akác libriform rost  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



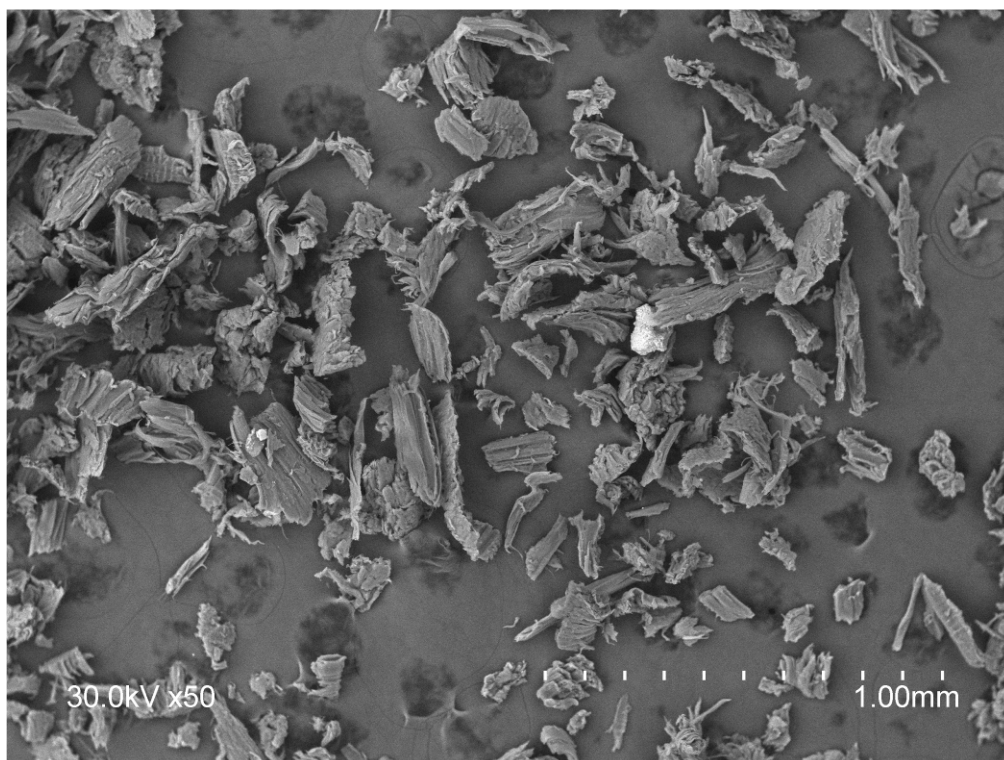
**115. ábra.** Akác szemcse aprítás után a 0,8-1mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



**116. ábra.** Akác szemcsék aprítás után a 0,8-1mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



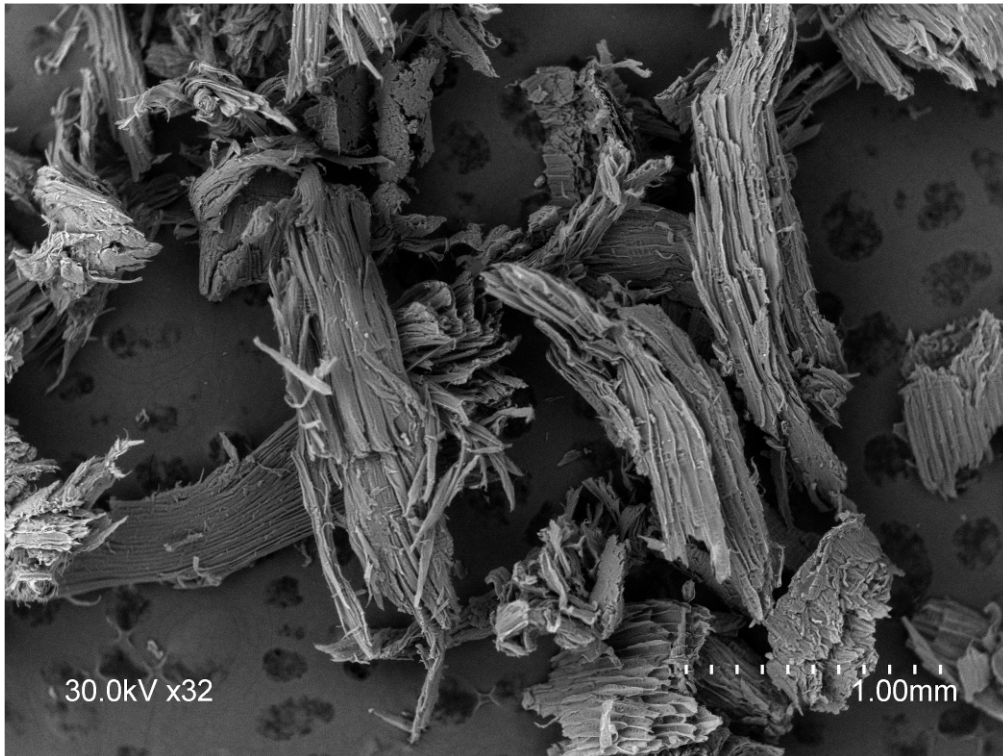
**117. ábra.** Fenyő szemcsék aprítás után a 0,063-0,2mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



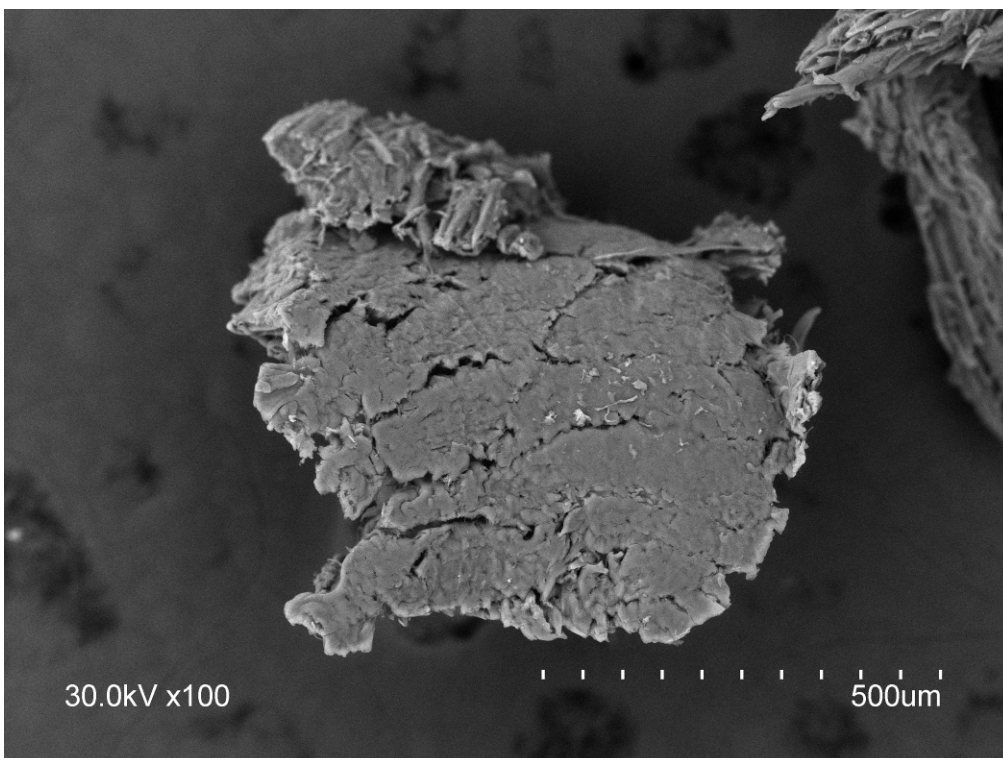
**118. ábra.** Fenyő szemcsék aprítás után a 0,063-0,2mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



**119. ábra.** Fenyő tracheida udvaros gödörkés sejtalfalvastagodással  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



**120. ábra.** Fenyő szemcsék aprítás után a 0,8-1mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)



**121. ábra.** Fenyő szemcse aprítás után a 0,8-1mm frakciótartományban  
(A felvétel készítésének időpontja: 2014. július 24.)