



Fa és fa alapú építőanyagok emissziója

PATKÓ Csilla¹, PÁSZTORY Zoltán¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem, Simonyi Károly Kar, Innovációs Központ

Kivonat

A faanyag az egyik legismertebb környezetbarát alapanyag, sejtjei magas részarányban tartalmaznak szenet, melyet a légkör CO₂ tartalmából abszorbeálnak. A faanyag megmunkálási folyamata jelentősen kevesebb energiát igényel, mint más anyagoké, például fémek vagy szilikát bázisú anyagok. A fa alapú lemezek gyártása során alkalmaznak vegyi anyagokat is ragasztóanyagként vagy felületkezelés céljára, melyeknek jelentős az illékony szervesanyag-kibocsátása (Volatile Organic Compounds – VOC). Ezek az anyagok egészségügyi kockázatot jelenthetnek, különösen épületek belső tereiben. A természetes faanyagból is párolognak ki VOC vegyületek, például formaldehid, hexanal vagy terpének. Ez a cikk áttekintést ad a fa alapú építőanyagokból származó VOC anyagok koncentrációinak mért eredményeiről és bemutatja az illékony anyagok, különösen a formaldehid koncentrációjának csökkentésére tett kísérletek eredményeit.

Kulcsszavak: illékony szerves anyagok, VOC, formaldehid, fenol, melamin, emisszió, fa alapú építőanyagok

Emission of wood and wood based products

Abstract

Wood is one of the most environment-friendly raw materials. Wood cells contain a high amount of carbon absorbed from the atmospheric CO₂. Wood as a raw material has a very low demand of energy during manufacturing compared to other materials such as metals or silicate based materials. Wood based products contain chemical materials in the form of adhesives or finishes, etc. These chemicals cause significant emission of volatile organic compounds (VOCs), that could cause health risks, especially in indoor spaces. Natural wood emits VOCs as well, e.g. formaldehyde hexanes or terpenes. This article gives an overview of the measured emissions of VOCs from wood products. Moreover, it presents the results of some experiments aimed at reducing the emission of VOCs.

Key words: volatile organic compounds, VOC, formaldehyde, phenol, melamine, emission, wood based products

Bevezetés

Az elmúlt években jelentős kutatások folytak a magyarországi fahasznosítás, fafeldolgozás területén. Az egyik kutatási cél a környezetbarát gyártási technológiák fejlesztése, a fafeldolgozás környezetkárosító hatásának csökkentése, illetve a termékek ökológiai mérlegének meghatározása és összegyűjtése egy adatbázisba (Molnár és tsai. 2005). A természetes faanyag közismerten az egyik leginkább környezetkímélő nyersanyag. Az alacsony megmunkálási energiaigénye mellett a CO₂ tárolási hatása is jelentős. A fatermékek gyártása során felhasználnak kémiai anyagokat ragasztáshoz, felületkezeléshez. Ezek a többségükben vegyi

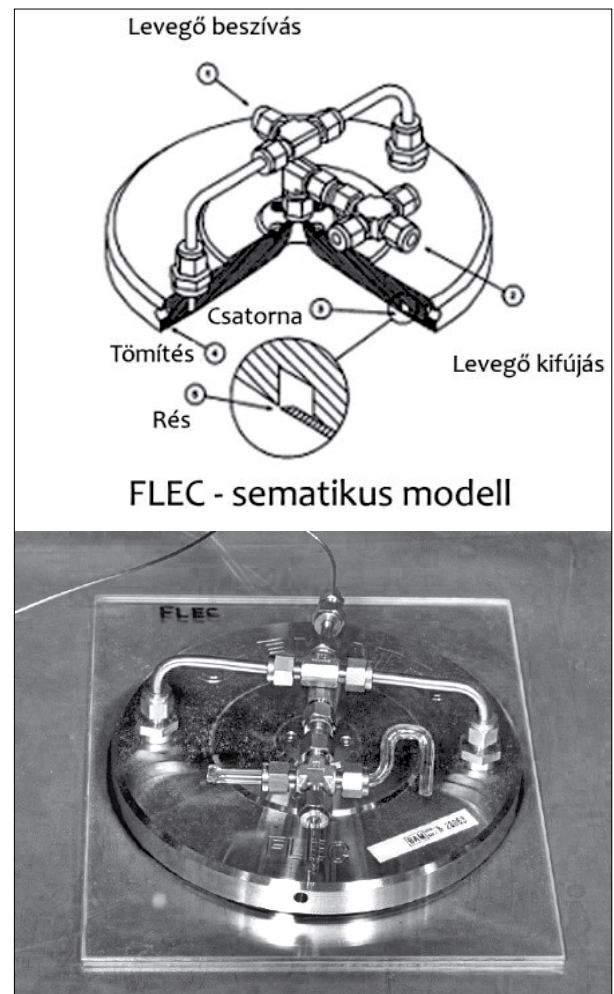
anyagok már esetenként jelentős illékony szervesanyag-emisszióval rendelkeznek.

A kompozit fa alapú anyagok (OSB, forgácslap, MDF, rétegelt lemez, stb.) széles körben elterjedt építőanyagok, melyek fa elemekből és kötőanyagként alkalmazott gyantából vagy más ragasztóanyagból állnak. Összetevőik harmadik csoportját a kötést segítő, szilárdságot növelő, illetve valamilyen más speciális célból bekevert, többnyire kis mennyiségű vegyi anyagok alkotják. Az elmúlt években számos tanulmány foglalkozott az épületekbe beépített kompozit fa alapú építőanyagokból felszabaduló illékony szerves anyagokkal, melyek a beltéri levegőbe távoznak (Guo et al. 2002, Tichenor 1987,

Van de Wal et al. 1990, ECA-IAQ Report No.8 1991, ECA-IAQ Report No.13 1993, Sumin et al. 2006, Ze-Li et al. 2013). Ezek az anyagok lehetnek: terpének, aromás és alifás szénhidrogének, C1–C4 alkáli-benzolok, alkánok, továbbá cyclo-alkánok. A forrásaik főként a ragasztáshoz felhasznált gyanús, és egyéb felületkezelő anyagok (Environment Protection Agency 1996). Világszerte jelentős számú tanulmányban publikálták a formaldehid emissziójának mért koncentrációit különböző típusú épületek beltériében (McGraw-Hill 1999). Az 1. táblázatban mutatjuk be a World Health Organisation (WHO) által megadott formaldehid-koncentráció mért határértékeit beltéri levegőben (WHO 1989).

Tesztkamrás mérések alapján határozzák meg a beltéri levegő minőségét befolyásoló vegyületeket (WHO 2010, ASTM-D6007-96, ECA-IAQ Reports 1993). Az európai országokban 1992-től kezdődően elfogadják, és magukra nézve kötelezővé teszik az ASTM (American Society of Testing and Materials Standard) szabvány alapján történő vizsgálatokat, melyben számos anyag, termék és rendszer műszaki szabályait határozták meg (Sumin 2006). A tesztkamrás mérések célja, hogy már az építőanyagok előállításánál ki lehessen szűrni azon anyagokat, melyek a normákat meghaladó mértékű kipárolgást eredményezhetnek. A laboratóriumi mérések mellett helyszíni esettanulmányokat is készítettek, ezek száma azonban jóval kevesebb. A VOC anyagok forrásainak laboratóriumi és helyszíni detektálására fejlesztették ki (CEC-prENV 13419-2, 1998) a FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) mérőeszközt (1. ábra), mely hordozható, így a helyszínen közvetlen mintavételt tesz lehetővé (Uhde 1998). A mintavétel során a mérőeszközt ráhelyezik a mérni kívánt felületre, melyet légmentesen lehet ráerősíteni.

A mérőeszközhöz erősített levegőszivattyú segítségével áramlik keresztül a levegő. A kiáramló levegőt a mintavételi csőre csatlakoztatják (Tenax TA), mely a levegőből megszüri az illékony szerves anyagokat (Wolkoff 1991). Egyre nagyobb figyelem fordul az egészséges beltéri levegő biztosítására. A publikációban olyan tanulmányokat mutatunk be, melyek a különböző fa alapú építőanyagok károsanyag-emisszióját vizsgálták laboratóriumi környezetben



1. ábra FLEC mérőeszköz
Figure 1 FLEC instrument

1. táblázat A formaldehid-koncentráció különböző országokban (forrás:WHO 1989)

Table 1 Concentrations of formaldehyde in different countries (source: WHO 1989)

Ország	Kutatás	Év	Formaldehid-koncentráció [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Anglia	Building Research Establishment (BRE)	1997–1999	22,2–171
Németország	GerES IV	2003–2006	23,3–68,9
Finnország	EXPOLIS	2003	8,1–77,8
Ausztria	Hutter et al.	2006	25–115
Franciaország	French Observatory on Indoor Air Quality	2003–2005	19,6–86,3
Kanada	Gilbert et al.	2005	9,6–90
Arizona	National Human Exposure Assessment Survey	1999	21–46
Japán	National Institute of Health Sciences	1996	5–600

illetve helyszínen. Továbbá bemutatjuk az illékony anyagok, különösen a formaldehid emissziójának csökkentésére tett kísérletek eredményeit.

Esettanulmányok

MDF, rétegelt és más ragasztott fa alapú lemezek vizsgálatai

Guo és tsai. tanulmányukban (2002) tesztkamrás méréseket végeztek rétegelt lemez, háromféle MDF lemez és forgácslap károsanyag-emissziójának vizsgálatára. A rétegelt lemez és MDF lemez fenol-formaldehid gyantát tartalmaztak. A forgácslap faforgácsból, és 6–8% karbamid-formaldehid (UF) gyantából készült. Külső felületére melammal impregnált papírbevonat került. A tesztkamrás mérések eredményeiből kimutatták, hogy az MDF lapból ($352 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$), és a faforgácslapból ($88 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) távoznak legnagyobb koncentrációban a VOC anyagok. A legalacsonyabb koncentrációkat a rétegelt lemeznél ($65 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$) mérték. Az MDF lapból származott a legmagasabb koncentrációban a formaldehid ($733\text{--}2292 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$), a rétegelt lemezből pedig a legalacsonyabb formaldehid koncentráció ($10\text{--}30 \mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$). A maximális összesített VOC (Total VOC-TVOC) értékek a rétegelt lemezből $64,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a forgácslapból $154 \mu\text{g}/\text{m}^3$, az MDF lapból $408 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2. táblázat).

Egy 2013-as tanulmányban Ze-Li és társai 13 db, különböző méretű, minőségű és korú, fa alapú anyag emisszióját vizsgálták tesztkamrás mérésekkel. A mérések az európai tesztkamrás mérés formaldehid kibocsátás meghatározásáról szóló EN 717-1 szabványnak megfelelően történtek. A méréseket 23°C hőmérsékleten és 45% relatív páratartalom mellett végezték. Az MDF formaldehid koncentrációjának értéke ($0,63 \text{ mg}/\text{m}^3$) magasabb volt a WHO által megengedett értéknél ($0,12 \text{ mg}/\text{m}^3$). A rétegelt lemezek emisszióinál aldehidek, aromás szénhidrogének, terpének (pentanal, hexanal, α -pinén, 3-karén, benzaldehid és nonanal) koncentrációi voltak kiemelkedők. Az MDF-ből ugyanezen anyagok emisszióját detektálták (2. ábra).

2. táblázat VOC és a formaldehid mért koncentrációi (forrás: Guo et al. 2002)

Table 2 VOC and formaldehyde concentrations (source: Guo et al. 2002)

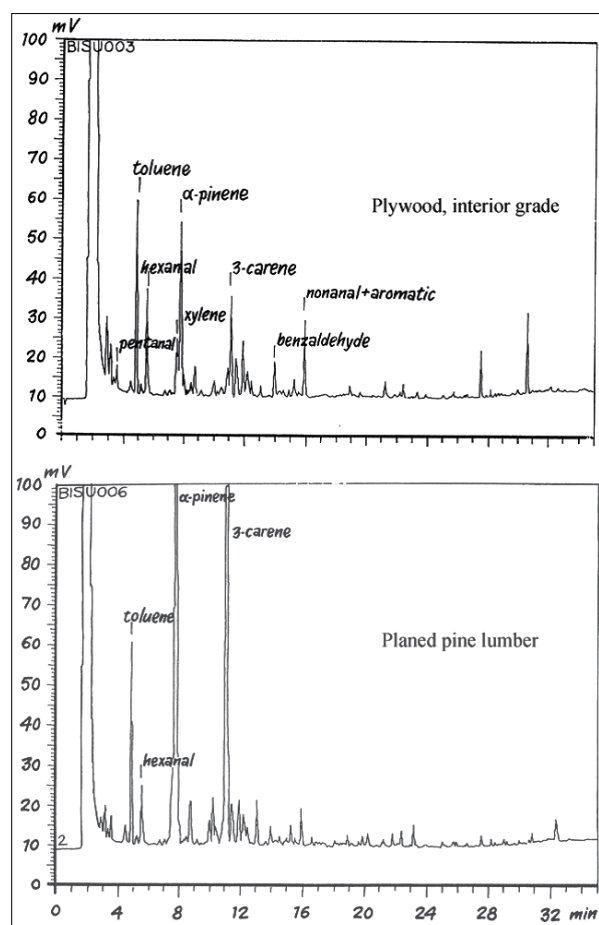
Építőanyag	VOC [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$]	Formaldehid [$\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$]	TVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
MDF	352	733–2292	408
faforgácslap	88	83–1042	154
rétegelt lemez	65	10–30	64,6

A 3. táblázatból látszik, hogy a fenyőnek ($900 \mu\text{g}/\text{m}^3$) és az új faforgácslapnak ($450 \mu\text{g}/\text{m}^3$) voltak a legmagasabb TVOC értékei. A 2 hetes faforgácslapban aldehidek (pentanal, benzaldehid, nonanal) és terpének (alfa-pinén, 3-karén) voltak kiemelkedő koncentrációban (3. ábra). A 10 éves forgácslapban ugyanazok az anyagok voltak detektálhatók, viszont jelentősen kisebb koncentrációban (TVOC= $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ez alátámasztja azt a korábbi feltételezést, hogy a VOC anyagok felszabadulása a fa alapú építőanyagokból idővel csökken.

A legalacsonyabb TVOC értékei a farostlemeznek ($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) voltak. A tanulmányban megállapítják, hogy az MDF és farostlemez hőpréselése során ($180\text{--}220^\circ\text{C}$ között, 5–15 percig) nagy mennyiségben távoznak VOC anyagok és formaldehid. A kész építőlemezekben terpének és aldehidek maradnak vissza.

Az MDF alapanyagainak vizsgálata

Zhongkai és tsai. tanulmányukban (2012) az MDF gyártásának folyamatánál felhasznált



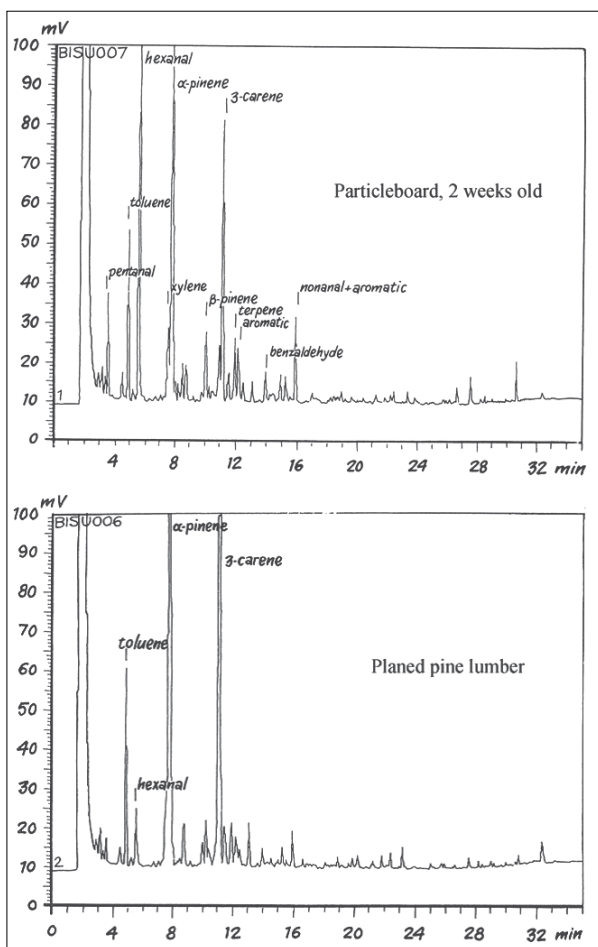
2. ábra Rétegelt lemez és MDF VOC koncentrációinak GC-kromatogramja (forrás: Ze-Li et al. 2013)

Figure 2 GC-chromatogram contained VOC components of Plywood and MDF panels (source: Ze-Li et al. 2013)

3. táblázat Építőanyagok TVOC emissziói, aldehidek és terpének százalékos arányai (forrás: Ze-Li et al. 2013)

Table 3 Percentage ratio of TVOC emissions of building materials (source: Ze-Li et al. 2013)

Faanyag	Vastagság [mm]	TVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Aldehidek [%]	Terpének [%]	Egyéb [%]
kemény farostlemez	3,5	80	4	96	
rétegelt lemez	9	150	8	25	67
MDF	16	110	8	18	74
fenyő	25	900	1	81	18
faforgácslap (2 hetes)	16	450	32	22	46
faforgácslap (10 éves)	12	110	6	19	75



3. ábra Faforgácslemez és fenyő fűrészelt fa VOC koncentrációinak GC-kromatogramja (forrás: Ze-Li et al. 2013)

Figure 3 Figure 3 GC-chromatogram contained VOC components of particleboard and planed pine lumber (source: Ze-Li et al. 2013)

anyagok (KF gyanta, farost, PF gyanta, kész MDF) emisszióit mérték tesztkamrában. A gyártási folyamat során a faaprítékot rostosítják, majd KF gyantával összekeverik. A keveréket szétterítik, előpréselik, előkészítik a hőpréseléshez, szárítják, tömörítik, ragasztják, lehűtik, és csiszolják. A tesztkamrás mérések eredményeiből kimutatták, hogy a fa alapanyag

formaldehid-koncentrációja jóval alacsonyabb a kész MDF lapnál mért koncentrációnál. Miután összekeverték a farostot a KF gyantával és előpréselték, csökkent a formaldehid emissziója, feltehetően a préselés hatására. A hőpréselés után is jelentős csökkenés következett be a formaldehid-emisszióban. A KF és PF gyanták formaldehid-koncentrációja nagymértékben eltér egymástól, a KF gyantának tízszeres a koncentrációja a PF gyantához képest. Ennek magyarázata, hogy a KF gyantában létrejövő reakció a karbamid és formaldehid között reverzibilis folyamat, emiatt több szabad formaldehidet tartalmaz (Kumar és Sood 1990). Míg a PF gyantában több aktív fenolcsoport tud a formaldehiddel reakcióba lépni (Salthammer et al. 2010). A vizsgálat konklúziója: a hőpréselés hőmérsékletének emelésével a gyanta formaldehid-tartalmát lehet szabályozni a leghatékonyabban. A hőpréselés hőmérsékletének emelése viszont a fizikai tulajdonságok romlásához járulhat hozzá.

A fa építőanyagok szárítása és hőkezelése során mérhető emissziók

Több tanulmány is foglalkozik a faanyagok szárítása és hőkezelése hatására történő kémiai változásokkal (McGraw és tsai 1999, Lavery és Milota 2000, Milota 2000, Kotilainen 2000, Shi és tsai. 2007, Peters és tsai. 2008, Ahajji és tsai. 2009, Hyttinen és tsai. 2010, Heigenmosera és tsai. 2013). A fa fő alkotó eleme a cellulóz, a hemicellulóz és a lignin. A hőkezelési eljárást a faanyag tulajdonságainak módosítására alkalmazzák (160–240 °C), ezzel növelve tartósságát, javítva esztétikai megjelenését, és csökkentve a nedvesség hatására fellépő deformáció mértékét. Egyik legjellemzőbb hatása a fa színének megváltozása (sötétedése), illetve nem kívánt hatása a fa szilárdságának csökkenése. Finnországban már az 1920-as évektől tanulmányozták és fejlesztették az eljárást. Mivel ehhez az eljárás-



hoz nem használnak semmilyen kémiai anyagot, egy lehetséges környezetbarát eljárásnak tekintették a faimpregnálás mellett. Az így létrejött fa építőanyagot nemcsak szerkezeti építőanyagként használják, hanem esztétikai hatása miatt belsőépítészeti elemként is (padlóburkolat, nyílászáró, stb.). Az új tulajdonságok nagyban függenek magától a fafajtól, annak eredeti kémiai összetételétől és sejtsztruktúrájától. A hőkezelés alatt illékony szerves anyagok (VOC) szabadulnak fel. A hődegradációra a hemicellulóz reagál a legérzékenyebben (<200°C) (Heigenmosera és tsai. 2013).

Manninena és tsai. tanulmányukban (2002) a hidrotermikus eljárás hatását vizsgálták fenyő faanyag esetén. A tanulmányban hőkezelt és szárított faanyagokból kibocsátott VOC anyagok koncentrációját hasonlították össze. A szárított fából hétszer magasabb a TVOC anyagok koncentrációja, mint a hőkezelt fából. A terpének 77%-át, míg az aldehidek 20,9%-át képezték a teljes TVOC koncentrációnak. Alacsony koncentrációban voltak jelen az alkoholok, ketonok és aromás szénhidrogének, míg alifás szénhidrogéneket nem detektáltak (4. táblázat). Összesen 41 féle illékony szerves anyagot azonosítottak, amiből 14 volt azonos a két eljárásnál. A szárított fánál a terpének közül az alfa-pinén, a 3-karén, az aldehidek közül pedig a hexanál volt kimutatható. A hőkezelés alatt a hemicellulóz degradálódásának hatására ecetsav keletkezik. A hőkezelt fánál az aldehidek, a karbonsavak és a ketonok közül a furfurool, az ecetsav és a 2-propanon tette ki a TVOC értékének 60%-át. Összegzésként megállapították, hogy az illékony anyagok nagy része az eljárások során elpárolog.

4. táblázat VOC anyagok mért koncentrációjának százalékos aránya (forrás: Manninena et al. 2002)

Table 4 Percentage ratio of VOC substances (source: Manninena et al. 2002)

Vegyületek	Légszárított fa [%]	Hőkezelt fa [%]
Alkoholok	0,28	5
Aldehidek	20,9	34,54
Ketonok	0,55	16,2
Alifás szénhidrogének	0,05	1,82
Aromás szénhidrogének	0,38	2,11
Terpének	77	9,69

Egy másik tanulmány (Hyttinen és tsai. 2010) három fafaj – a lucfenyő (*Picea abies*), az erdefenyő (*Pinus sylvestris*) és a rezgőnyár (*Populus tremula*) – hőkezelt és szárított változatait hasonlította össze tesztkamrás mérésekkel egy hónapon keresztül. Eredményeikben szintén kimutatták, hogy a hőkezelt fából jóval alacsonyabb VOC kipárolgást mértek, mint a szárított fánál. A terpének kipárolgása a hőkezelt fánál nem volt jelentős (6. táblázat), viszont aldehidek (furfurool és hexanál) és karbonsavak (ecetsav) kipárolgása volt a domináns (5. táblázat).

Összegzésként a hőkezelt fánál a VOC kipárolgás jóval alacsonyabb, mint a kezelés előtt. Ez egybehangzik más tanulmányok eredményeivel is (Peters és tsai. 2008). Megállapították, hogy a hőkezelt fatermékek nem befolyásolják a beltéri levegő minőségét.

5. táblázat Emittált aldehidek és karbonsavak ($\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$) rátája szárított és hőkezelt rezgőnyárból, lucfenyőből, és erdefenyőből (forrás: Hyttinen és tsai. 2010)

Table 5 Specific emission rates of organic acids and aldehydes ($\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$) from air-dried and heat-treated European Aspen, Norway Spruce and Scots Pine. (source: Hyttinen et al. 2010)

Fafajta	Mintavétel ideje	
	2 nap $\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$	28 nap $\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$
Nyárfá (szárított)	448	479
Nyárfá (hőkezelt)	105	224
Lucfenyő (szárított)	25	20
Lucfenyő (hőkezelt)	77	61
Fenyő (szárított)	38	73
Fenyő (hőkezelt)	40	79

6. táblázat Emittált aldehidek és karbonsavak ($\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$) rátája szárított és hőkezelt rezgőnyárból, lucfenyőből, és erdefenyőből (forrás: Hyttinen és tsai. 2010)

Table 6 Specific emission rates of terpenes ($\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$) from air-dried and heat-treated Norway Spruce and Scots Pine. (source: Hyttinen et al. 2010)

Fafajta	Mintavétel ideje	
	2 nap $\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$	28 nap $\mu\text{gm}^{-2\text{h}^{-1}}$
Lucfenyő (szárított)	340	150
Lucfenyő (hőkezelt)	26	4
Fenyő (szárított)	1698	818
Fenyő (hőkezelt)	19	9

A relatív páratartalom és a légcsere hatása a beltéri levegő formaldehid-koncentrációjára

Reponen és társai 1991-ben egy esettanulmányban az építőanyagok előregedésének és az évszakok változásának hatását vizsgálták a beltéri levegőben mérhető formaldehid koncentrációjára. A méréseket három egyforma, újépítésű épületben végezték, amelyek egyedül a szellőztetési rendszereikben különböztek. Az első épület természetes szellőztetésű volt, a második gépi elszívású, a harmadik gépi elszívású és visszatáplálású. A méréseket a lakók beköltözése előtt kezdték, és a beköltözés után két évig folytatták. A hőmérséklet 20,6–25,7 °C között, míg a relatív páratartalom 16,8–79,6% között változott. A formaldehid legfőbb forrása az építőanyagok között a forgácslap volt, melyet a szekrényekhez és tárolókhoz alkalmaztak. A formaldehid koncentrációja a három lakásban 0,02–0,21 mg/m³ értékek között mozgott. Mindegyik esetben a mérések kezdeténél volt a legmagasabb a formaldehid-koncentráció, és a három típus közül az elsőnél (természetes szellőzés) volt a legkiemelkedőbb. Hároméves időintervallumban figyelték az építőanyagok előregedésének hatását a formaldehid-kibocsátás mértékének változásával. Megállapították, hogy az értékek folyamatosan csökkentek a kezdeti koncentráció felére a mérési időtartam során. A leggyorsabb csökkenés a harmadik típusnál volt megfigyelhető, ahol az elszívott levegővel azonos mennyiségű friss levegőt tápláltak be. Az évszakok figyelembevételével a formaldehid mért koncentrációja télen volt a legalacsonyabb. Mivel az évszakok hatással vannak a beltéri levegő hőmérsékletére és relatív páratartalmára, valószínűsíthetően ezek a légparaméterek és a változó légcsere is befolyásolhatták a formaldehid-szint változását.

Újrahasznosított fa alapú építőanyagok vizsgálata

A fa alapú építőanyagok VOC emissziója függ a fa alapanyagtól. A kemény fa, mint például a bükkfa és a tölgyfa nagyobb koncentrációban bocsát ki ecetsavat és hangyasavat, viszont kevesebb terpént bocsát ki. A puha fáknál (pl. lucfenyő) ez az arány fordított, legmagasabb koncentrációban az α -pinén, a β -pinén, a 3-karén távozik (Risholm-Sundman 1998). Továbbá a kipárolgás mértéke függ a fa életkorától, a kivágásának idejétől (Roffael 2006). A természetes fa is tartalmaz VOC anyagokat, amelyeket figyelembe vesznek a TVOC meghatározásánál.

Egyre több országban fektetnek hangsúlyt az anyagok újrahasznosítására (reuse), amelyben nagy sze-

repet kap a fahulladék kiválogatása, feldolgozása és nyersanyagként való újra felhasználása (recycling), főként kompozit falemezekben, burkolatok, bútorok, válaszfal-elemek formájában. A folyamatban nem szabad figyelmen kívül hagyni a fahulladéknak a lehetséges maradék formaldehid kipárolgását a karbamid-formaldehid (KF), melamin-formaldehid (MF), fenol-formaldehid (PF) gyanta tartalmából. A fa alapanyaggal bekerült korábban felhasznált ragasztók és az aktuális ragasztási eljárásban alkalmazott ragasztók kipárolgása összeadódhat, emelve az adott termék összkibocsátási értékét.

A fa alapú építőanyagok károsanyag-emissziójának csökkentésére folyamatosan végeztek vizsgálatokat az elmúlt évtizedekben, például a nem formaldehid alapú gyanták használata, az alacsonyabb moláris tömegű UF gyanta használata, a préselési hőmérséklet hatása (Minemura 1976, Wang et al. 2003) témákban. Több országban hoztak létre az alacsony emissziójú és újrahasznosított anyagok fejlesztésére ún. „zöld” értékelő rendszereket. Ezek közül kiemelkedőek: az angol Épület Kutató Intézet Környezeti Értékelési Módszer (BREEAM), az ausztrál Zöld Csillag, a japán Épület Környezeti Hatékonyság Összesítő Értékelési Rendszer (CASBEE), a kanadai Épület és Környezeti Hatás Értékelő Kritériumok (BEPAC), és az amerikai Energetikai és Környezeti Tervezési Irányelvek (LEED) (Sumin 2010).

Fa alapú építőanyagok VOC és formaldehid emissziójának csökkenése

Song-Yung és munkatársai 2007-es tanulmányukban alacsony emissziójú forgácslap előállítását tanulmányozták újrahasznosított MDF lapokból. Ragasztóként vízbázisú PF gyantát, és PMDI (Polymeric 4, 40-metil-difenil izocianát) gyantát használtak, felületére pedig MF gyantával impregnált papírt. A PMDI egy aromás izocianát, poliuretán előállításához használják. A világon ez a legelterjedtebb izocianát, évente 5 millió tonnát állítanak elő belőle. A legkevésbé veszélyes izocianátnak számít, de bizonyos esetekben okozhat irritációt.

A mérések eredményeiből kimutatták, hogy a formaldehid-koncentráció lineárisan csökkent a növekvő PMDI/PF aránnyal. Továbbá az MF impregnált papírfelület is csökkentette a formaldehid kipárolgást. A tanulmány konklúziója, hogy a PMDI gyanta használata előnyösen befolyásolja a formaldehid kipárolgást. Feltételezhetően a PMDI molekulák vízzel való reakciójának eredményeként keletkező aminok újra reakcióba lépnek PMDI molekulákkal, így létrehozva polimereket (Wendler



és Frazier 1995). Továbbá a PMDI/PF arányának emelése jelentősen növelte az MDF lemez belső kötési szilárdságát.

„Bake-out” eljárás a VOC emisszió csökkentésére

Több tanulmányban is bemutatják az ún. „bake-out” (kiégetés) eljárást (Sumin et al. 2010), melynek során az épület légterében 32–40 °C-ra emelik a beltéri levegő hőmérsékletét, valamint gyorsítják a légcserét. Ennek eredményeképpen a beltérben található bútorok, építőanyagok VOC kipárolgását jelentősen meggyorsítják. Az egész eljárás két hetet vesz igénybe. Néhány kísérleti tanulmány azt mutatja, hogy ezzel 60–94%-os csökkenést tudtak elérni a VOC anyagok koncentrációiban.

Természetes gyanták használata

Több kísérlet született a fa alapú lemezek (MDF, forgácslap, rétegelt lemez, stb.) gyártásánál környezetbarát gyanta alkalmazására, KF és MF gyanták helyettesítésére. Fő cél a különböző fa alapú padlóburkolatok formaldehid és VOC anyagok kipárolgásának csökkentése (laminált fa padló, többretegű parketta) volt. A laminált fa padló (HDF) nagy sűrűsre préselt farostból készül, míg a többretegű, ragasztott fa padló KF és MF gyantával ragasztott fa elemekből. Ezeknek a ragasztóknak az az előnye, hogy nagyon magas a kötőszilárdságuk és alacsony a bekerülési költségük.

Sumin 2009-es tanulmányában a természetes és megújuló csersavat használta ragasztóként. Három fő forrása a Mimosa, a Quebracho és a Monterey fenyő volt. Főbb tulajdonságai: hőre keményedő, szobahőmérsékleten folyós, jó a ragasztó képessége, víztaszító. A kísérlet során 40%-os, vizes csersavkivonatot készítettek. Ehhez az oldathoz 8% paraformaldehidet keverték a száraz csersavkivonat arányában. A kapott csersav ragasztóhoz további PVAc-t (polivinil-acetát) adagoltak 5, 10, 20, 30% arányban. A természetes csersav felületi tapadóképesége nem elegendő a megfelelő kötéshez. Viszont a PVAc adalékkal ez a tulajdonsága jelentősen növekedett. Hús százalékos PVAc tartalom után ez a növekedés megállt. A PVAc hozzáadásával a formaldehid-kipárolgás nem emelkedett.

Természetes adalékanyagok használata

Egy másik sikeres megoldás a formaldehid kipárolgásának csökkentésére, amikor vulkáni tufát (pozzolán) adtak MDF laphoz (Sumin 2009a), és figyelték a fizikai-mechanikai tulajdonságok változását. A pozzolán egy vulkanikus eredetű, termé-

zetes anyag. Ez a legősbibb adalék, amit agyaghoz adagoltak építőanyag előállításának a céljára. A görög Santorini-szigeten található egy nagy kiterjedésű pozzolán lelőhely. A mai napig használják építőanyagok, pl. beton előállításánál (Turanli et al. 2004). Nagyfokú szilárdságot és tartósságot kölcsönöz a betonnak (Davraz and Gunduz 2005). A pozzolán gazdag szilícium-oxidban (SiO₂) és alumínium-oxidban (Al₂O₃), porózus szerkezetű, nagy mennyiségben tartalmaz abszorbeált vizet (Ramirez et al. 2006). Ezzel a tulajdonságával képes elnyelni az MDF-ben lévő VOC anyagokat. A pozzolánt a KF gyantához adagolták az MDF gyártása során. Növekvő pozzolán tartalommal az MDF fizikai és mechanikai tulajdonságai nem változtak jelentősen, viszont a formaldehid és TVOC koncentrációja csökkent (7. táblázat).

Egy másik, megújuló anyagnak számító anyag a kesudió ipari feldolgozásából származó melléktermék, a kesudió héjának folyadék (Cashew nut shell liquid-CNSL) (Sumin 2010). Közel 1 millió tonna termelődik belőle évente. Ez egy vöröses, viszkózus folyadék, ami a kesudió héjában található, annak egyharmadát teszi ki. Több kutatás vizsgálta kémiai tulajdonságait (Bhunja et al. 1999). Négy fő komponensből áll: 3-pentadecén fenol (kardanol), 5-pentadecén rezorcinol (kardol), 6-pentadecén szalicil sav (indusdió sav), 2-metil 5-pentadecenyl rezorcinol (2-metil kardol). A szintetikus gyanták helyettesítéséül szolgálhat, a formaldehid-emissziója feltételezhetően alacsonyabb a KF gyanta formaldehid-emissziójánál. A CNSL-formaldehid (CF) és PVAc keveréke – hasonlóan az előzőekben leírtakhoz – jóval magasabb kötési szilárdságot eredményez, és alacsonyabb formaldehid-kipárolgást. A CF/PVAc gyantát környezetbarát ragasztóként sikeresen használják ragasztott, fa alapú építőanyagok gyártásánál.

7. táblázat TVOC és formaldehid koncentrációja MDF lapban növekvő pozzolán arány mellett (forrás: Sumin 2009)

Table 7 Formaldehyde concentration of MDF board depending on pozzolan ratio (source: Sumin 2009)

Pozzolán [%]	Formaldehid [mg/m ² h]	TVOC [mg/m ² h]
0	1,27	3,7
1	0,94	2,42
3	0,5	1,97
5	0,27	1,6
10	0,18	1,47

Más természetes anyagokkal is sikeresen csökkentették a formaldehid-kipárolgást, többek között az üvegpor, szervesetlen sók, és aminosavak (vízben oldódó sók) felhasználásával adalékszerként (Kim et al. 2006). A porózus adszorberek is hatékonyan csökkentik a VOC emissziót. Például az újrahasznosított bambusz faszén – melyet Koreában a gin készítéséhez használnak – alacsony bekerülési költsége miatt is jó megoldásnak számít (Park et al. 2004).

Összegzés

A fa alapú építőanyagok vizsgálatával egyre több tanulmány foglalkozik, részben a faanyag saját VOC kibocsátása, részben pedig az adalékként megjelenő vegyi anyagok emissziója miatt. Az egészséges otthonok egyik fontos kritériuma a tiszta levegő, amelyet az illékony szerves vegyületek jelentős mértékben befolyásolnak. A fenti esettanulmányokból látható, milyen széleskörű kutatói aktivitás nyilvánul meg e témában. Ezek egy része a fellépő emisszió mértékét vizsgálja, egy másik része az emisszió mérséklésének módszereit kutatja. A kompozit falemezek károsanyag-kipárolgásainak adatai szoros összefüggést mutatnak a felhasznált anyagok kvalitatív és kvantitatív értékeivel. A rétegelt lemez gyártása során felhasznált fenol formaldehid gyanta részaránya jelentősen alacsonyabb, mint az MDF lapban, ennek megfelelően az emissziós értékek is alacsonyabbak. A tanulmányok alapján egy másik fontos megállapítás, hogy az emisszió a beépítés után folyamatosan csökkent, 10 éves viszonylatban a forgácslap TVOC koncentrációja negyedére redukálódott.

A kompozit fatermékek újrahasznosítása során a VOC kibocsátást eredményező anyagok is beépülnek az új termékbe, így a kibocsátás folytatódhat, sőt össze is adódhat az új termék ragasztásához használt ragasztóanyagok károsanyag-emissziójával. A hőmérséklet és a páratartalom jelentős befolyást gyakorol a kibocsátási értékekre. Magas hőmérséklethez magasabb emissziós értékek tartoznak. A „bake out” technikával jelentősen mérsékelhető az épületekben fellépő károsanyag-emisszió.

Az egyre elterjedtebb „passzív ház” technológiák alkalmazása esetében figyelembe kell venni, hogy az épület természetes szellőzése a magas szigeteltség miatt rendkívül alacsony, így a beltérben a VOC anyagok koncentrációja növekedhet. Ezekben az épületekben a mesterséges szellőztetés hatékonyságára nagy figyelmet kell fordítani.

Magának a faanyagoknak is van természetes VOC kibocsátása. A fafaj nagy mértékben meghatározza a kibocsátott anyagok típusát és mennyiségét. Elkülönülnek ezen a téren a gyantatartalmú fenyők és a különféle savtartalmú keménylombosok. A természetes faanyag hőkezelése során aldehid, karbonsavak és ketonok (furfurol, ecetsav és 2-propanon) teszik ki a TVOC értékének 60%-át. A monoterpének szobahőmérsékleten alacsonyabb koncentrációban emittálódnak a hőkezelt fából. A szárított fenyőből származó terpének – limonén, alfa-pinén, 3-karén – magas koncentrációban a légzőszervek irritációját okozhatják, alacsony koncentrációban viszont az asztma tüneteinek csökkentésére használják.

A másik fő kutatási irány az emissziós értékek csökkentése természetes adalékanyagok segítségével. A formaldehid kiváltása egy igen fontos kérdés és sok kutatásnak adott és ad a jövőben is lehetőséget a vizsgálatokra. A természetes gyanták használata várhatóan jelentős fejlődés előtt áll, különösen a gazdaságosságukat tekintve.

A káros anyagok emissziós határértékei feltehetően szigorodni fognak az Európai Unió országokban, ezért a kutatók a jövőben egyre nagyobb kihívásokkal szembesülnek az egészséges környezet biztosítása, a fenntartható fejlődés, és a gazdaságos termelés hármasszögének egyensúlyban tartásához.

Köszönetnyilvánítás

Ez a tanulmány 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

- Ahaji A, Diouf PN, Aloui F, Elbakali I, Perrin D, Merlin A, George B (2009) Influence of heat treatment on antioxidant properties and colour stability of beech and spruce wood and their extractives, *Wood Science and Technology* 43 69–83.
- ASTM-D6007-96, Standard Test Method for Determining Formaldehyde Concentrations in Air from Wood Products Using a Small Scale Chamber (1996)
- Bhunia HP, Nando GB, Basak A, Lenka S, Nayak PL (1999) Synthesis and characterization of polymers from cashew nut shell liquid (CNSL), a

- renewable resource, III. Synthesis of a polyether, *Eur. Polym. J.* 35, 1713–1722
- Breuer H (1995) *SH Atlasz-Kémia* Springer Verlag, ISBN 963 8455 68 3, pp. 264–369
- BS EN 717-1 (2004) wood-based panels. Determination of formaldehyde release, Formaldehyde emission by the chamber method.
- Davraz M, Gunduz L (2005) Engineering properties of amorphous silica as a new natural pozzolan for use in concrete, *Cem Concr Res* 35 (7): 1251–1261
- ECA-IAQ Report No.2 (1989) Guideline for the determination of steady state concentrations in test chambers, Luxembourg
- ECA-IAQ Report No.8 (1991) Guideline for the characterization of Volatile Organic Compounds Emitted from Indoor Materials and Products Using Small Test Chambers, Brussels
- ECA-IAQ Report No.13 (1993) Determination of VOCs emitted from indoor materials and products—inter laboratory comparison of small chamber measurements, Brussels
- EPA (Environmental Protection Agency) (1996) Sources and factors affecting indoor emissions from engineered wood products: summary and evaluation of current literature. EPA-600/R-96-067. North Carolina: Research Triangle Park
- Guo H, Murraya F, Lee SC (2002) Emissions of total volatile organic compounds from pressed wood products in an environmental chamber, *Building and Environment* 37 (2002) 1117–1126
- Heigenmosera A, Liebnerb F, Windeisen E, Richtera K (2013) Investigation of thermally treated beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) by means of multifunctional analytical pyrolysis-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 100 (2013) 117–126
- Hyttinen M, Masalin-Weijo M, Kalliokoski P, Pasanen P (2010) Comparison of VOC emissions between air-dried and heat-treated Norway spruce (*Picea abies*), Scots pine (*Pinus sylvestris*) and European aspen (*Populus tremula*) wood. *Atmospheric Environment* 44 (2010) 5028–5033
- Kim S, Kim HJ, Kim HS, Lee HH (2006) Effect of bio-scavengers on the curing behavior and bonding properties of melamine-formaldehyde resins, *Macromolecular Materials and Engineering* 291, 1027–1034
- Kotilainen R (2000) Chemical changes in wood during heating at 150–260°C. University of Jyväskylä, Department of Chemistry, Doctoral thesis, Research Report No. 80, 57pp.
- Kumar A, Sood A (1990) Modeling of polymerization of urea and formaldehyde using functional-group approach. *Journal of Applied Polymer Science*; 40: 1473–1486
- Lavery MR, Milota MR (2000) VOC emissions from Douglas fir: comparing a commercial and a laboratory kiln, *Forest Products Journal* 50, 39–47
- Manninen A, Pasanen P, Holopainen JK (2002) Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated Scots pine wood. *Atmospheric Environment* 36 (2002) 1763–1768
- McGraw-Hill (1999) *Genium's handbook of safety, health, and environmental data for common hazardous substances*, New York, NY
- McGraw GW, Hemingway RW, Ingram Jr LL, Canady CS, McGraw WB (1999) Thermal degradation of terpenes: camphene, D3-carene, limonene, and α -terpinene. *Environmental Science and Technology* 33, 4029–4033
- Milota MR (2000) Emissions from wood drying, The science and the issues, *Forest Products Journal* 50, 10–20
- Minemura N (1976) To lessen formaldehyde liberation from the urea resin glued plywood, *Wood Industry* 31 (12):8–12
- Molnár S (2005) szerk.: Erdő- és fahasznosítás Magyarországon, NyME Erdészeti Tudományos Intézet, 344 o.
- Park SB, Kim SW, Park JY, Kim JI, Mun SP, Jun JM (2004) VOC Adsorption and Physico-Mechanical Properties of Wood Flour-Plastic-Bamboo Charcoal(WPBC) Composites Board, *KFRI Journal of Forest Science* (67), 48–57
- Peters J, Fischer K, Fischer S (2008) Characterization of emissions from thermally modified wood and their reduction by chemical treatment *Bioresources* 3, 491–502
- Ramirez SM, Blanco-Varela MT, Erena I, Gener M (2006) Pozzolanic reactivity of zeolitic rocks from two different Cuban deposits: characterization of reaction products, *Appl Clay Sci* 32 (1–2):40–52
- Reponen T, Raunemaa T, Savolainen T, Kalliokoski P (1991) The effect of material ageing and season on formaldehyde levels in different ventilation systems, *Environavnt International*, Vol. 17, pp. 349–355

- Risholm-Sundman M, Lundgren M, Vestin E, Herder P (1998) Emission of acetic acid and other volatile organic compounds from different species of solid wood, *Holz RohWerkst.* 56 (1998) 125–129
- Roffael E (2006) Volatile organic compounds and formaldehyde in nature, wood and wood based panels, *Holz RohWerkst.* 64 144–149
- Salthammer T, Mentese S, Marutzky R (2010) Formaldehyde in the indoor environment, *Chemical Reviews*; 110:2536–2572
- Shi J, Kocaefe D, Zhang J (2007) Mechanical behaviour of Quebec wood species heat-treated using ThermoWood process. *Holz als Roh- und Werkstoff* 65, 255–259
- Song-Yung W, Te-Hsin Y, Li-Ting L, Cheng-Jung L, Ming-Jer T (2007) Properties of low-formaldehyde-emission particleboard made from recycled wood-waste chips sprayed with PMDI/PF resin, *Building and Environment* 42 2472–2479
- Sumin K, Jin-A K, Hyun-Joong K, Shin Do K (2006) Determination of formaldehyde and TVOC emission factor from wood-based composites by small chamber method. *Polymer Testing* 25 605–614
- Sumin K (2009) Environment-friendly adhesives for surface bonding of wood-based flooring using natural tannin to reduce formaldehyde and TVOC emission, *Bioresource Technology* 100 744–748
- Sumin K (2009a) The reduction of indoor air pollutant from wood-based composite by adding pozzolan for building materials, *Construction and Building Materials* 23 2319–2323
- Sumin K (2010) The reduction of formaldehyde and VOCs emission from wood-based flooring by green adhesive using cashew nut shell liquid (CNSL), *Journal of Hazardous Materials* 182 919–922
- Sumin K, Yoon-Ki C, Kyung-Won P, Jeong Tai K (2010) Test methods and reduction of organic pollutant compound emissions from wood-based building and furniture materials, *Bioresource Technology* 101 6562–6568
- Tichenor BA (1987) Organic emission measurements via small chamber testing, *Indoor Air'87*. In: Serfeit B, Edsorn H, Fischer M, Ruden H, Wegner J, editors. *Proceedings of the Fourth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, vol. 1. West Berlin: Institute of Water, Soil and Air Hygiene, 1987. p. 8–15
- Turanli L, Uzal B, Bektas F (2004) Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans, *Cem Concr Res* 34 (12):2277–2282
- Uhde E, Borgschulte A, Salthammer T (1998) Corresponding author contact information Characterization of the field and laboratory emission cell—FLEC: Flow field and air velocities. *Atmospheric Environment* Vol. 32, Issue 4, February 1998, Pages 773–781
- Ze-Li Q, Fei-Bin W, Jian-Zhang L, Takeshi F (2013) Assessment on emission of volatile organic compounds and formaldehyde from building materials, *Composites: Part B* 49 36–42
- Zhongkai H, Yinping Z, Wenjuan W (2012) Formaldehyde and VOC emissions at different manufacturing stages of wood-based panels, *Building and Environment* 47, 197–204
- Van de Wal JF, Steenlage R, Hoogeveen AW (1990) Measurement of organic compound emissions from consumer products in a walk-in test chamber, *Indoor Air'90*. In: Walkinshaw D, editor. *Proceedings of the Fifth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, vol. 3. Toronto, Canada, 1990. p. 611–616
- Wang WL, Gardner DJ, Baummann MGD (2003) Factors affecting volatile organic compound emissions during hot-pressing of southern pine particleboard, *Forest Products Journal* 53 (3):65–72
- Wendler SL, Ni J, Frazier CE (1995) Analysis of the isocyanate-wood adhesive bonding using ¹⁵N CP/MAS NMR. In: *Wood Adhesives*, Madison. WI: Forest Prod. Soc.; p. 37–42
- Wolkoff P, Clausen PA, Nielsen PA, Gustafsson H, Jonsson B, Rasmusen E (1991) Field and laboratory emission cell: FLEC, *Healthy Buildings 1991*, ASHRAE, Atlanta, pp. 160–165
- World Health Organisation WHO (2010) WHO Regional Office for Europe: Guidelines for Indoor Air Quality - Selected Pollutants. ISBN 978 92 890 0213 4
- World Health Organisation (1989) *Indoor Air Quality: Organic Pollutants*, EURO Reports and Studies No III, World Health Organisation, Copenhagen, Denmark