



Nyugat-magyarországi Egyetem
Faipari Mérnöki Kar
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák
Doktori Iskola

Faanyag Szárítása Infravörös Sugárzással

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Készítette:
Cserta Erzsébet

Témavezető:
Dr. habil Németh Róbert

Sopron

2012

Kivonat

A jelen munkában makroszkopikus szinten végzett hőmérséklet és nedvességmérések segítségével vizsgáltam a nedvesség mozgásának dinamikáját infravörös (IR) sugárzásnak kitett faanyagban. A mintadarabok magjában és felületén mért hőmérséklet értékeket a besugárzási idő függvényében ábrázoltam. A folyamatos IR besugárzás mellett, a maghoz tartozó görbék alakjában 90°C körül következetesen megjelenő stagnálásból arra következtettem, hogy a magban egy fázisátalakulásnak kell lezajlania ezen a hőmérsékleten.

Párhuzamos hőmérséklet és nedvességmérések segítségével igazoltam, hogy az IR hőkezelés hatására a folyadék víz a stagnálási hőmérsékleten gőzfázisúvá válik. Ez az alacsony hőmérsékletű fázisátalakulás a normál atmoszferikus nyomásnál alacsonyabb nyomásviszonyokat feltételez a hevített faanyag belsejében. Az atmoszferikus alatti nyomás létrejöttét egy ozmózis hatására végbemenő vízmozgásra veztem vissza, amely a nedvesség különböző összetevőire nézve féligáteresztőnek tekintett sejtfal két oldala között kialakuló koncentráció különbség miatt jön létre. Az ozmotikus folyamat addig tart, amíg folyadék fázisú víz van a fában. A folyadékvíz átalakulásával megszűnik az ozmotikus nedvességmozgás, és a képződött vízgőz már könnyen kidiffundál a faanyagból.

A nedvességeloszlás-térképek eredményei alátámasztották azt az elméleti következtetést is, hogy az IR nem csak felületi melegítésre alkalmas, hanem használatával a faanyag belseje is jól melegíthető. Ennek oka, hogy a kiválasztott sugárzás hullámhosszát a lignocellulózok nem, vagy kevésbé nyelik el, szemben a vízzel, ami lokális abszorpció maximummal rendelkezik ebben a tartományban.

Áttekintés

A faiparban alkalmazott hőkezelési eljárások legfőbb céljai közé tartozik a faanyag tartósságának és méret-tartásának biztosítása nedvességtartalmának irányított csökkenése során. Mivel a szárított termék minőségi előírásoknak kell megfeleljen, ezért a hőkezelésre előirányzott, frissen vágott faanyagot ellenőrzött körülmények között kell kezelni. A minőségbiztosítás gyakorlati megvalósításának szintjén, a megfelelő szárítási mód kiválasztása rendkívül fontos. Nyilvánvalóan, a különböző szárítási technikák jelentősen befolyásolják a szárított végtermék tulajdonságait és meghatározzák lehetséges használhatóságának kereteit. Az optimális szárítási paraméterek megtalálásához a faanyag száradási mechanizmusának mélyreható tanulmányozása elengedhetetlen.

Ebben a kutató munkában a faanyag száradási mechanizmusának vizsgálatával foglalkoztunk kísérleti kemencében végzett mérési eredmények kiértékelése alapján. Sugárzásos szárítási technológiát alkalmaztunk IR besugárzást használva a hagyományosan elterjedt, konvektív hőátadáson alapuló eljárások helyett. Az IR hősugárzók a gyors és hatékony energiaátadás elérése érdekében kerültek alkalmazásra. Bizonyos hullámhosszú IR sugárzásnak különösen jelentős hatása van a hőkezelő eljárás hatékonyságára. Az általunk kifejlesztett IR hősugárzók olyan hullámhossz intervallumon sugároznak amely a végtermék szempontjából optimális.

Célkitűzések

A napjainkban konvencionálisan alkalmazott faanyag szárítási technológiák a faanyag száradási mechanizmusának ismeretén alapulnak. A száradás során a faanyagban zajló makro- és mikroszintű hő- és anyagtranszport folyamatok megértésével és leírásával az alkalmazott technológiai paraméterek helyes beállítását segítjük elő, és ezzel célirányosan befolyásolni tudjuk a száradási folyamatot irányító hajtóerőket. A mikroszintű mechanizmusok közvetlenül nem, vagy csak részben, bonyolult műszerek segítségével vizsgálhatók, ezért a száradási mechanizmus elemzésében a makroszintű vizsgálatok eredményeire hagyatkozunk. Az egyszerű elemekből összeállított mérőműszerek segítségével elvégzett makroszintű mérések eredményeiből következtetünk a mikroszinten lezajló eseményekre is. A száradás mechanizmusának ilyen módon történő pontos feltérképezése abban nyújt segítséget, hogy javítsuk a faiparban előállított, szárított faanyag minőségét valamint a szárítási technológia hatékonyságát.

A száradás során a faanyagban zajló transzport folyamatok egy széles körben kutatott területét adják a faanyagtudománynak. A hőmérséklet és a relatív páratartalom egyensúlyi fanedvességre gyakorolt hatása közismert. A hőátadás módjának változtatásával befolyásolható a faanyagon belüli hőáramlás dinamikája és így egyben a nedvességeloszlás változása is. A hazai és nemzetközi szakirodalomban kevésbé központi kérdés azonban a nedvesség, mint híg oldat, oldott anyag koncentrációjának a száradás során fellépő változása, és ennek jelentősége a víz mozgására a fában. Pedig ez a faktor nem elhanyagolható, és tovább bonyolítja, a már önmagában is komplex transzportfolyamat-modelleket.

A koncentráció változás dinamikájának vizsgálatához a különböző koncentrációjú régiókat egymástól elválasztó határfelületek sajátosságait is figyelembe kell venni. A faanyagban az ilyen elválasztók szerepét a sejtfalak töltik be. Szerkezetük pontos megismeréséhez direkt, roncsolásmentes mérések nem állnak rendelkezésünkre, és a fajta és egyed-specifitás is megakadályozza általános érvényű, egzakt bemutatásukat. A folyamatok nagyobb távlatból történő, makroszinten végzett vizsgálatával azonban következtethetünk a sejtfalak transzport folyamatokban betöltött szerepére és ezáltal tulajdonságaikra is.

Kutatásomban célul tűztem ki a faanyagban IR besugárzás hatására végbemenő

hőmérséklet-változás és nedvesség-mozgás időbeli és térbeli vizsgálatát, és ennek segítségével a száradási mechanizmus leírását. Ehhez a következő feladatok megvalósítását láttam szükségesnek.

1. Az IR sugárzás hatásának vizsgálata a faanyagban zajló hő- és anyagtranszport folyamatokra.
 - (a) A száradási mechanizmus hajtóerőinek vizsgálata az expozíciós idő függvényében, a mintadarabok felületén és középtengelyében detektált hőmérséklet-változás révén.
 - (b) A száradás dinamikájának nyomon követése a hőmérsékletméréssel párhuzamosan végzett nedvességmérés segítségével.
2. A nedvességeloszlás vizsgálata gerendák teljes keresztmetszetében. A különböző expozíciós idő elteltével felvett 1D és 2D nedvességeloszlások alapján a száradási mechanizmus leírása, valamint annak igazolása, hogy IR sugárzással a faanyag belseje is jól melegíthető.
3. Technológiai paraméterek hatásának vizsgálata a száradás dinamikájára és a mintadarab anyagi minőségére. Vizsgálandó:
 - (a) a mintadarabok kezdeti nedvesség-tartalmának változtatásával a nedvesség befolyásoló hatása a száradás dinamikájára.
 - (b) a besugárzás intenzitásának változtatásával az IR sugárzás hatása a száradási folyamatra.
 - (c) A mért eredmények statisztikai analízise.

Anyagok és Módszerek

Jelen munka fókuszában az IR sugárzás faanyagra kifejtett hatásának vizsgálata állt. Ezen a tág témán belül a figyelmet elsősorban a faanyagon belül lezajló nedvesség-áramlásra összpontosítottam. A faanyag modifikálásához egy kísérleti berendezés került kifejlesztésre, amelyben fa próbatesteket hőkezelttem 170°C alatti hőmérsékleten és normál atmoszferikus nyomáson, IR sugárzás egy meghatározott frekvencia-tartományát alkalmazva.

Ezt a technológia azon elven nyugszik, miszerint csak az a típusú sugárzás ad át energiát a besugárzott anyagnak, amely elnyelődik. Olyan spektrális tartományú sugárzást alkalmaztam, amely a faanyag szilárd vázát adó lignocellulóz szerkezeten jelentősebb gyengülés nélkül áthatol, de elnyelődik a fanedvesség víztartalmában. Ilyen spektrális tartomány található a közeli-infravörös (NIR) hullámhossz intervallumban. Bár a NIR spektrális tartományban a lignocellulózok is gerjeszthetők a $-\text{CH}$, $-\text{NH}$ és $-\text{OH}$ csoportok molekularezgéseinek alap és felhangjai révén, de ezek a NIR abszorpciós csúcsok jellemzően egy-két nagyságrenddel kisebbek a nekik megfelelő közép-infravörös (MID) tartományban detektált abszorpciós csúcsoknak. Ugyanakkor, a víz jelentős elnyelési maximummal rendelkezik a NIR régióban, különösen 1900nm közelében.

A faanyag szilárd komponensei, tehát, kevésbé elnyelők a NIR sugárzási tartományban, mint a víz. Ha nedves mintadarabot olyan sugárzásnak teszünk ki, amely spektrális tartománya ebbe a kiemelt NIR régióba esik, azzal hatékonyan hevíthetjük a faanyag nedvességét anélkül, hogy jelentős energiát adnánk át a faanyag szilárd szerkezetének. A beeső sugárzás addig hatol be a fába, amíg az nedvességtől mentes. Ilyen módon, a faanyag nedves részének közvetlenül tudunk hőenergiát átadni, függetlenül attól, hogy a jó hővezető tulajdonságú víz a felületi rétegekből már eltávozott, és így ott lecsökkent a faanyag átlagos hővezető-képessége. Ezzel a felület kiszáradásával együtt járó száradási sebességcsökkenés elkerülhető.

A berendezés hatékonysága és a végeredmény minősége elsősorban az IR sugárzó panelektől és a kemencéhez alkalmasan választott anyagok optikai tulajdonságaitól függ. A kísérletekben lucfenyő (*Picea abies* [L.] Karst) mintadarabokat hőkezelttem. Az itt bemutatott hőkezelő eljárás bármely típusú faanyaghoz alkalmazható.

Következtetések és Tézisek

Munkám során az IR sugárzás hatására a faanyagban végbemenő száradás mechanizmusát vizsgáltam makroszintű hőmérséklet- és nedvességmérés segítségével. Az elvégzett mérések és kiértékelésük alapján a következő megállapításokat tehetjük:

1. Egy új megközelítést alkalmaztam az IR sugárzás hatására végbemenő hő- és anyagtranszport mechanizmusára. IR kezelés hatására a faanyagban lévő folyadék fázisú víz, a vizes oldatokra nézve féligáteresztő szerkezetű sejtfaalon keresztül, egy ozmotikus mechanizmus során gőz fázisba megy át.
 - A mintadarabok magjában detektált hőmérséklet stagnálásból arra következtettem, hogy a mag hőmérsékletprofiljának hirtelen megváltozása a minta belsejében folyamatos IR sugárzással átadott hő hatására bekövetkező fázisátalakulással függ össze. Az alkalmazott hőmérsékleten az egyetlen, lehetséges fázisátalakulás a folyadék víz gőzfázisúvá válása.
 - A maghőmérséklet hirtelen megállása a víz forrására utal. Ezek szerint a víz forrásának $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt kell elkezdődnie, ami az atmoszferikusnál alacsonyabb nyomást feltételez.
 - A száradási folyamat az IR besugárzás hatására már a hőkezelés elején elkezdődik. A forrásnak a mintadarab belső régióiban és nem a felületen kell elkezdődnie, mivel a kezdeti felületi nedvességtartalom hamar kiszárad, ezért nincs lehetőség atmoszferikus alatti nyomás létrejöttére. A párhuzamos hőmérséklet és nedvességmérések alapján, a felületi hőmérséklet nem feltétlenül érte el a víz természetes forráspontját, amikor a maghőmérséklet stagnálása már elkezdődött. Tehát, a felületi rétegben nem forrhat a víz atmoszferikus nyomáson, amikor a mag stagnálása már detektálható.
 - Tekintetbe véve a hőkezelő kemencében uralkodó atmoszferikus nyomásvi-szonyokat, feltételezhető, hogy legalább egy határrétegnek léteznie kell, ami megakadályozza a kiegyenlítődést a kemence atmoszferikus nyomása és a belsőbb rétegekben uralkodó atmoszferikus alatti nyomás között. A sejtfa-lat egy ilyen határrétegnek tekintjük.

- Mivel az IR sugárzás hatására először a felületi rétegek száradnak ki, így ezekben a régiókban a nedvességtartalom oldott anyag koncentrációja megnövekszik, és ezzel egy koncentráció különbség alakul ki a mag és a felületi régiók között. Következésképpen, a külső régiók vizet vonnak el a sejtfalakon keresztül a belső sejtekből a koncentráció különbség hatására. Amennyiben a sejtfalak csak a víz molekulákat engedik át, és az oldott anyagokat nem, úgy a sejtfal két oldala közötti koncentráció különbség egy ozmózis nyomást eredményez. Az atmoszferikus alatti nyomás a víz ozmózissal történő evakuálása során jön létre.
 - Az ozmózis a féligáteresztő sejtfalakon keresztül történik. A két oldala közti koncentráció különbség eredményezi a víz ozmotikus mozgását a híg magból a nagyobb oldott anyag koncentrációjú felület irányába. Ahogy a nedvesség kiáramlik a középső régiókból, szimmetrikusan mindkét irányba, az elhagyott üregek betöltetlenül maradnak; ezért a nyomás lokálisan lecsökken. A lecsökkent nyomás hatására gyorsabban elpárolog a belső nedvesség, így elfogy a folyadék víz és ez az ozmózis megszűnését eredményezi.
2. Azzal az általános nézettel szemben, hogy az IR csak felületi melegítésre alkalmas, a kísérletek igazolták, hogy a faanyag belseje is jól melegíthető. Ennek oka, hogy az alkalmazott sugárzás hullámhosszát a lignocellulózok nem, vagy kevéssé nyelik el, szemben a vízzel, ami lokális abszorpciós maximummal rendelkezik ebben a tartományban. A lignocellulózoknak, tehát, az alkalmazott IR sugárzásra nézve áteresztőnek kell lenniük. Ugyanakkor a száradás elősegítéséhez szükséges, hogy a víz molekulák ugyanebben a tartományban nagy abszorpcióval rendelkezzenek. Ezáltal a mélyebb rétegekben lévő víz folyamatos hevítése biztosított akkor is, amikor a felületi rétegek már kiszáradtak. Így a hőátadás közvetlenül a vízmolekuláknak történik kiküszöbölve a kiszáradt rétegek hőszigetelő hatását. Továbbá a felület túlhevítésének gyakori problémája is elkerülhető.
- A keresztmetszeti nedvesség eloszlásokat összehasonlítva azt tapasztaltam, hogy a légszáraz régió folyamatosan növekedett a felülettől kiindulva, miközben a központi régió még a leghosszabban szárított szeletben is aránylag magas nedvességtartalommal rendelkezett. Ahhoz, hogy ezt a nedvesség eloszlásnak a teljes keresztmetszetre nézve nem-parabolikus jellegét meg tudjam magyarázni, a víz és a lignocellulózok eltérő abszorpciós tulajdonságait kell figyelembe venni. Az a sugárzás, ami áthatol a lignocellulózra, elnyelődik az üregekben található vízben.
 - Azokban a régiókban, ahol a hőelnyelés a legintenzívebb, egy aránylag mere-

dek nedvességtartalom ugrás jelentkezik a száraz és a nedves régiók között. Ez a nedvesség tartalom ugrás halad a besugárzással a mag felé. A mozgásának dinamikáját mutatják a különböző magasságoknál felvett nedvesség profilok. A nedvesség ugrás mozgásából a száradás dinamikájára lehet következtetni.

- Nem tapasztaltam a száradás sebességének drasztikus változását a mintadarabok kiszáradásával párhuzamosan. Az expozíciós idő függvényében ábrázolt nedvesség profilok a belső régiók egyenletes száradási sebességét tükrözik. Az elért egyenletesség a száradási sebességben a hőátadás sugárzásos jellegére utal.
3. A besugárzási intenzitás és a minták kezdeti nedvességtartalma kiemelkedő hatással bír a száradás dinamikájára, így jelentős paraméter a szárítási technológia optimalizálása szempontjából.
- Ozmózis csak folyadék fázisok között léphet fel. Mivel a rosttelítettségi határ alatt is van ozmózisra utaló változékonyság a magban detektált hőmérséklet görbék alakjában, a stagnálási hőmérséklet szempontjából, arra következtetem, hogy a faanyagban ennél alacsonyabb átlagos nedvességtartalomnál is rendelkezésre kell állnia az ozmózishoz szükséges folyadékvíznek, lokálisan a magban. A kezdeti nedvességtartalom rosttelítettségi határ alá csökkenésével az ozmotikus folyamathoz tartozó idő hossza rövidül le. A faanyagban, tehát, rendelkezésre kell állnia szabad víznek még az rosttelítettségi határ alatti nedvességtartalomnál is. Ez biztosítja az ozmózis létrejöttéhez szükséges folyadék vizet.
 - Megállapítható, hogy a száradási sebesség nem növelhető egy adott határon túl. Van a nedvesség áteresztésének egy maximális értéke, ami a sejteken belüli nyomás növelésével elérhető. Habár, a hevítési intenzitás növelésével a sejtekben kialakuló belső nyomás is növekszik, de ezzel nem lineárisan növekszik a sejtfalon áteresztett nedvesség árama. Amennyiben a belső nyomást a maximális áteresztéshez tartozó érték fölé növeljük, az a sejtek robbanásához, és így a féligáteresztő sejtfal rongálódásához vezethet.
 - Annak érdekében, hogy a repedések kialakulásának esélyét csökkentjük, a faanyagot olyan intenzitással kell hevíteni, hogy a felülete és a belseje közötti hőmérséklet különbséget optimális értéken tartsuk. Ez az optimális érték méréseink szerint $\sim 20^\circ C$ körül van.

Összefoglalás

A faanyag száradási mechanizmusának mennél pontosabb ismerete alapvető fontosságú a szárítási technológiák hatékonyságának fejlesztéséhez. Mivel a faanyagot élő természete miatt *in vivo* nem, vagy csak kisebb pontossággal tudjuk vizsgálni, ezért *in vitro* mérések alkalmazásával teszünk kísérletet a faanyag száradási tulajdonságainak feltérképezésére.

Ebben a munkában makroszkopikus szinten végzett hőmérséklet és nedvességmérések segítségével vizsgáltuk a nedvesség mozgásának dinamikáját IR sugárzásnak kitett faanyagban. A mintadarabok magjában és felületén mért hőmérséklet értékek eredményeiből indultam ki. A maghoz tartozó görbék alakjában 90°C körül következetesen megjelenő stagnálásból arra következtettem, hogy a magban egy fázisátalakulásnak kell lezajlania ezen a hőmérsékleten. A párhuzamos hőmérséklet és nedvességmérések segítségével igazoltam, hogy a folyadék fázisú víz IR besugárzás hatására végbemenő gőzzé válását a fa, vizes oldatra nézve, féligáteresztő szerkezetén át egy ozmotikus folyamat irányítja. Ez a folyamat addig folytatódik, amíg lokálisan egybefüggő, folyadék fázisú nedvesség található a faanyag belsejében.

A nedvesség eloszlás térképek eredményei alátámasztották azt az elméleti következtetést is, hogy az IR nem csak felületi melegítésre alkalmas, hanem használatával a faanyag belseje is jól melegíthető. Ennek oka, hogy a kiválasztott sugárzás hullámhosszát a lignocellulózok nem, vagy kevéssé nyelik el, szemben a vízzel, ami lokális abszorpció maximummal rendelkezik ebben a tartományban.

Továbbá vizsgáltam egyes kísérleti paraméterek változtatásának hatását a mérési eredményekre és így a száradás mechanizmusára. A különböző beállítások mellett felvett hőmérséklet diagramok eredményeiből két fontos következtetést vontam le: Az egyik, hogy a mintadarabokban a rosttelítettségi határnál alacsonyabb kezdeti nedvességtartalomnál is rendelkezésre kell állnia az ozmózishoz szükséges folyadékvíznek, tehát, az eredményekkel igazoltam szabad víz jelenlétét a rosttelítettségi határ alatt. A másik, miszerint a hevítési sebesség növelésével a száradási sebesség nem növelhető egy adott határon túl.

A témában megjelent közlemények jegyzéke

Cikkek:

Cserta, E., G. Hegedűs, and R. Németh (2011) „Drying process in Norway spruce wood exposed to infrared radiation”, *BioResources*, 6(4), 4181-4189.

Cserta, E., G. Hegedűs, and R. Németh (2011) „Osmotic moisture transfer in wood exposed to infrared radiation”, *Wood Research*, 56(4),