

A nem-lineáris rheológia alkalmazása a faalapú anyagok pelletálásával, tömörítésével összefüggésben

I. kísérleti rész

KOCSIS Zoltán¹, CSANÁDY Etele¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem, Simonyi Károly Kar
Kapcsolat: zoltan.kocsis@skk.nyme.hu

Kivonat

A gyakorlatban sokszor előfordul egyes mezőgazdasági vagy faipari anyagok pelletálása, amelynél a nyomás eléri vagy meghaladja az 1000 bar értéket. A tömörítés folyamán a sűrűség és vele a rugalmassági modulus is gyorsan növekszik. A fa illetve a belőle készített pellet viszkoelasztikusan viselkedik, tehát a nyomás-deformáció összefüggés az időtől illetve a terhelés sebességétől is függ. A por-forgács halmazok tömörödésével összefüggő korábbi kutatások azt mutatták, hogy még egészen kis összenyomásnál sem rendelkezik a tömör faanyag a Hooke-féle rugalmassági tulajdonságokkal (Sitkei 1981). A terhelés-teherintenzitási ciklus végén mindig visszamarad egy bizonyos értékű deformáció. A deformáció nagy része a tehermentesítés során nem nyerhető vissza. A feszültség-deformáció viszony az idő mellett a feszültség nagyságától is függ, tehát nem-lineáris viszkoelaszticitásról beszélhetünk (Sitkei 1994). A jelenleg is folyamatban lévő kutatások során – ahol a pelletálási folyamatra jellemző nyomófejet is készítettünk – olyan komplex nem-lineáris rheológiai modell kifejlesztését tűztük ki célul, amely az anyag rugalmas, viszkoelasztikus és plasztikus tulajdonságait írja le, különös tekintettel a faalapú por-forgács halmazok préselésére széles nyomástartományokban.

Kulcsszavak: tömörítés, viszkoelaszticitás, rheológia, kúszás

Application of a non-linear rheological model for the compaction of wood-based materials

1th part of the research

Abstract

In practice it is a common method to reduce the volume of agricultural and wood-based waste materials (chips and saw dust) by compression using pressures of up to 1000 bar or more. During the compaction processes, the density and the modulus of elasticity increase rapidly. The wood material and the pellets behave viscoelastically, so the strain-deformation relationship depends on the time and on the loading rate. Experimental compactional investigations were carried out with wood materials of different species. Earlier investigations showed that even under low levels of compression the wood material lacked Hooke's elasticity law qualities (Sitkei 1981). By the end of the loading period some deformation always remains. Most of the deformation cannot be recovered after the load is released. The stress relationship depends on the time and the stress-rate. This behavior is characterised as non-linear viscoelasticity (Sitkei 1994). The ongoing which included the creation of a compression head are aimed at developing a complex non-linear rheological model, which describes the wood materials' elastic, viscoelastic and plastic behaviour, with special respect to the compaction of wood-based sawdust samples under a wide range of pressures.

Keywords: compaction, viscoelasticity, rheology, creep

Bevezetés

A gyakorlatban manapság egyre nagyobb arányban terjed az egyes mezőgazdasági vagy faipari anyagok pelletálása, amelynél a nyomás eléri vagy meghaladja az 1000 bar értéket. A fapelletek esetén kiemelt követelmény a tömörödés vizsgálata, hiszen fontos, hogy a pellet állékony legyen, vagyis szállítás közben ne essen szét. Az állékonyt a szemcsék méretének eloszlásán túl azok nedvességtartalma, az elért sűrűség és a préselési hőmérséklet befolyásolja. A por–forgács halmazok tömörödési vizsgálatainak tehát nagy gyakorlati jelentősége van mind a pelletálási, mind pedig a brikettálási technológiák területén. A tömörítési folyamatok hatására az anyag kisebb térfogatú lesz, sűrűsége növekszik. A pellet kiinduló sűrűsége elsősorban a szemcsék méretelosztásától, valamint a szemcsék anyagának sűrűségétől függ. A fűrészporok laza sűrűsége 200–220 kg/m³, míg az elkészült pellet ömlesztett sűrűsége 650–700 kg/m³, tömör sűrűsége 1100–1200 kg/m³ körül van.

Mivel a pellet az előállítás során a falsúrlódások révén jelentősen felmelegszik, ezért a hőmérsékletnek is fontos hatása van a kialakult pellet tulajdonságaira, elsősorban a sűrűsége és a nyomásviszonyra (felhasznált energiára). Az üzemmeleg állapot (kilépő pellet hőmérséklete) 80–90 °C körüli (Burján 2009). A kísérlet során éppen ezért vizsgálat alá vontuk a faanyag tömörödésének hőmérsékletfüggését is, amit egyedi tervezésű és saját kivitelezésű mérőrendszerrel oldottunk meg (a fűtési mérőkör jelenleg a kivitelezési fázisban van). Hő hatására a faanyag plasztikussá válik, vagyis adott sűrűség kisebb nyomással érhető el és ez az összenyomott anyag a tehermentesítést követően kevésbé rugózik vissza, tehát nagyobb lesz a maradó deformáció mértéke (Sitkei 1981). Mivel a faanyag nem lineáris viselkedést mutat a gyakorlatban a tömörítés hatására, ezért nehéz pontosan meghatározni pl. az energiafelhasználás szempontjából kedvező gyártási paramétereket, vagy a komplex leíró anyagmodelleket. A cikkben ismertetett célzott alapkutatások ezeknek a leírását célozzák.

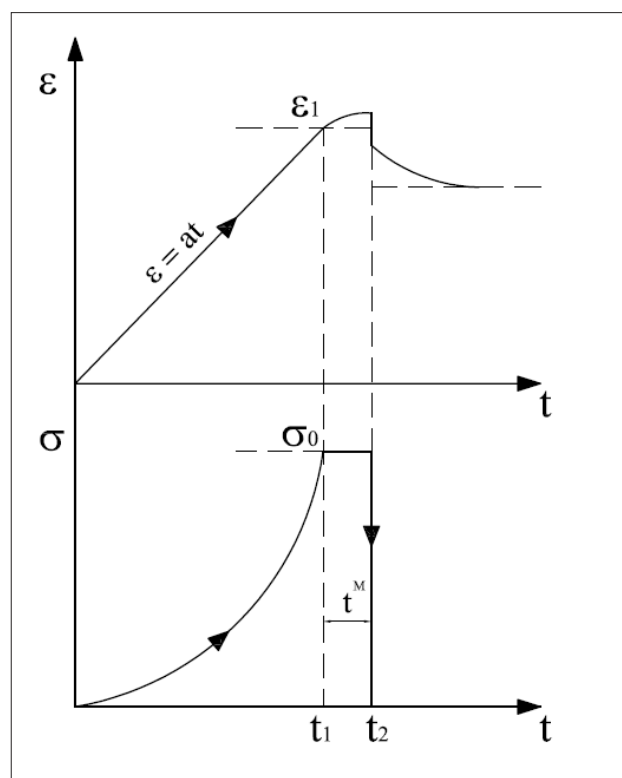
Elméleti megfontolások

A biológiai anyagok bonyolultságának következménye, hogy a mechanikai tárgyalások során viszonylag sok peremfeltételt kell megfogalmaznunk és a kapott eredmények csak az adott feltételek mellett érvényesek. Gyakran szükséges empirikus módszerekhez folyamodni, hogy az észlelt jelenséget leírhatjuk. Mivel a tisztán elméleti megfontolások – a számos befolyásoló tényező miatt – ritkán vezetnek használható eredményhez, ezért a kísérleteknek különösen fontos szerepük van. A vizsgálatok értékeléséhez nagyon fontos, hogy az anyag minden jellemzőjét (fafaj, frakcióméret, nedvességtartalom, stb.), amelyek az eredményt befolyásolják, pontosan rögzítsük. A terhelési sebesség a műszaki gyakorlatban széles határok között változhat, ezért a terhelési sebesség hatását a modellnek jól kell jellemezni.

A préselési folyamatok időbeni lefolyását általános esetben az 1. ábra mutatja. A terhelést követően a faanyag általában hosszabb-rövidebb ideig állandó terhelésen marad (σ_0) és ez idő alatt kúszás következik be (ϵ_1). A kúszás jelen esetben az anyag további tömörödését jelenti állandó feszültség (jelen esetben nyomás) mellett. A terhelés megszűnése után 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).

Anyagok és módszerek

A kutatás során a pelletálási folyamatra jellemző nyomófejeket készítettünk (2. és 4. ábra). A tervezésnél kiemelt fontosságú volt a nyomórúd kihajlásra törté-



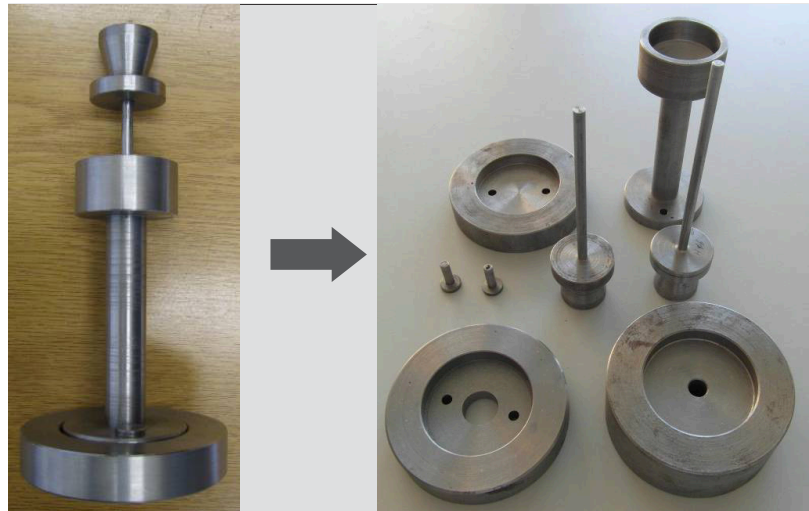
1. ábra A préselési folyamat időbeni lefolyása (Sitkei 1994 alapján)
Figure 1 A compaction process over time (based on Sitkei 1994)

nő méretezése, hisz ez határozta meg a tömörödési magasságot, adott átmérő mellett. A nyomófej tervezésénél a fő szempont az volt, hogy olyan hosszú legyen a tömörítő csatorna, hogy a tömörítés végén az ipari gyakorlatban előforduló hosszúságú (20–30 mm) pelletet kapjunk eredményül.

A 2. ábrán látható karcsúsított kialakításnak az a hátránya, hogy a falsúrlódás miatti nyomásesés nem lesz egyforma a tömörített pellet hossza mentén (Sitkei 1981). A relatív falsúrlódás nem más, mint a tömörítő csatorna átmérőjének, ami közel azonos a pellet átmérővel (D) és a pellet magasságának (L) a viszonya. Azért relatív, mert a pellet magasságához van vonatkoztatva az átmérője, tehát ez egy viszonylagos, vagy másképpen relatív érték. Vagyis minél kisebb a tömörítő csatorna átmérője a pellet magasságához képest (vagyis az L/D hányados nagy), annál nagyobb lesz a relatív falsúrlódás mértéke (megnö a relatív súrlódási ellenállás), vagyis annál nagyobb lesz a nyomáskülönbség és ez által a sűrűségváltozás is a pellet hossza mentén, aminek következménye a 3. ábrán látható „szétesés”.

Mivel egyértelmű, hogy a relatív falsúrlódásnak jelentős a szerepe a kialakult pellet sűrűségére, ezért további két átmérettartományban is készítettünk nyomófejeket (4. ábra), hogy vizsgálat alá vonjuk a falsúrlódás befolyásoló hatását is. Az így elkészített nyomófejekkel történő mérések lehetővé tették, hogy a faanyag feszültség-deformáció összefüggéseit az idő függvényében különböző mérési paraméterek figyelembevételével meg tudjuk határozni.

A kutatás során lucfenyő (*Picea abies*), tölgy (*Quercus sp.*) és akác (*Robinia pseudoacacia*) légszáraz (~10–12%) faanyagokat forgácsoltunk el. A gyakorlatban racionálisan is már por-forgács halmazállapotú alapanyagokat alkalmaznak pellet előállítására. Fontos volt ismerni a pelletálásra kerülő frakcióméreteket, hiszen a szemcseméret jelentősen befolyásolja pelletsűrűséget. Ennek érdekében a meglévő por-forgács mintákat NOVA PELLETT N-MICRO B típusú kísérleti pelletálónk utánaprítójával aprítottuk, majd az utánaprított



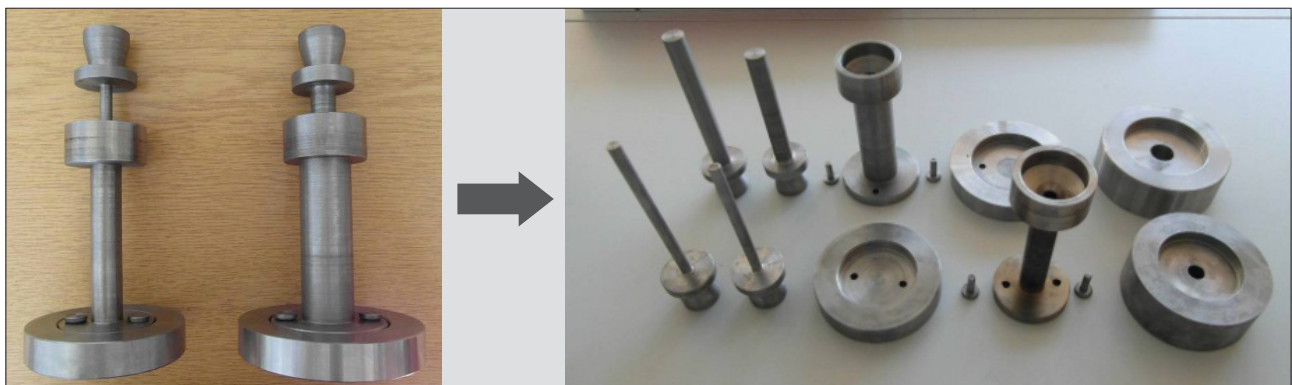
2. ábra A nyomófej (nyomófej átmérő: 6mm)

Figure 2 The compression head (head diameter: 6mm)



3. ábra A falsúrlódás miatti sűrűségkülönbség tölgy és fenyő mintán

Figure 3 Density variations due to wall friction on oak and spruce samples



4. ábra További nyomófejek (8 mm és 16 mm-es átmérővel)

Figure 4 Compression heads (with 8 mm and 16 mm diameter)

frakciókat CISA BA 200N elektromágneses szitarázó készülék segítségével különféle frakciókra bontottuk fel (5. ábra). A szitálást mintánként 10 percig végeztük 1,5 mm-es rezgési amplitúdó mellett. A szitálás végeztével visszamértük az egyes frakcióknál lévő maradványértékek tömegét KERN PCB 3500-2 típusú digitális mérleg segítségével. Az így kapott eredményeket fenyő minta esetén az 5. ábra szemlélteti. Meg kell jegyezni, hogy a tölgy és az akác utánaprítási frakciói is az ábrán látható frakciósorrendet követték, csak más maradványértékekkel.

Az elkészült frakciók nedvességtartalmát BOECO SMO 01 típusú automatikus nedvességmérővel mértük meg. A műszer a mérőtálcájára helyezett adott tömegű frakciót (nedves frakció) 105 °C hőmérsékleten tömegállandóságig szárítja és közben méri a tömegcsökkenést. Ezek alapján a kiindulási (nedves tömeg) és a száraz tömegből már meghatározható az egyes frakciókhoz tartozó nettó nedvességtartalom az alábbi képlet alapján (Molnár 1999):

$$u = \frac{m_n - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ ;(}\% \text{)} \quad [1]$$

ahol:

m_n – a nedves faanyag tömege (g)

m_0 – az abszolút száraz faanyag tömege (g)

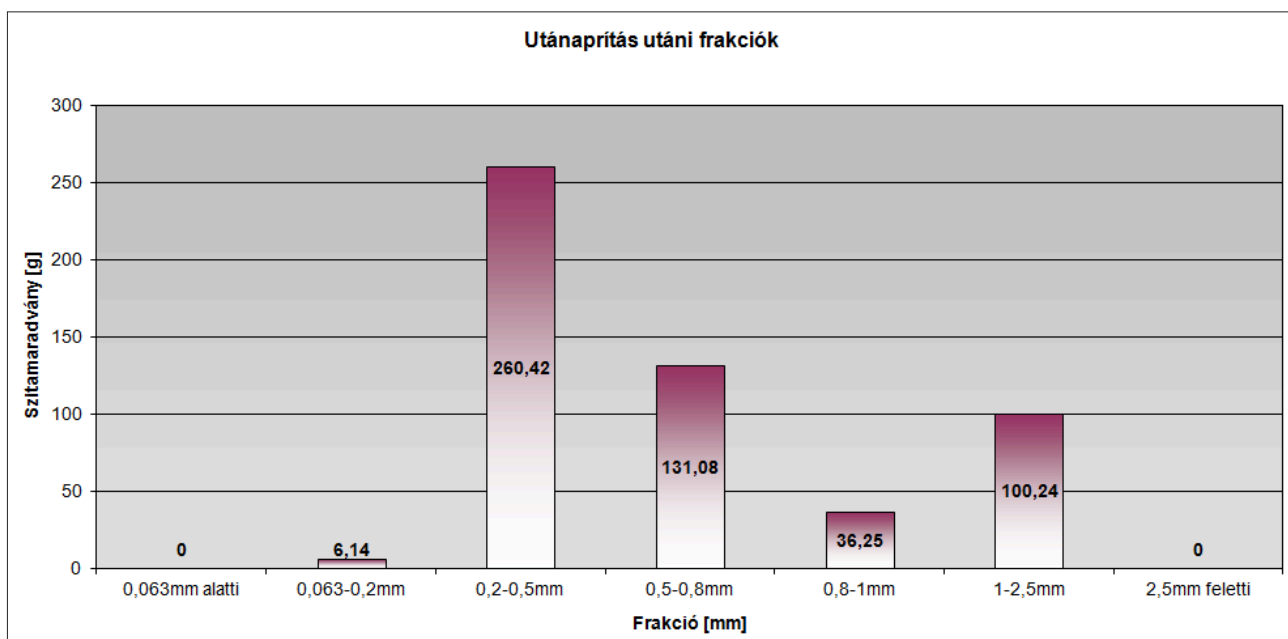
u – nettó nedvességtartalom (%)

A méréseket INSTRON univerzális szilárdságvizsgáló gépen végeztük el (6. ábra).

A mérési paramétereket az alábbi szempontok alapján választottuk meg:

- fafaj: lucfenyő (*Picea abies*), tölgy (*Quercus sp.*), akác (*Robinia pseudoacacia*)
- deformáció (terhelési) sebesség [v ; mm/min]: 2 mm/min; 10 mm/min; 60 mm/min
- préselési nyomás [P ; bar]: 500–1400 bar
- szemcseméret [mm]: 2,5–1 mm; 1–0,8 mm; 0,8–0,5 mm; 0,5–0,2 mm; 0,2–0,063 mm
- nyomófej átmérő [d ; mm]: 6 mm; 8 mm; 16 mm
- nedvességtartalom [u ; %]: 10–15%; 15–20%
- nyomástartási idő [t ; min]: 1 min; 2 min; 5 min; 10 min

A fenti szempontok alapján fafajonként közel 60 mérési variációban végeztük el a méréseket. Természetesen ezek között azonos mérések is voltak, hogy a minimális statisztikai követelményeknek (3–5 azonos mérés) eleget tegyünk. Tekintettel arra, hogy a mérési paraméter táblázatok nagyon terjedelmesek, ezért nem kívánjuk itt bemutatni őket. Az eredményeket magukba foglaló ábrákban viszont a rájuk jellemző mérési paramétereket összefoglaltuk.



5. ábra Fenyő minta utánaprítás utáni frakcióelemzése

Figure 5 Fraction analysis of spruce sample after secondary chipping

Mérési eredmények, következtetések

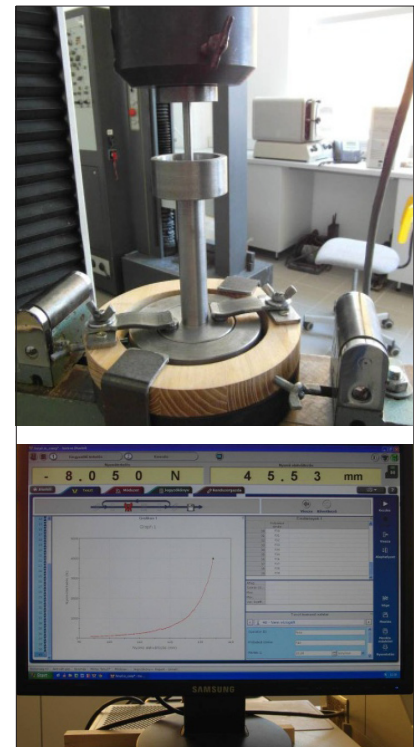
Az INSTRON szakítógépen történő mérések alapján felvettük az egyes minták terhelés-alakváltozás görbéit, melyek közül példaként a fenyő és az akác mintát mutatjuk be.

Az ábrákon (7–8. ábra) látható a faanyagalmaz nem lineáris viselkedése nagy nyomású tartományokban. Megfigyelhető továbbá az is, hogy azonos mérési paraméterek mellett adott nyomáson az alacsonyabb szilárdságú szemcsékből álló fenyő jobban összetömöríthető ($\epsilon=0,81$), mint a keményebb akác ($\epsilon=0,75$). Tehát a szemcsék anyagának kiindulási jellemzői (sűrűség, szilárdság) jelentős hatása van a kialakult pellet tulajdonságaira, elsősorban a sűrűsége. A vizsgált fafajok abszolút száraz sűrűségi értékei a következők (Molnár 1999):

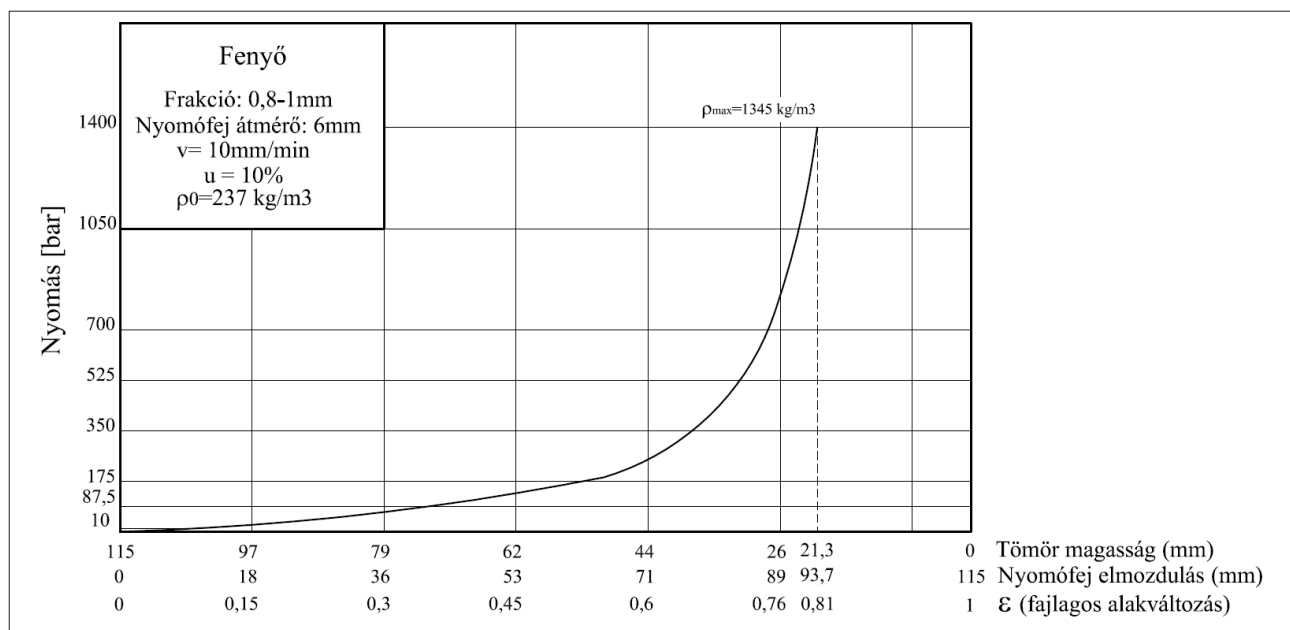
- lucfenyő (*Picea abies*): 430 kg/m³
- tölgy (*Quercus sp.*): 640 kg/m³
- akác (*Robinia pseudoacacia*): 720 kg/m³

A maximális terhelést követően az anyag a rugalmas deformációját hirtelen visszanyeri, majd egy időbeni kirugózás (expanzió) követi a folyamatot. A kirugózás mértéke határozza meg a pellet végleges sűrűségét. Az időbeni kirugózás mérését 0,01 pontosságú digitális tolómérővel végeztük el azoknál a mintáknál, melyek mérhetőek voltak (nem estek szét). A következőkben bemutatott kutatási eredmények 500–1400 bar közötti nyomástartományokra jellemzőek. Ennek az az oka, hogy a gyakorlatban 800–900 bar présnyomás alatt nem lehet az elvárt követelményeknek megfelelő pelletet előállítani, tehát alacsonyabb nyomásokon a pellet szétesik, amit tapasztaltunk is. A folyamatban lévő kutatások során vizsgálatok alá vontuk az 500 bar alatti nyomástartományokat is, melyeket cikkünk következő részében közlünk.

A 9. ábrán akác minta sűrűségének változását láthatjuk az alkalmazott nyomás függvényében azonos frakció (0,5–0,8 mm) és nedvességtartalom ($u=13\%$) mellett. Látható, hogy ha nagyobb a nyomás, akkor a szemcsék jobban összetömörödnek, tehát nagyobb lesz a tömör sűrűségük és vele együtt a halmaz kevésbé fog visszarugózni, vagyis nagyobb lesz a pelletsűrűség is.



6. ábra Nyomóvizsgálat INSTRON univerzális szilárdságvizsgáló gépen
Figure 6 Compression test on INSTRON universal testing machine

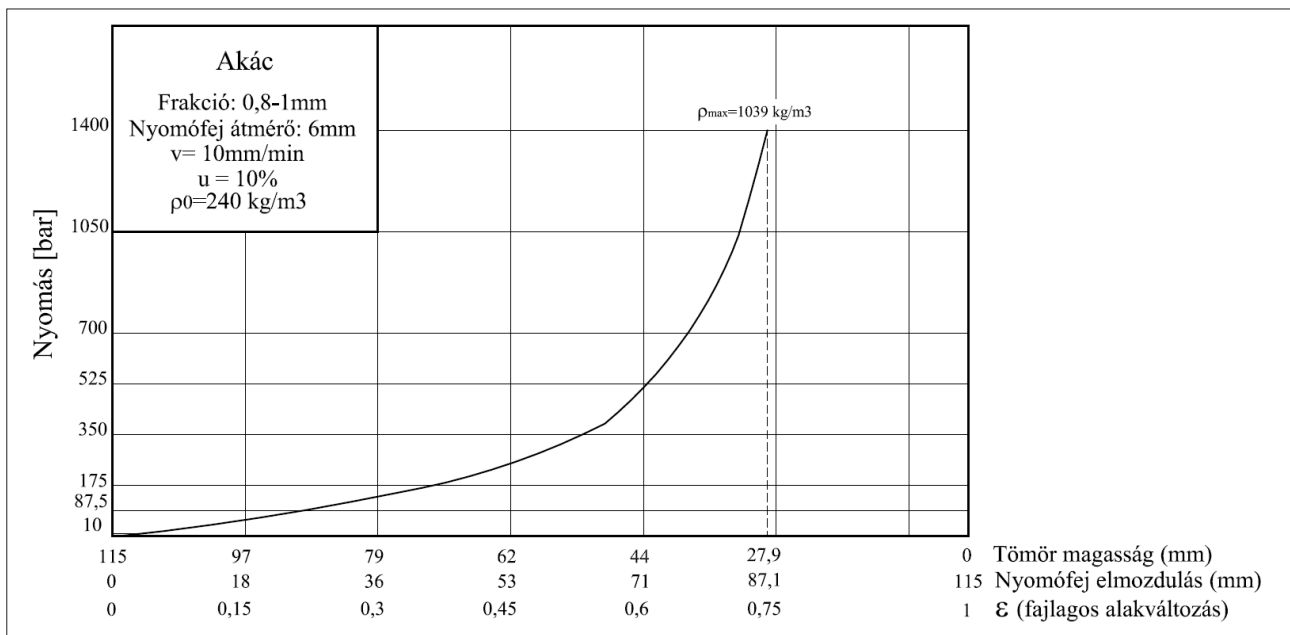


7. ábra Fenyő minta terhelés-alakváltozás görbéje (nyomófej-átmérő: 6 mm)

Figure 7 Spruce sample load-deformation diagram (compression head diameter: 6 mm)

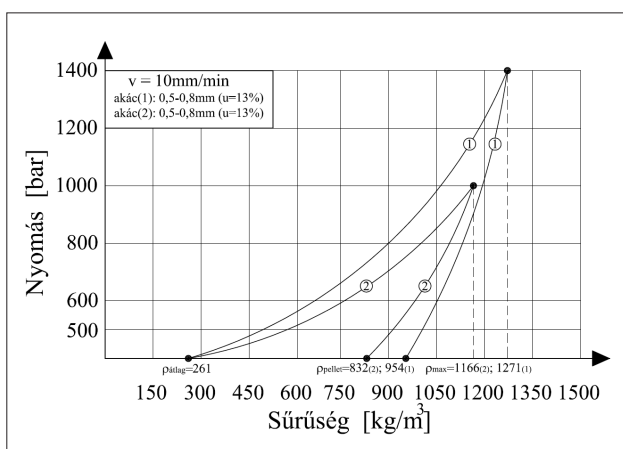
Természetesen a nedvességtartalom is jelentős hatással van a kialakult pellet sűrűségére. A gyakorlatban alkalmazott optimális nedvességtartalmi értékek pelletálásnál $10\pm 2\%$.

A következőkben éppen ezért a nedvességtartalom hatását is vizsgálat alá vontuk. Látható (10. ábra), hogy azonos nyomófej átmérő mellett, ha nedvesebb a frakció, akkor adott nyomáson jobban összenyomható a halmaz, vagyis nagyobb lett a tömör sűrűség és vele együtt a pelletsűrűség is, hisz kisebb lett a kirugózás mértéke is. Érdekes megemlíteni, hogy nedvesebb frakciónál kisebb nyomáson is nagyobb pelletsűrűséget értünk el (100 bar ; 750 kg/m^3), mint szárazabb frakciónál nagyobb nyomáson (1400 bar ; 740 kg/m^3). Ez a jelenség azzal magyarázható, hogy egyrészt a nedvesség hatására a faanyag plasztikus deformációs képessége növekszik, vagyis adott sűrűség kisebb nyomással érhető el. Másrészt pedig nyomás hatására a farészekből kiáramló nedvesség csökkenti a cső fala és a halmaz közti súrlódási tényező értékét (Carlos 2010). Természetesen a végtermék (pellet) nedvességtartalma is nagyobb lett ezáltal, ami viszont csökkenti a fűtőértékét. Az ipari gyakorlatban viszont a tömörítés $80\text{--}90\text{ }^\circ\text{C}$ -on megy végbe, ezért a pellet nedvességtartalom-különbsége is kisebb lesz.



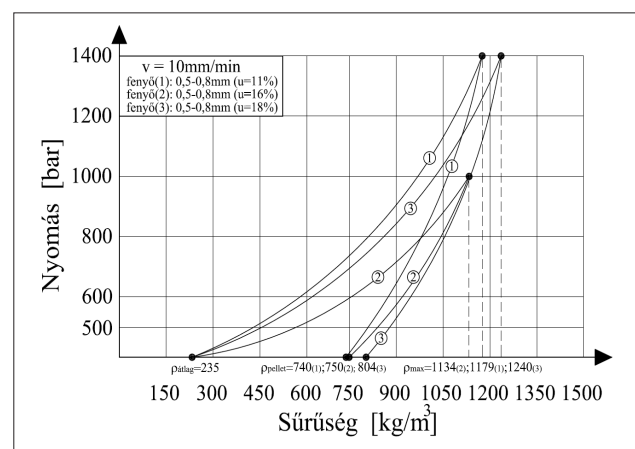
8. ábra Akác minta terhelés-alakváltozás görbéje (nyomófej-átmérő: 6 mm)

Figure 8 Robinia sample load-deformation diagram (compression head diameter: 6 mm)



9. ábra A nyomás hatása a pellet sűrűségére (nyomófej-átmérő: 6 mm)

Figure 9 The effect of pressure on the density on the pellets (compression head diameter: 6 mm)



10. ábra A nedvességtartalom hatása a pellet sűrűségére (nyomófej-átmérő: 6 mm)

Figure 10 The effect of moisture content on the density of pellets (compression head diameter: 6 mm)

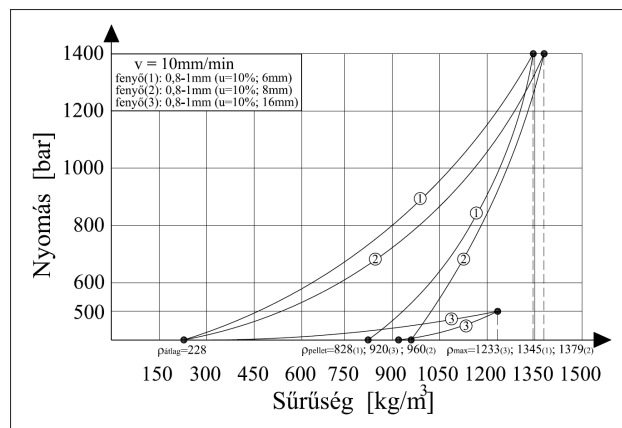
A 11. ábrán láthatjuk a háromféle nyomófej átmérővel történő mérések eredményeit. Megállapíthatjuk, hogy minél kisebb a nyomófej átmérő (D) a pellet magasságához (L) képest (L/D hányados nagy), annál nagyobb lesz a halmaz és a cső fala között létrejött relatív falsúrlódás mértéke. Ez igazolható azzal (11. ábra), hogy nagyobb nyomófej átmérő mellett azonos nyomáson tömörebb a halmaz (nagyobb a tömör sűrűsége) és kisebb a kirugózás mértéke, vagyis nagyobb a pelletsűrűség. Érdekes, hogy 16 mm-es nyomófejnél 500 bar nyomáson nagyobb pelletsűrűséget (920 kg/m^3) értünk el, mint 6 mm-es nyomófejnél 1400 bar nyomáson (828 kg/m^3). Ez is arra utal, hogy jelentős szerepe van a relatív falsúrlódásnak. Az ipari gyakorlatban pelletálásnál a présnyomás viszonyok 800–1400 bar között változnak (Burján 2009).

A következőkben azt vizsgáltuk, hogy mennyiben befolyásolja a szemcseméret a kialakult sűrűséget különböző nyomásokon azonos nedvességtartalom mellett ($u=10\%$).

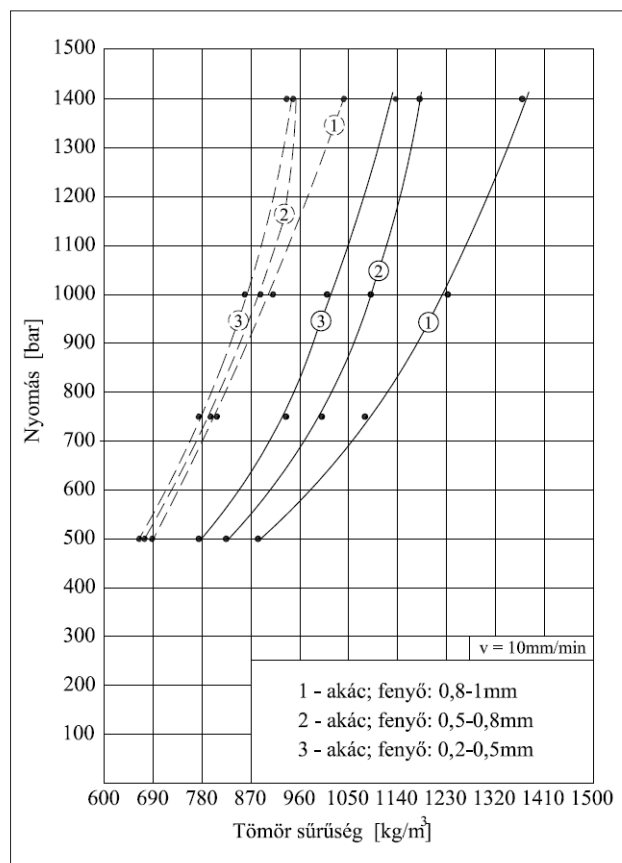
A 12. ábrán látható, hogy a szemcseméret csökkenésével a pellet tömör sűrűsége is csökkent adott nyomáson. Ez azzal magyarázható, hogy a szemcseméret csökkenésével csökken a szemcsék közötti levegő térfogati aránya (levegő-szilárd rész arány), ezért jobban érvényesül a szemcse saját szilárdsága (Sitkei 2000). Megállapítható az is, hogy minél puhább a szemcse (lásd fenyő) egy adott nyomáson, annál jobban összetömöríthető, mint a nála keményebb akác. Ez is a faanyag saját szilárdságával van összefüggésben. Tehát a nagyobb sűrűségű és keménységű szemcsék jobban ellenállnak a nyomásnak, ezért kisebb mértékben tömöríthetők össze, vagyis kisebb lesz a tömör sűrűségük.

Összefoglalás

Cikkünkben bemutattuk azokat a főbb kutatási irányokat, melyek segítségével pontosabb képet kaphatunk a por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörödési folyamatairól. Meghatároztuk azokat a főbb befolyásoló tényezőket (pl. nedvességtartalom, nyomófej átmérő, présnyomás, szemcseméret stb.), melyek nagyban befolyásolják a tömör illetve a kialakult pelletsűrűséget. Megállapítottuk, hogy a szemcsék mérete és szilárdsága jelentős hatással van a kialakult pelletsűrűsége, vagyis minél keményebb a szemcse (minél nagyobb a szemcse szilárdsága), annál jobban ellenáll egy adott nyomásnak, ezáltal kisebb lett a tömör és vele összefüggésben a pelletsűrűség is. Látható volt, hogy azonos fafajon belül a szemcseméret csökkenésével csökkent a tömör sűrűség, amely a külső pórusok arányának változásával (levegő-szilárd rész arány) magyarázható. Megállapítottuk azt is, hogy a nedvességtartalom növekedésével egy adott pelletsűrűség kisebb nyomással érhető el. Természetesen a túlzott nedvesség negatív hatással van a pelletsűrűsége, melyekkel kapcsolatos vizsgálatok jelenleg is folyamatban vannak. A kialakult



11. ábra A nyomófej átmérőjének hatása a pellet sűrűségére
Figure 11 The effect compression head's diameter the density of pellets



12. ábra A sűrűség változása a frakcióméret függvényében akác (szaggatott vonal) és fenyő fafajoknál (nyomófej átmérő: 6 mm)
Figure 12 The density changing depending on the particle size at robinia (dashed line) and spruce wood species (compression head diameter: 6 mm)

pelletsűrűséget a fent említetteken kívül a nyomófej átmérője is befolyásolta, ami a relatív sűrűdési elméletekre vezethető vissza, mely témakör a fontossága miatt további, mélyrehatóbb kutatásokat igényel. Ezekon kívül további vizsgálatok alá vontuk a hőmérséklet befolyásoló hatását is, hiszen a gyakorlatban előállított pellet hőmérséklete 80–90 °C. Ezek a kutatások jelenleg még folyamatban vannak. A por-forgács halmazok rheológiáján túlmenően energetikai oldalról is elkezdtünk kutatásokat folytatni és folyamatban van egy olyan dimenzió nélküli kritériumegyenlet felállítása, mely univerzálisan (fafajtól függetlenül) jellemzi majd a faanyagok nyomás-sűrűség változását a tömörítési munka és a préshőmérséklet függvényében különböző nyomófej átmérők mellett. A leírtakkal kapcsolatos további kutatási eredményeinket cikkünk következő részében közöljük.

Összefoglalva tehát megállapíthatjuk, hogy a fa, mint komplex biomechanikai rendszer mennyire eltérően viselkedik adott technológiai paraméterek mellett. Ezeket a viselkedéseket nehéz pontosan a matematika nyelvén megfogalmazni, ezért tovább folytatjuk kutatásainkat. A kutatás fő célja tehát kettős: egyrészt eredményeinket a gyakorlat, másrészt pedig az elmélet számára kívánjuk használhatóvá tenni. Gyakorlati vonatkozásban célunk, hogy a különböző mérési paraméterek (fafaj, nyomás, szemcseméret, terhelési sebesség, nedvességtartalom, hőmérséklet stb.) mellett további vizsgálatokat végezzünk és találjunk olyan optimális paramétereket (alapanyag tulajdonsággal és technológiai paraméterekkel összefüggésben), melyek lehetővé teszik a pellet előállítása során felhasznált energia csökkentését az előírt minőség megtartása esetleges fokozása mellett.

Köszönetnyilvánítás

Ez a cikk a Környezettudatos energia hatékony épület című TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0068 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Burján Z. (2009) Faalapú pelletgyártás alapanyagai, gyakorlati tapasztalatok, innoLignum Erdészeti és Faipari Szakvásár és Rendezvénysorozat, Sopron
- Carlos S. (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
- Molnár S. (1999) Faanyagismeret, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- Sitkei Gy. (1994) A faipari műveletek elmélete, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- Sitkei Gy. (1981) A mezőgazdasági anyagok mechanikája, Akadémiai Kiadó, Budapest
- Sitkei Gy. (2000) Plasztikus deformáció leírása mezőgazdasági anyagok préseléskor, OTKA támogatással végzett kutatási zárójelentés, Sopron