

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

KATEDRA DŘEVĚNÝCH VÝROBKŮ A KONSTRUKCÍ



**HODNOCENÍ LIISOVACÍCH PARAMETRŮ PŘI  
VÝROBĚ DŘEVOVLÁKNITÝCH DESEK**

Diplomová práce

Vypracoval: František Mudra

Vedoucí diplomové práce: doc. ing. Martin Böhm, Ph.D.

2014

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí

Fakulta lesnická a dřevařská

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Mudra František

Dřevařské inženýrství

Název práce

**Hodnocení lisovacích parametrů při výrobě dřevovláknitých desek**

Anglický název

**Evaluation of the pressing parameters in the production of medium density fibreboard (MDF)**

### Cíle práce

Cílem práce je návrh metodiky měření a vyhodnocení lisovacích parametrů při výrobě dřevovláknitých desek se střední hustotou (MDF). Součástí práce je návrh optimalizace procesu lisování a jeho aplikace v praxi.

### Metodika

1. Vytvoření osnovy a časového harmonogramu zpracování DP
2. Podrobné prostudování uvedené problematiky a vypracování literární rešerše
3. Návrh metodiky měření lisovacích parametrů pomocí bezdrátových čidel GreCon
4. Stanovení typu nejvhodnějšího zkušební materiálu
5. Provedení experimentálních měření v procesu komerční výroby MDF
6. Vyhodnocení zjištěných výsledků zkoušek
7. Návrh opatření vedoucích k optimalizaci procesu lisování a chlazení MDF
8. Odevzdání práce v tištěné i elektronické podobě (součástí diplomové práce je abstrakt a klíčová slova v českém a světovém jazyce - angličtině)

### Harmonogram zpracování

- září - prosinec 2013: rozbor literárních zdrojů k zadané problematice  
prosinec 2013 - březen 2014: zkušební měření a zpracování dat  
15. duben 2014: odevzdání práce vedoucímu  
20. duben 2014: finální odevzdání práce a nahrání elektronické verze



## Rozsah textové části

50-60 stran textová část, 5-15 stran příloh

## Klíčová slova

dřevovláknité desky, MDF, lisovací parametry, teplota, tlak, GreCon EasyLog

## Doporučené zdroje informací

- Bolton, A.J., Humphrey, P.E.: The Hot Pressing of Dry-formed Wood-based Composites, Part I. A Review of the Literature, Identifying the Primary Physical Processes and the Nature of their Interaction. *Holzforschung*, 1988. 42 (6): 403-406.
- Deppe, H.J., Ernst, K.: MDF – Mitteldichte Faserplatten. DRW- Verlag Weinbrenner GmbH. Co, Leinfelden-Echterdingen, 1996, 200 s. ISBN, 3-87181-329-X.
- Eisner, M.: Technologია výroby konstrukčních velkoplošných materiálů, část II. Technologია aglomerovaných materiálů, VŠLD, 1982, 223 s. ISBN 04-805-83.
- Fischer, J.: Siegeszug angetreten. Aus den Kindertagen der Holwerkstoffe. *HK Hol- und Kunststoffverarbeitung*, 2000. 35 (4): 62-64.
- Lampert, H.: Faserplatten. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1967, 456 s. ISBN 3-462-02909-6.
- Siempelkamp.: Die Geschichte der Holzwerkstoffen. Firemní literatura, 1999, 25 s.
- Soiné, H.: Holzwerkstoffe, Platten, Beschichtungsstoffe, Formteile, Türen Möbel. DRW- Verlag Weinbrenner GmbH, Leinfelden- Echterdingen, 1995, 368 s. ISBN: 3-871-81340-0 .
- Štefka V., Mýtný F.: Lisovací technika a lisy pre aglomerované materiály. Technická univerzita vo Zvolene. 2001. 59 s. ISBN 80-228-1029-0.
- Štefka V.: Kompozitné drevné materiály, část II. Technická univerzita vo Zvolene. 2002. 205 s. ISBN 80-228-1136-X.

## Vedoucí práce

Böhm Martin, doc. Ing., Ph.D.

## Konzultant práce

Ing. David Roll

## Termín odevzdání

duben 2014

Elektronicky schváleno dne 25.4.2014

**doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.**  
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 25.4.2014

**prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.**  
Děkan fakulty

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Hodnocení lisovacích parametrů při výrobě dřevovláknitých desek* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Martina Böhma, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 20. 4. 2014

.....

Podpis autora František Mudra



## **Poděkování**

Úvodem bych velmi rád poděkoval doc. Ing. Martinovi Böhmovi, Ph.D. za jeho obětavou pomoc, ochotu a cenné připomínky, které mi v průběhu zpracování diplomové práce poskytl. Dále bych rád poděkoval Ing. Davidu Rollovi, který mi pomáhal s měřením a vyhodnocením získaných dat. A v neposlední řadě jsem vděčný svým rodičům za morální pomoc a finanční podporu při studiu.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá stručným představením a popsáním výrobního procesu dřevovláknitých desek se střední hustotou (MDF), detailněji rozebírá důležité lisovací parametry sledované v procesu výroby a popisuje návrh lisovacího cyklu (lisovací modely). V praktické části je provedeno experimentální měření lisovacích parametrů v procesu komerční výroby MDF. Měření bylo uskutečněno pomocí bezdrátových čidel GreCon. V závěru jsou uvedeny a vyhodnoceny zjištěné výsledky zkoušek a jsou navržena případná opatření vedoucí k optimalizaci procesu výroby, případně chlazení MDF.

## **Abstract**

The purpose of this Diploma Thesis is a brief introduction and description of a production process of medium density fibreboard (MDF), involving important pressing parameters observed during the production process. Moreover, it describes a design of a pressing cycle (pressing models). In the practical part, the pressing parameters are experimentally measured during the production process at the commercial manufacture of the MDF. The measurements were realized with the wireless sensors GreCon. In the conclusion, the results of the tests are discussed and the prospective precautions leading to the production process optimization, or to cooling the MDF, are suggested.



## Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>7</b>
1.1 Normy a definice .....	8
1.1.1 Termíny a definice .....	9
1.1.2 Požadavky .....	9
<b>2. Výrobní proces dřevovláknitých desek se střední hustotou .....</b>	<b>10</b>
2.1 Suroviny pro výrobu dřevovláknitých desek (MDF) .....	10
2.2 Skladování surovin.....	11
2.3 Příprava štěpky .....	11
2.4 Rozvláknění (defibrilace) štěpky.....	12
2.5 Dávkování chemikálií.....	15
2.6 Odvodnění vláknitého koberce .....	16
2.7 Lisování.....	17
2.8 Chlazení .....	18
2.9 Formátování desek.....	19
2.10 Dokončování dřevovláknitých desek (MDF).....	19
<b>3. Lisovací parametry .....</b>	<b>20</b>
3.1 Predikce lisovacích parametrů (lisovací modely).....	21
3.1.1 Fundamentální model .....	21
3.1.2 Empirický model .....	22
3.2 Parametry sledované při lisovacím procesu.....	22
3.2.1 Pohyb vlhkosti a přenos tepla.....	22
3.2.2 Tepelná vodivost .....	23
3.2.3 Konvekce plynu.....	24
3.2.4 Ostatní vlastnosti.....	25

3.3	Stručná analýza lisovacích modelů .....	25
3.4	Porovnání dat modelů a experimentálními daty.....	33
3.5	Závěrečné shrnutí lisovacích modelů .....	39
<b>4.</b>	<b>Experimentální měření v procesu komerční výroby .....</b>	<b>40</b>
4.1	GreCon.....	40
4.1.1	Sada GreCon .....	40
4.1.2	Čidla ContiLog.....	41
4.1.3	Čidla EasyLog.....	42
4.2	Metodika měření.....	43
4.3	Experimentální měření.....	44
4.3.1	Příprava .....	44
4.3.2	Průběh měření.....	44
4.3.3	Závěr měření.....	46
<b>5.</b>	<b>Vyhodnocení zjištěných výsledků experimentálního měření.....</b>	<b>47</b>
5.1	Čidlo ContiLog.....	47
5.2	Čidlo Easylog .....	47
<b>6.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>49</b>
<b>7.</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>51</b>
7.1	Použitá literatura.....	51
7.2	Normy.....	53
7.3	Elektronické prameny .....	53
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam grafů.....</b>	<b>55</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>



Příloha 1 .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Příloha 2: Vyhodnocení z čidel GreCon .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Čidlo ContiLog.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Čidlo EasyLog.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Závěr.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Příloha 3: Data z čidla ContiLog .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Příloha 4: Data z čidla EasyLog.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>

## 1. Úvod

Dřevo jako stavební materiál je lidmi využíván již několik staletí. Jedním z hlavních důvodů, proč si lidé tento materiál pro stavbu svých obydlí vybírají, jsou jeho výborné vlastnosti. Zejména poměr mezi váhou a pevností, který dokonce i v porovnání s dnešními moderními materiály jako je beton a ocel, nebyl překonán. Další velkou výhodou jsou izolační vlastnosti, rychlost výstavby, jednoduchost při opracování a manipulováním s dřevěnými prvky, nízká spotřeba energie při výrobě a samozřejmě estetické vlastnosti dřevěných prvků.

Bohužel dřevo má i několik vlastností, které nejsou pro nosné účely žádoucí. Mezi hlavní nevýhody patří: heterogenita (různorodost struktury), anizotropie (nestejněměrnost vlastností v různých směrech – mechanické vlastnosti v podélném směru několikanásobně převyšují vlastnosti v příčném směru), hygroskopicitu (schopnost přijímat vlhkost). Dále zvýšení vlhkosti u dřeva způsobuje značné zhoršení mechanicko-fyzikálních vlastností a objemové změny. Další nevýhodou je velmi nízká odolnost proti ohni a v poslední řadě omezenost vyrábět nosníky větších rozměrů a složitějších tvarů.

Všechny tyto negativní vlastnosti vedly lidstvo k vývoji takových materiálů, které by si zachovaly příznivé vlastnosti dřeva a zároveň snížily nebo úplně odstranily ty nepříznivé. Společným znakem aglomerovaných materiálů je dezintegrace dřeva na menší části (třísky, dýhy, lamely, vlákna, atd.), které jsou spojeny tak, aby byl výsledný produkt co nejvíce vhodný pro dané konstrukční řešení.

Mezi tyto materiály patří i dřevovláknité desky. Vyrábějí se ve více druzích, nicméně tato diplomová práce se zaměřuje pouze na dřevovláknité desky se střední hustotou (MDF).

Výroba MDF začala v polovině 60. let v USA (Štefka, 2002). Obliba tohoto materiálu prudce rostla i na evropském trhu, avšak v této době byla výroba MDF desek považována za nákladnou a neekonomickou. Výrobci nábytku však zvyšovali tlak na kvalitnější a homogennější velkoplošný dřevní materiál. Evropané výrobci se trh snažili uspokojit zavedením homogenních dřevotřískových desek, které začali vyrábět z jemných třísek. Ale špatné mechanické vlastnosti takto vyráběných desek



vedly k tomu, že se od tohoto záměru opustilo. Tím se otevřela cesta k výrobě MDF v Evropě (Siempelkamp, 1999) (Fischer, 2000).

V Evropě se první MDF desky začaly vyrábět začátkem 70. let ve Skandinávii. Vyráběly se však „mokrým způsobem“, což bylo spojené s problémy, jako znečišťování životního prostředí a problémy kvality desek, které vyplývaly z jejich nevhodného hustotního profilu (Siempelkamp, 1999) (Fischer, 2000).

Vláknité desky MDF se suchým způsobem v Evropě začaly vyrábět v bývalé NDR v Ribnitzu v roce 1973. V Evropě tak pomalu začínala jejich výroba. Postupně se začaly budovat další závody, např. v Rumunsku a Španělsku. V roce 1987 firma Topan v západoněmeckém Meppen vybudovala závod na výrobu MDF s požitím lisu nejnovější generace ContiRoll (kontinuální lis), což umožnilo vyrábět desky o tloušťkách 2-40 mm (Siempelkamp, 1999) (Fischer, 2000).

Kvůli požadavkům na zvyšování výrobní kapacity MDF desek se začal klást důraz i na efektivnost výroby, k čemuž výrazně přispěla i zvyšující se konkurence. Nastoupila éra technické a technologické optimalizace výrobních procesů, jejich automatizace a řízení elektronickou kontrolou (Štefka, 2001).

## **1.1 Normy a definice**

Dřevovláknité desky stejně jako kterýkoliv jiný výrobek ze dřeva podléhá normám. Normy jsou důležité, aby byl výrobek jasně definovaný a všichni producenti dodržovali jednotné výrobní postupy.

Dřevovláknitými deskami se přímo zabývají normy ČSN EN 316, ČSN EN 622 – 1, ČSN EN 622 – 2, ČSN EN 622 – 3. O dřevovláknitých deskách se dále zmiňují i další normy, např. zkoušky na stanovení úniku formaldehydu, stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu, stanovení bobtnání po uložení ve vodě, stanovení pevnosti v tahu kolmo na rovinu desky, definice tříd ohrožení pro biologické napadení atd.

### 1.1.1 Termíny a definice

**Dřevovláknitá deska<sup>1</sup>** (fibrewood) je deskový materiál o jmenovité tloušťce 1,5 mm nebo větší vyrobený z lignocelulózových vláken při použití tepla nebo tlaku (ČSN EN 316, 2009).

**Deska vyrobená suchým procesem** (dry process board) je vláknitá deska, při jejímž formování mají vlákna vlhkosti menší než 20%. Desky vyrobené suchým procesem<sup>2</sup> mohou získat dodatečné vlastnosti např. požární odolnost, odolnost proti vlhkosti, odolnost proti biotickému napadení buď změnou složení syntetického pojiva, nebo přidavkem jiných přísad. (ČSN EN 316, 2009).

### 1.1.2 Požadavky

Vláknité desky, expedované od výrobce, musí splňovat všeobecné požadavky uvedené v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a tloušťkové tolerance uvedené v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (viz Příloha 1). Pro určité použití vláknitých desek (viz speciální normy pro typy vláknitých desek a všeobecné normy pro způsobilost desek ze dřeva) při expedici přířezu nebo u desek pro pozdější opracování (pero a drážka nebo podobně), mohou být dohodnuty speciální tolerance u jmenovitých rozměrů, pravoúhlosti a přímosti boků. Hodnoty uvedené v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** pro tolerance jmenovitých rozměrů (tloušťku, šířku a délku), pravoúhlost, přímost boků a toleranci hustoty uvnitř desky jsou stanoveny při vlhkosti materiálu odpovídající teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %. Vlastnosti, které pro určitý typ desek nejsou požadovány, jsou označeny „ - “.

Požadavek na obsah formaldehydu (perforátorová hodnota) musí být prokázán 95-percentilem, získaným z výsledků jednotlivých desek. 95-percentil smí být nejvýše roven odpovídající hodnotě v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (ČSN EN 622 - 1, 2003).

---

<sup>1</sup> Dřevovláknité desky se obvykle nazývají vláknité desky. Spojení vláken spočívá buď ve zplstnatění vláken a jejich inherentní lepivosti, nebo v přidavku syntetického pojiva na vlákna. Mohou se přidat i další přísady (ČSN EN 316, 2009).

<sup>2</sup> Při výrobě vláknitých desek suchým procesem se obvykle využívá teplo a tlak s přidavkem syntetického lepidla (ČSN EN 316, 2009).

## 2. Výrobní proces dřevovláknitých desek se střední hustotou

Dřevovláknité desky se vyrábějí v celé škále tvrdostí a tloušťek s rozdílnými úpravami povrchu. Výroba těchto desek částečně využívá poznatků získaných při výrobě celulózy a papíru. Dřevo bez kůry je zpracováno na mezistupňový polotovar – štěpky, které jsou po hydrotermické úpravě následně rozvlákněny na drobné vláknité částice – vlákna. Vlákna jsou dále vrstvena a lisována rozdílným tlakem, a to buď za použití lepidla, nebo bez jeho přídavku. Vznikají desky s jemnou strukturou, které mohou být podle stupně slisování vláknitých částic (hustoty) buď měkké, polotvrdé nebo tvrdé. Hustota desek zásadně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti jednotlivých druhů desek.

MDF desky se vyrábějí nejčastěji suchým způsobem. Desky určené do interiérů jsou lepeny močovinoformaldehydovým lepidlem. U desek určených do prostředí s vyšší vlhkostí se používá fenolformaldehydové nebo melminformaldehydové lepidlo.

### 2.1 Suroviny pro výrobu dřevovláknitých desek (MDF)

Při výrobě vláknitých desek není velká náročnost na kvalitu vstupní suroviny, vzhledem k většímu stupni rozkladu dřeva.

Základní surovinou je dřevní odpad kusový (odřezky, krajnice apod.), odpad z lesní těžby, popř. průmyslové výroby (Štefka, 2002).

Dnes se používá jak jehličnaté, tak i listnaté dřeviny. Z anatomického hlediska mají význam hlavně vláknité anatomické elementy. U jehličnatých dřevin mají charakter vláknitých elementů tracheidy, které představují 91-95% podíl (Lampert, 1967). U listnatých dřevin jsou to libriformní vlákna, jejichž podíl je okolo 66 %. Dřevo listnatých dřevin obsahuje více hemicelulóz, které se po chemických přeměnách aktivně podílejí na vzájemném spojení vláken (Eisner, 1982).

Pro suchý způsob výroby, kterým se vyrábějí MDF, je tedy vhodnější použít jehličnaté dřeviny s delšími vlákny. Avšak díky výraznému technickému pokroku ve výrobních technologiích se používají i listnaté dřeviny (Deppe, Ernst 1996).

## 2.2 Skladování surovin

Důraz na objem skladových zásob se postupem času mění. Zatímco v minulém období se doporučovalo udržovat suroviny pro plynulou výrobu dvou až čtyř měsíční (Eisner, 1982), v dnešní době se snažíme z ekonomických důvodů mít skladové zásoby co nejnižší. Nejmenší zásoba by měla být na jeden měsíc, na jednu stranu nám skladový materiál váže kapitál, ale na tu druhou nám pomáhá překonávat krátkodobé výkyvy cen a zajišťuje plynulost výrobního procesu (Štefka, 2002).

## 2.3 Příprava štěpky

Vstupní surovinou je kvalitní bílá štěpka z odkorněného dřeva. Jak bylo výše zmíněno většinou jehličnatého smrkového. Optimální velikost štěpky je 20-30 mm šířka, 40-50 mm délka a 3-5 mm tloušťka.

Štěpky se vyrábějí na dvou typech strojů:

- kotoučové (označované také jako diskové) štěpkovací stroje;
- bubnové štěpkovací stroje.

Pro výrobu štěpek jsou rozhodující řezné síly a směr řezu, který je závislý na vlastnostech vstupní suroviny. Mezi řeznou silou a hustotou je jednoznačná závislost. Se zvyšující se hustotou se zvyšují i řezné síly odpovídající směru řezání. Významný vliv na štěpkování má vlhkost dřeva. Největší řezný odpor klade dřevo při vlhkosti 10 až 13%. Se zvyšující se vlhkostí až do bodu nasycení vláken (okolo 30%) řezný odpor klesá a potom zůstává téměř neměnný (Deppe, Ernst 1996).

Pro štěpkování větších a rozměrnějších materiálů se používají kotoučové štěpkovače. Na sekání kusového dřevního odpadu jsou vhodnější bubnové štěpkovací stroje. Mohou být s otevřeným, nebo uzavřeným nožovým rotorem (Štefka, 2002).

Je vhodné, aby velikost štěpek byla co nejrovnoměrnější, proto se vyrobené štěpky musejí třídit. K tomuto účelu se používají bubnová nebo rovinná síta. Vytríděné nadrozměrné štěpky se domílají na dezintegrátorech (kladivových mlýnech) a jsou na další zpracování. Současně se vytřídí piliny a jemná frakce, které se dále využívají na výrobu energie (Štefka, 2002).

Štěpky správné frakce se dopravují pásovými, hrablovými a nebo korečkovými dopravníky zpravidla do vertikálních zásobníků, nebo se skládají na volné prostranství (Štefka, 2002).

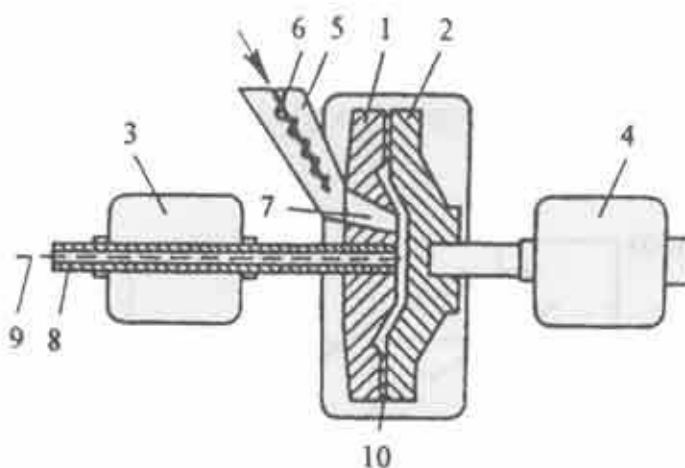
## 2.4 Rozvlákňování (defibrilace) štěpky

Rozvlákňováním štěpky získáme samostatná vlákna nebo svazky vláken, které tvoří základní stavební jednotky dřevovláknitých desek. Kvalitní vlákno se získá jen tehdy, pokud se vhodným procesem uvolní vzájemné spojení mezi buněčnými vláknitými elementy ve střední lamelle a ty se co nejméně poškozené vzájemně oddělí (Štefka, 2002).

Proces rozvlákňování se uskutečňuje čtyřmi základními způsoby:

- mechanický způsob rozvlákňování;
- termomechanický způsob rozvlákňování;
- chemicko-mechanický způsob rozvlákňování;
- explozivní (vystřelovací) způsob rozvlákňování.

**Mechanický způsob** rozvlákňování představuje desagregaci dřeva pouze třením. Pro tento způsob se nejčastěji používá Bauerův mlýn (viz Obrázek 2-1), který vyrábí vlákno mletím štěpek. Štěpky se ve vodním prostředí melou mezi dvěma protisměrně rotujícími kotouči. Tento způsob mletí má velké nároky na energii. (Deppe, Ernst 1996).

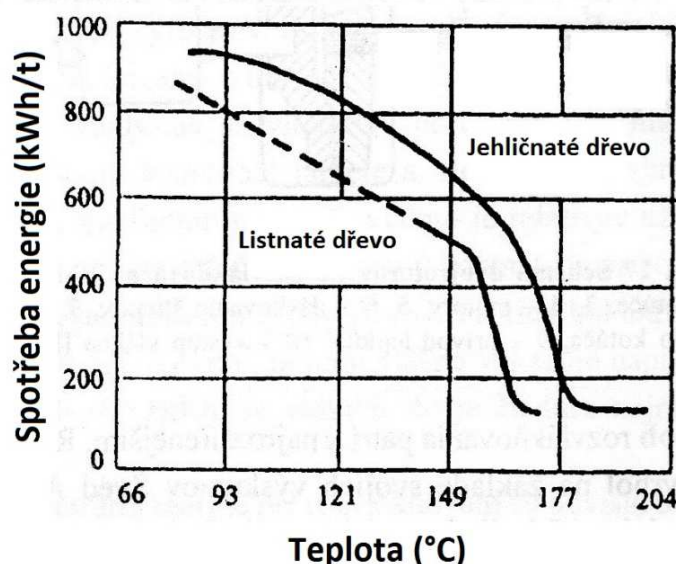


**Obrázek 2-1: Schéma dvojrotorového rozvlákňovače „Bauer“**

1,2 – mlecí kotouče, 3,4 – motory, 5,6 – dávkování štěpek, 7 – vstup štěpek, 8 – hřídel mlecího kotouče, 9 – přívod lepidla, 10 – výstup vlákna (Deppe, Ernst 1996).



**Termomechanický způsob** rozvláknování patří k nejrozšířenějším. Tento druh rozvláknění využívá Asplundovo principu. Asplund ve svých výzkumech totiž zjistil, že s teplotou zahřívání štěpek klesá spotřeba energie na jejich rozvláknění. Při určitých teplotách dojde ke snížení spotřeby energie dokonce až na jednu pětinu původní spotřeby. U jehličnatých dřevin je touto zlomovou hodnotou teplota okolo 175 °C. Při rozvláknování listnatých dřevin se tato teplota pohybuje okolo 165 °C (viz Graf 2-1) (Štefka, 2002).

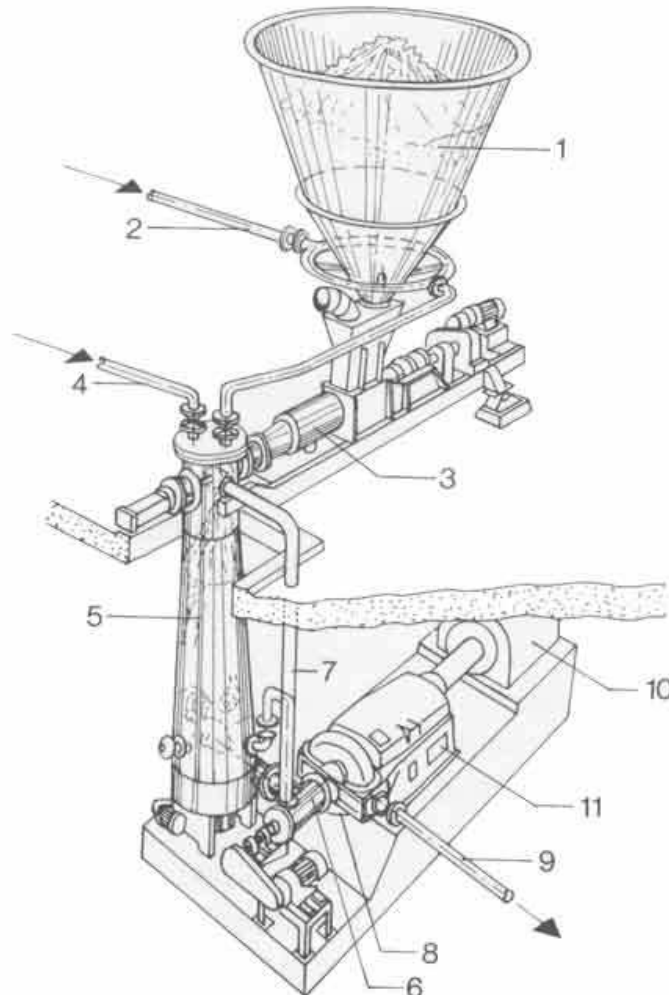


**Graf 2-1: Závislost spotřeby elektrické energie při rozvláknování na teplotě předehřívání štěpek (Lampert, 1967).**

Příčinou tohoto snížení energie je plastifikace střední signifikované lamely, která představuje ve dřevě amorfní složku spojující dřevní vlákna do kompaktní hmoty. Její plastifikace, která se stala běžnou ve většině rozvláknovacích postupů, umožňuje lehčí oddělení vláken působením mechanických sil mlecích kotoučů (Štefka, 2002).

Samotné zařízení (viz Obrázek 2-2) se poté skládá z předehříváče (parního autoklávu) a rozvláknovacího mlýnu. Mlecí komora se skládá ze dvou kotoučů (jeden pohyblivý - rotor, druhý pevný - stator), případně dvou protiběžným kotoučům. Štěpky se tedy nejdříve předehřejí a plastifikují v předehříváči, poté jsou dopraveny

do mlecí komory, kde se dostanou mezi mlecí kotouče opatřené rýhovanými segmenty, mezi kterými jsou mlety (Štefka, 2002).



**Obrázek 2-2: Schéma rozvlákňovacího zařízení typu Defibrator-Rafinér na výrobu vlákna.**

1 – zásobník s regulovatelným plněním a předehříváním odpadní párou, 2 – zpětné vedení odpadní páry do zásobníku štěpek, 3 – šnekový dopravník, 4 – přívod čerstvé páry, 5 – vertikální předehříváč, 6 – šnekový dopravník, 7 – zpětné vedení odpadní páry, 8 – rafinér, 9 – vyprazdňovací potrubí, 10 – pohon motoru rozvlákňovače, 11 – uložení hnacího hřídele (Soiné, 1995).

**Chemicko-mechanický způsob** rozvlákňování. Používá se hlavně při zpracování těžko rozvláknitelných surovin jako jsou některé druhy tropických dřevin nebo agronomické odpady. Principem této technologie je plastifikace dřeva jednocentním louhem sodným, ve kterém se surovina vaří při tlaku 0,5 až 0,6 MPa. Díky louhu se rozpouští silně lignifikovaná střední lamela, což nám usnadňuje

následné rozvláknění. Nevýhodou toho způsobu je nutné použití mlýnů, které jsou odolné vůči agresivním chemikáliím. Dalším neduhem je snížená výtěžnost vlákna až o 20%. Díky tomu se rozpouští větší podíl nízkorozpustných složek dřeva. Tyto složky poté znečišťují odpadní vody (Štefka, 2002).

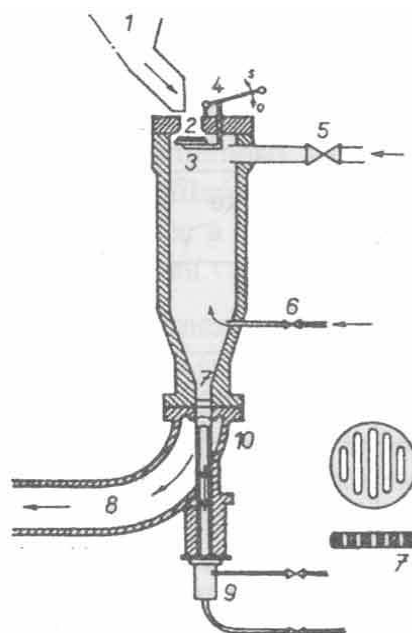
**Explozivní (vystřelovací) způsob** rozvláknění je nestarším způsobem přímého rozvláknění dřeva, který je spojený s přehřevem dřevních štěpek. Byl vyvinutý v USA Masonem. Tento způsob rozvláknění probíhá diskontinuálně ve speciálním vysokotlakém zařízení. Toto zařízení se nazývá dle výše zmíněného výrobce jako Masonův kanón (viz Obrázek 2-3). Kanón je tvořený ocelovým válcem (autoklávem) o průměru 500 mm a výšce 1500 mm. Do válce se plní 100 až 300 kg štěpek (dle velikosti zařízení). Poté se přivede pára o tlaku 2 až 2,4 MPa. Štěpky se přehřívají 30 až 40 sekund na teplotu 210 až 220 °C, poté se na 2 až 5 sekund přivede vysokotlaká pára (až 8,5 MPa). Teplota v kanónu se tak zvýší na cca 285 °C. Rychlým otevřením hydraulického ventilu dojde k explozi. Štěpky nasycené vysokotlakou parou jsou vystřeleny rychlostí 1000 až 1200 m.s<sup>-1</sup> proti roštu ve vypouštěcím potrubí. K rozvláknění dochází expanzí vysokého tlaku páry, která se nachází v buněčné struktuře dřeva a rozpad se dokončuje přechodem přes roštovou vložku vypouštěcího ventilu (Štefka, 2002).

Vlákno získané tímto způsobem je kvalitativně odlišné od vlákna získaného jinými způsoby. Má mechovitý charakter a díky roztržení vnitřním přetlakem ztrácí svůj trubičkový tvar, ale zachovává si svoji původní délku. Dochází tak k větší depolymerizaci hemicelulóz, což je příznivé z hlediska slepování vláken při lisování, avšak výtěž je snížena o 25 až 30 % (Štefka, 2002).

## 2.5 Dávkování chemikálií

Původní technologie výroby vláknitých desek byla založena na soudržnosti zplstnatělých dřevěných vláken. Pro zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností se dnes přidávají vodou ředitelná PF lepidla (10% roztok). Jako hydrofobizační prostředek se přidává parafín (10% emulze v množství kolem 1,5 %). Lze používat také kalafunu nebo asfalt - se vzrůstajícím množstvím se zlepšuje odolnost proti

vlhkosti, ale snižuje se pevnost. Dále se mohou používat fungicidní a biocidní prostředky, retardéry hoření (Böhm, 2005).



**Obrázek 2-3: Schéma vystřelovacího děla podle Masona**

1 – štěpky ze zásobníku, 2 – plnicí otvor, 3 – Vrchní uzavírací ventil, 4 – manipulační zařízení, 5 – ventil pro vysokotlakou páru, 6 – ventil pro páru, 7 – rošt, 8 – vypouštěcí roura, 9 – hydraulické manipulační zařízení, 10 – spodní ventil (Lampert, 1967).

## 2.6 Odvodnění vláknitého koberce

Při odvodňování na rovinném odvodňovacím zařízení celý proces probíhá ve třech sekcích. Z nátokové skříně vláknitá suspenze rovnoměrně vtéká na dopravní a odvodňovací síto do první odvodňovací sekce, tzv. gravitační zóny, kde se vytváří soudržný vláknitý koberec (voda odtéká skrz síto působením gravitační síly). Je velmi důležité, aby nedocházelo k orientování vláken ve směru nátoku. Vstupní část odvodňovacího stroje se proto otřásá, a tak dochází k vzájemné vazbě vláken v horizontálním a vertikálním směru. Na konci gravitační sekce se sušina pohybuje okolo 6 až 10 %. Odvodňování dále pokračuje v sací sekci, kde se vytváří podtlak sacím čerpadlem. Sušina vláknitého koberce se zvýší přibližně na 12 až 14 %. Následuje odvodňování ve třetí zóně, tzv. lisovací. Vláknitý koberec prochází soustavou válců, které mechanicky vytlačují vodu. V závislosti na typu odvodňovacího zařízení se konečná sušina pohybuje od 35 do 45 % (Böhm, 2005 in Štefka, 2002).

## 2.7 Lisování

Lisovací proces je jedním z nejdůležitějších z celé výroby. Završuje rekonstrukci jednotlivých vláken do tuhého, plošného výrobku (MDF desky) díky adhezivnímu spojení – fixaci dřevních vláken ve zhuštěném stavu. Aby lis z vláknitého koberce vytvořil desku, musí v lisovaných vláknech proběhnout následující procesy:

- Zhuštění lisovaného koberce na stanovenou hustotu a dosažení tlaku potřebného pro dobré adhezivní spojení dřevních částic.
- Prohřátí lisovaného koberce na požadovanou teplotu s ohledem na vytvrnutí lepidla.
- Vytvrnutí lepidla a slepení dřevních částic do kompaktního výrobku a odpaření přebytečné vody.

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že nejdůležitější fyzikální vlastnosti při lisování jsou tlak, teplota, lisovací čas a rychlost uzavírání lisu (Štefka, 2002). K podrobnějšímu popisu jednotlivých lisovacích parametrů se vrátíme dále.

Samotný lisovací proces probíhá následovně. Vlákňitý koberec po odvodnění na odvodňovacím stroji má sušinu 40 až 35 %. Koberec se pokládá na podélný plech se sítím. To zajistí lehčí odvod vody při lisování. Lisování potom probíhá při teplotách 190 až 210 °C, za některých podmínek až při teplotě 225 °C (Lampert, 1967). Vlhkost desek po lisování musí být 1%. Aby tomu tak bylo, musí se v průběhu lisování odpařit velké množství vody. Tímto je ovlivňován nejen lisovací čas, ale celý lisovací diagram, ve kterém je nevyhnutelná sušící fáze probíhající při nižším měrném tlaku. Lisovací diagram je určený druhem suroviny, procesem rozvlákňování, druhem a podílem lepidla, případně jiných příměsí, tloušťkou a hustotou desky (Kolektiv, 1975).

Samotný lisovací program se skládá s těchto fází (Kolektiv, 1975):

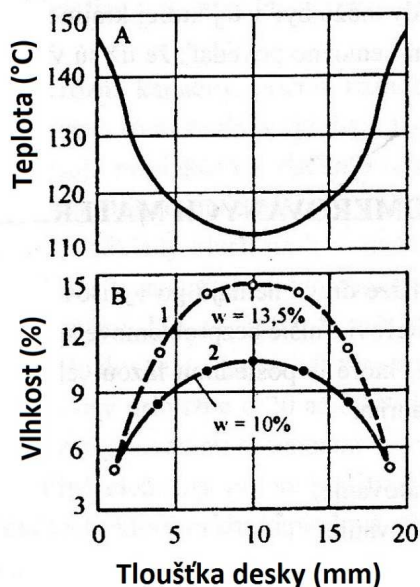
- 1. Beztlakové uzavírání lisu** – Pro etážové lisy s počtem vrstev 20 až 25 a vzdálenostmi desek do 100 mm je doba uzavírání 5 až 20 sekund.
- 2. Zhušťování na 1. stupeň vysokého tlaku** – V tomto kroku nastává stupňování tlaku až po maximální měrný tlak v rozmezí 35 až 80 sekund.
- 3. 1. stupeň vysokého tlaku** – Zde desky dosahují měrného tlaku 4 až 5,5 MPa.



4. **Snížení tlaku** – Rychlost snižování tlaku je důležitá pro tvorbu struktury dřevovláknitých desek. Celkový čas této fáze se pohybuje mezi 7 až 20 sekundami.
5. **Sušení a plastifikace** – V této fázi se udržuje po několik sekund konstantní tlak tak, aby se desky plastifikovaly.
6. **Zvyšování tlaku do 2. stupně, tzv. max. tlaku** – V tomto kroku se tlak znovu zvyšuje na hodnotu 1. stupně lisování (4 až 5,5 MPa).
7. **2. Stupeň vysokého tlaku** – Díky tomuto kroku získají MDF nejlepší možné vnitřní spojení mezi vlákny a tím i konečnou pevnost.
8. **Otvírání lisu** – Zde dochází k postupnému otvírání lisu a snižování tlaku až po úplné otevření lisu a následnému odeslání desek do procesu klimatizace.

## 2.8 Chlazení

Při chlazení desek dochází k ochlazení desek z lisu a vyrovnání teploty a vlhkosti v celém jejich průřezu. V příčném profilu desky je teplota a vlhkost různá. Na povrchu desky je vlhkost a teplota nižší než ve střední vrstvě desky, viz Obrázek 2-4.



**Obrázek 2-4: Profil teploty A (lisovací teplota 200 °C) a profil vlhkosti B**  
 1 – lisování s utěsněným okrajem koberce pomocí rámu, 2 – lisování bez utěsněných okrajů  
 (Eisner, 1982).

Profil teploty i vlhkosti vzniká jako důsledek přenosu tepla a vlhkosti vlivem vytvořeného teplotního gradientu. Po ukončení lisování nastávají opačné změny, u kterých je žádoucí, aby proběhly z hlediska času a intenzity tak, aby nevznikla rizika znehodnocení desek.

Účinné chlazení bezprostředně po lisování je zajištěno pomocí hvězdicového chladiče. Zde dochází k vyrovnání teploty. K vyrovnání vlhkosti však nedojde, tento proces vyžaduje delší dobu. Doporučení pro chlazení je, aby teplota desek před skladováním klesla alespoň na 70 °C. Teplota však musí klesat pozvolně, aby nedošlo k vnitřnímu napětí v desce, které je způsobeno nerovnoměrným rozložením vlhkosti a teploty v desce. Příliš rychlé zchlazení by mělo nepříznivý dopad na vlastnosti desek (Štefka, 2002).

## **2.9 Formátování desek**

Po chlazení ve hvězdicovém chladiči se desky omítají, nejčastěji na čtverhranných omítacích pilách. Obvykle se ořezávají okraje desek o šířce 15 až 30 mm. Dále se celá deska dělí na základní formát. Výrobci samozřejmě mohou desky naformátovat i do rozměrů požadovaných zákazníkem (Štefka, 2002).

## **2.10 Dokončování dřevovláknitých desek (MDF)**

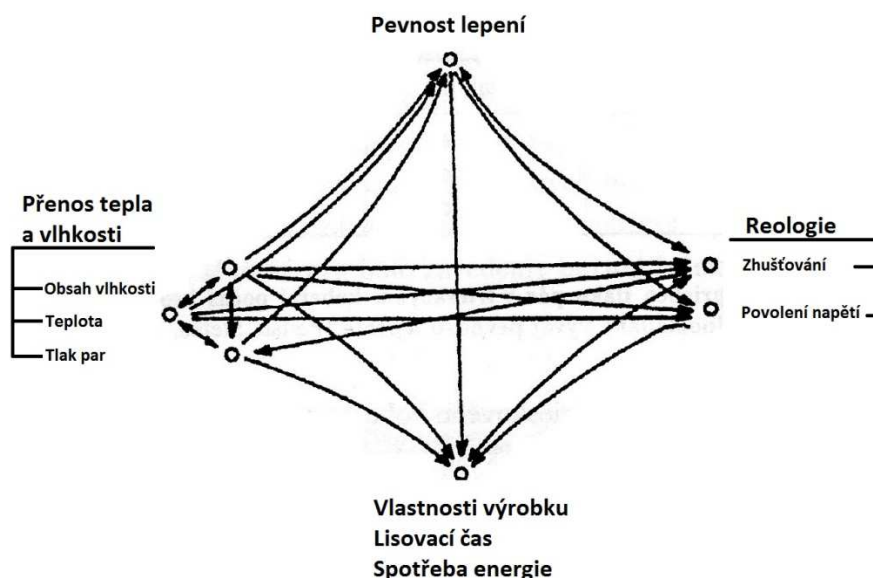
Po lisovacím procesu se může stát, že povrch desek vykazuje nerovnosti. Pro finální expedici je nutné tyto nerovnosti odstranit. Nejpoužívanější způsob v dnešní době je broušení pomocí širokopásových brusek (Štefka, 2002). Brusná rychlost se obvykle pohybuje mezi 1400 až 1600 m/min. Hrubost brusného pásu závisí na požadovaném povrchu desky. Pokud chceme desku s hladkým povrchem, použijeme pás s drsností do 150. Pokud je požadavek na hrubší povrch (např. pro dodatečnou povrchovou úpravu), použijeme drsnější pás se zrnitostí do 300. Dále je možné brousit desky oscilačním způsobem. Tímto způsobem se dá dosáhnout dokonale hladkého povrchu (Vach, 2008).

MDF desky jsou také vhodné pro profilování. Díky jejich vlastnostem je možné do nich frézovat jakékoliv obrazce nebo hrany, na které se následně mohou nanášet folie, dýhy, papír atd. (Vach, 2008)

### 3. Lisovací parametry

Jak již bylo výše zmíněno, nejdůležitější částí výroby je lisovací proces. Proto je důležité sledovat veličiny, které tento proces přímo ovlivňují. Lisovací parametry můžeme rozdělit do dvou skupin, první skupinou jsou **vnitřní faktory**, ty jsou určeny vlastnostmi dřevních částic, které tvoří koberec. Pro nás důležitější skupinou jsou ale **vnější faktory**, mezi ty řadíme tlak, teplotu, lisovací čas a rychlost uzavírání lisu (Bolton, Humphrey, 1988).

Aby měl výrobek požadované vlastnosti, je nutné, aby všechny děje v lisovacím procesu byly ve vzájemné interakci. Zároveň je nutné do tohoto děje začlenit lisovací čas a spotřebu energie, které ovlivňují ekonomiku a efektivnost výrobního procesu. Probíhající děje a procesy vyvolávají v koberci změny žádoucí, které mají pozitivní vliv na kvalitu hotového výrobku (zhuštění dřevních částic, vytvrnutí lepidla apod.) a jednak i nežádoucí (nevhodné rozložení hustoty v profilu desky, koncentrace vlhkosti ve středu koberce a vznik tlaku par), které naopak vlastnosti desek snižují (Bolton, Humphrey, 1988). Tyto závislosti jsou popsány v Obrázek 3-1, který je uveden níže. Pro zvolení ideálních lisovacích parametrů se v dnešní době používají lisovací modely.



Obrázek 3-1: Schéma vzájemné interakce dějů, lisovacího času, spotřeby energie a vlastností výrobku v lisovacím procesu (Bolton, Humphrey, 1988).

### **3.1 Predikce lisovacích parametrů (lisovací modely)**

Lisovací proces je poměrně složitý, musí zahrnovat přenos tepla přes hmotu, polymeraci lepidla a tváření. Aby se tato část výroby co nejlépe optimalizovala, vznikly první modely simulace lisování. Jeden z prvních modelů vznikl pro lisování dřevotřískových desek. Tento model byl pouze jednorozměrný (Kamke a Wolcott 1991).

Díky počítačovému vývoji bylo možné vytvářet dvou, nebo trojrozměrné modely, i když stále s některými omezeními, jako např. předpovídání pouze jedné proměnné (Humphrey a Bolton, 1989). Prvním komplexní model byl popsán Carvalhem a Costou (1998). Tento model předpovídal přenos tepla a obsah vlhkosti. Dále časový vývoj v rámci lisování u těchto dvou parametrů a reologické chování vláknitého koberce (Suo a Bowyer, 1994).

V literatuře lze najít mnoho typů modelů. Gupta (2007) rozděluje modely do dvou skupin. Prvním z nich jsou empirické modely, které používají statistické metody k propojení střední hustoty a výsledných parametrů, jako například mechanické vlastnosti desky. Druhý model je fundamentální, využívá k vyhodnocování hustotní profil, přenos tepla v desce a přenos hmoty.

#### **3.1.1 Fundamentální model**

Vertikální hustotní profil je již dlouho považován za velmi důležitý parametr ovlivňující kvalitu a pevnost MDF desek. Tento fakt vedl k rozvoji fenomenologických modelů předpovídající vertikální hustotní profil v průběhu lisovacího procesu. Modely zahrnují procesy přenosu tepla a hmoty ve vláknitém koberci, reologii koberce při lisování včetně dotvarování a kinetiku vytvrzování lepidla. Cílem této snahy je snižování výrobních energií a lepší kvalita desek (Gupta, 2007).

Tento model pracuje s mechanickými a reologickými vlastnostmi vláknitého koberce, které se mění s obsahem vlhkosti a změnou teploty v průběhu lisování. Model předpovídá napětí v koberci, napětí a hustotu v celé tloušťce průřezu při lisovacím procesu. Je zde zahrnut také Maxwellovo elementární model pro relaxaci napětí a visko-elastické vlastnosti. Model dále pracuje s chováním lepidla při různých teplotách. To napomáhá k predikci vytvrzování (Gupta, 2007).

Všechny tyto modely jsou vytvářeny v programu Matlab, který spolehlivě a rychle vytvoří rovnice a grafické výsledky. Před prvním lisováním je model vždy nutné prakticky ověřit experimentálním způsobem (Gupta, 2007).

#### **Shrnutí, co model zahrnuje:**

- Modelování přenosu tepla a hmoty: tyto grafy nám ukazují změny obsahu vlhkosti, teplotní profil a tlak par v průběhu lisování.
- Modelování reologie vláknitého koberce: tato část modeluje mechanické a reologické vlastnosti měnící se s obsahem vlhkosti a teplotou v průběhu lisování. Tyto modely jsou potřebné k pochopení propojení mezi lisovacími parametry a hustotním profilem.
- Vytvrzení lepidla: Rychlost vytvrzení lepidla při různých teplotách v panelu určuje množství tepla a vodní páry uvolněné ve vláknitém koberci. Rovnice simulace výsledného hustotního profilu musí počítat s druhem lepidla a jeho vytvrzovací teplotou.

### **3.1.2 Empirický model**

Empirický model využívá statistických metod k propojení materiálových a výrobních proměnných s konečnými mechanickými vlastnostmi desek. Mezi tyto vlastnosti se řadí hustota na krajích a středu desky, pevnost v ohybu, modul pružnosti a soudržnost. Dále jsou zahrnuty teplota jádra desky a vnitřní tlak. Velmi záleží, pro jaký výrobek ze dřeva je model použit. Pro každý výrobek je modelování odlišné a výše popsané vlastnosti jsou vyjmenovány obecně (Gupta, 2007).

## **3.2 Parametry sledované při lisovacím procesu**

K tomu, aby byl lisovací proces co nejlépe optimalizovaný, je potřeba znát souvislosti mezi všemi procesy probíhající při výrobě MDF desek. Všechny důležité veličiny sledované při výrobním procesu jsou uvedeny níže.

### **3.2.1 Pohyb vlhkosti a přenos tepla**

Pohyb vlhkosti a přenos tepla do dřevovláknitého koberce v průběhu lisování jsou fyzikální procesy, které jsou na sobě závislé. I když úplné vzájemné působení



tepla a vlhkosti nejsou doposud zcela objasněny, stále existuje obecná pochopení těchto pojmů, na kterých mnozí vědci intenzivně pracovali (Bolton, Humphrey, 1988).

Deska lisu je hlavním zdrojem tepla. Voda, která je ve vázaném stavu obsažená ve dřevní hmotě a je spojená s lepidlem, se při kontaktu s deskou lisu ihned začne odpařovat. Toto odpařování má za následek okamžitý nárůst tlaku par v prostorách vnější strany desky, a proto je tlak plynu směřovaný do středu dřevovláknitého koberce. Jakmile pára dojde do chladnější vrstvy v koberci, zkondenzuje a uvolní latentní teplo. Tím se docílí značné zvýšení teploty, ale také díky kondenzaci stoupne vlhkost. Jakmile dosáhne vlhkost svého maxima, teplo, které se přenáší z povrchu do této zóny, začne znovu tuto vlhkost odpařovat. Celý cyklus takto pokračuje, dokud nedojde do střední roviny desky (Bolton, Humphrey, 1988).

Současně s popsáním přenosem teploty a vlhkosti od povrchu do středu desky probíhá další proces úniku tepla a tlaku páry. Tento jev je způsoben zvyšováním tlaku par a teploty v horizontálním směru jednotlivých vrstev a následným únikům přes hrany (Bolton, Humphrey, 1988).

Vývoj teploty na různých místech může být monitorován termočlánky zalisovanými do desky. Pro změření vnitřního tlaku plynu se používá tenká ocelová trubice, která je připojena na tlakový snímač. Tato technika byla poprvé zaznamenána v literatuře Denisov a Sosnin (1967), kde bylo popsáno mnoho výzkumných a průmyslových aplikací.

### **3.2.2 Tepelná vodivost**

Vedení je tepelný přenosový mechanismus, kde u pevných nebo kapalných látek dochází k přenosu tepla z oblasti o vyšší teploty do oblasti s nižší teplotou. Tento vztah mezi tepelným tokem a teplotním gradientem popisuje Fourierův zákon (Gefahrt 1977).

**Fourierův zákon:** Vektor hustoty tepelného toku  $q$  je úměrný gradientu teploty  $\nabla t$  a má opačný směr (Mikulčák, 2003).

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla t$$

- $q$  - hustota tepelného toku
- $\lambda$  - součinitel tepelné vodivosti
- $\nabla t$  - gradient teploty

Význam vodivého přenosu tepla se mění s časem a prostorem v podložce po celou dobu lisování. Gefahrt (1977) rozlišuje tři oblasti, kde je jedna část přenášeného tepla řízena právě vedením. Tyto zóny jsou pak rozhraní mezi deskou lisu a vláknitým kobercem, vnější oblast mezi povrchem a párou a vnitřní oblast koberce mezi přední vrstvou páry a střední vrstvou koberce. Vedení tepla dřevovláknitým kobercem bylo popsáno jako hlavní přenos tepla Bowenem (1970). Role záření mezi deskou lisu a kobercem je považováno za zanedbatelné. Strickler (1959) dále uvedl, že lisovací tlak ovlivňuje vývoj teploty ve střední vrstvě dřevovláknitého koberce. Dospěl k závěru, že vyšším lisovacím tlakem se zvyšuje tepelná vodivosti (Strickler 1959; Humphrey, Bolton 1989a).

### 3.2.3 Konvekce plynu

Obecně lze říci, že konvekce je přirozený pohyb kapaliny nebo plynu. Pohyb směsi páry a vzduchu ve dřevovláknitém koberci je tzv. nucená konvence, řízená celkovým gradientem tlaku, který se vyvíjí v průběhu lisování.

Vzhledem k tomu, že dřevovláknitý koberec lze klasifikovat jako porézní materiál, můžeme zde využít Darcyho zákon.

**Darcyho zákon:** Je matematický vztah, který definuje rychlost průtoku kapaliny nasycenou zónou pevného porézního tělesa. Jedná se o lineární závislost mezi filtrační rychlostí kapaliny  $v_f$  (resp. průtočným množstvím  $Q$ ) a piezometrickým (hydraulickým) gradientem  $I$ . (Mikulčák, 2003).

$$v_f = \frac{Q}{A} = k \cdot I$$

- **k** – koeficient filtrace
- **Q** – objemový průtok filtrem délky **L** s průřezem **A**
- **I** – piezometrický gradient  $(h_1 - h_2)/L$ , tj. výškový rozdíl mezi úrovní hladiny **h<sub>1</sub>** nad vstupem do filtru úrovní hladiny **h<sub>2</sub>** přiléhající k spodní výtokové ploše dělený délkou (výškou) filtru **L**
- **v<sub>f</sub>** – filtrační rychlost

Denisov (1975) říká, že pórovitost dřevovláknitého koberce vytváří mezery mezi jednotlivými vlákny a ne samotné buněčné stěny vlákna. Darcyho zákon platí pouze v případě, že proudění je laminární. V případě turbulentního proudění není proudění úměrné gradientu tlaku. Denisov dále zjistil, že proudění skrz dřevovláknitý koberec není čistě lineární a vznikají tu odchylky. Von Haas (1998) toto zjištění potvrdil, ale došel k závěru, že tato odchylka je zanedbatelná a můžeme uvažovat lineární proudění. Humphrey a Bolton (1989a) poukázali na to, že zanedbatelné turbulentní proudění může mít nějaký význam při vstřikování páry u lisovacího procesu.

### 3.2.4 Ostatní vlastnosti

Dalšími sledovanými vlastnostmi při lisovacím procesu mohou být: *Difuze páry, kapilární pohyb vlhkosti, propustnost a pórovitost dřevovláknitého koberce a tepelná sorpce* (Gupta, 2007).

## 3.3 Stručná analýza lisovacích modelů

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, v literatuře můžeme nalézt dva přístupy k vytváření modelů. První kategorií jsou fundamentální modely, popisující fyzikální, nebo chemické procesy a druhá kategorie jsou tzv. modely empirické, které využívají statistiku k propojení výrobních a materiálových proměnných s konečnými mechanickými vlastnostmi výrobku. Dále budou popsány nejznámější fundamentální modely (Gupta, 2007).

Jeden z prvních fundamentálních modelů pro MDF byl založen na principu přenosu tepla do hmoty a základních fyzikálních principech. Byl vyvinut a popsán

Humphreyem (1982). Model předpovídá teplotu, tlak par a obsah vlhkosti v průběhu lisování. Využívá cylindrický souřadný systém. Nevýhodou toho modelu je, že zanedbává rychlost uzavírání lisu a vytvrzování lepidla ve vnitřním prostoru koberce. Výsledná data z tohoto modelu se celkem dobře shodují s reálnými. Nástavbu na tento model vytvořil Haselein (1998), kdy k tomuto modelu přidal reologické vlastnosti dřevovláknitého koberce při kompresy a při relaxaci napětí.

Samozřejmě vstupní podmínky a návrh lisovacího procesu jsou velmi individuální a vždy záleží na druhu lisované desky a druhu samotného lisu. V dnešní době se nejčastěji používají etážové, kontinuální, injektážní, vysokofrekvenční a mikrovlnné lisu (Carvalho, Costa, 2003).

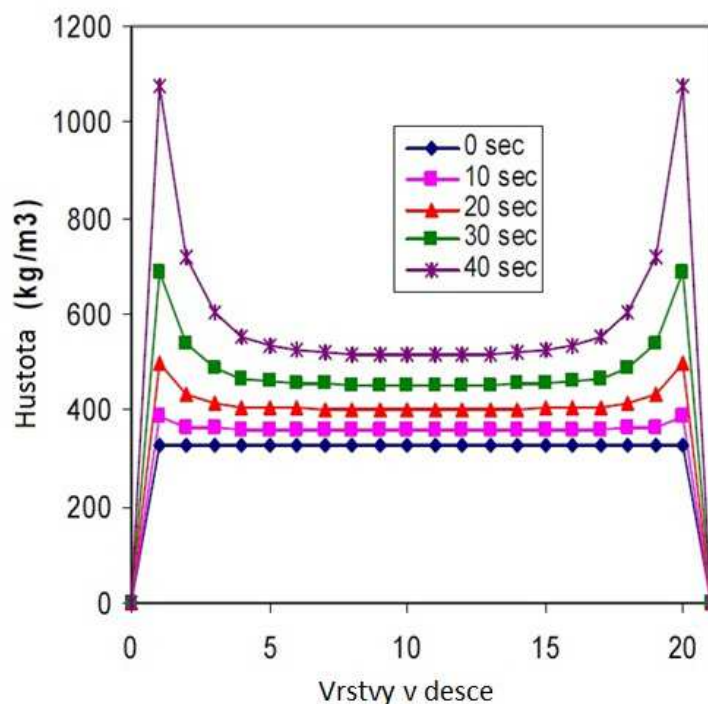
Pro MDF desky se dnes často používá trojrozměrný model prezentovaný Carvalhem a Costou (1998) popisující přenos tepla ve hmotě a předpovídá prostorový a časový vývoj tepoty, vlhkosti, tlaku páry a relativní vlhkosti. Abychom mohli model vytvořit, potřebujeme vstupní parametry výrobku. Gupta (2006) na základě tohoto modelu vytvořil simulaci lisovacího procesu. V Tabulka 3-1, jsou uvedeny vstupní parametry, které Gupta použil pro vytvoření modelu.

Hustota panelu	650 kg/m <sup>3</sup>
Hmotnost vlákna	0,78 kg
Obsah vlhkosti	10,50%
Obsah lepidla	10,50%
Teplota lisu	180,2 °C
Lisovací čas	150 s
Rychlost uzavírání lisu	40 s
Průměrná tloušťka	13 mm
Počet vrstev v desce	10
Lisovací tlak	6 MPa

**Tabulka 3-1: Vstupní parametry pro simulaci dle Gupty (Gupta, 2006).**

V Graf 3-1 můžeme vidět, jak se tvoří hustotní profil v deskách při lisování. Deska je rozdělena na 20 vrstev. Tyto vrstvy jsou vyobrazeny na ose x. Osa y ukazuje hustotu v kg/m<sup>3</sup>. Každá křivka znázorňuje hustotní profil měřený po 10 sekundách od 0 do 40 sekund. Z grafu je tedy patrné, že na počátku lisování desky nemá žádný hustotní profil. Už po 10 sekundách můžeme pozorovat zvyšování hustoty na okrajích

desky. Takto to pokračuje až do 40 sekund, kde hustota na okrajích desky je přibližně  $1100 \text{ kg/m}^3$  a ve středu  $550 \text{ kg/m}^3$ .

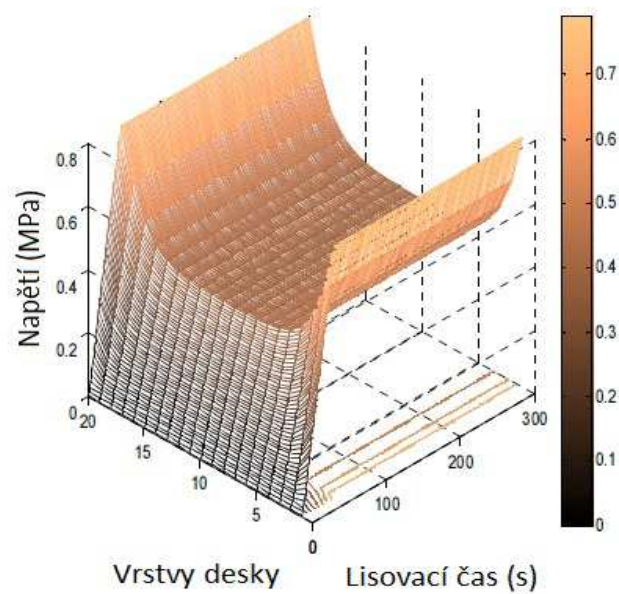


**Graf 3-1: Ukázka simulace vývoje hustotního profilu dřevovláknité desky (Gupta, 2006).**

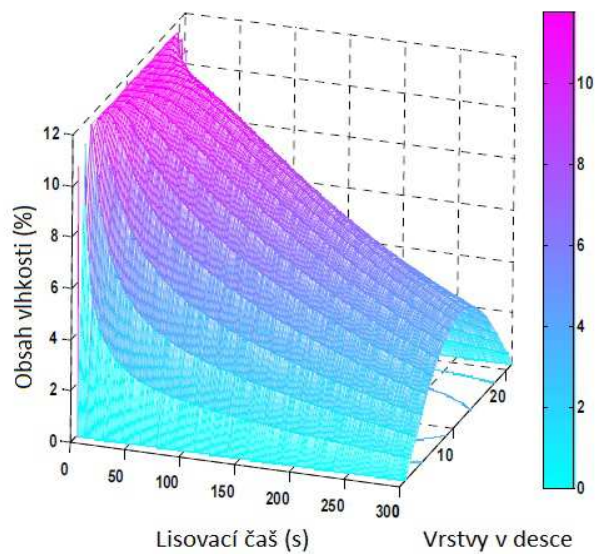
Graf 3-2 zobrazuje průběh napětí v jednotlivých vrstvách desky v závislosti na lisovacím čase. Z grafu vyplývá, že nejvyššího napětí v průřezu dosáhneme již při prvních 50 s lisování. Do konce lisovacího procesu (300 s) se již nemění. Dále můžeme vidět, že podobně jako u hustotního profilu je i napětí v každé vrstvě rozdílné. Nejvyšší se nachází na okrajích, kde se pohybuje okolo 0,8 MPa, zatímco ve středu desky se pohybuje okolo 0,5 MPa.

Další součástí simulace je změna obsahu vlhkosti průřezu v závislosti na lisovacím čase. Na Graf 3-3 je vidět, že koberec vstupuje do lisu s obsahem vlhkosti větší než 12%. Jakmile se spustí lis, začne stoupat teplota a díky tomu se začne vlhkost vázaná ve vláknech snižovat. Ve středu desky teplota klesá téměř lineárně z 12% na 6%. Na okrajích desky se koberec přímo dotýká teplých plátů lisu a vlhkost se po dokončení lisování dostane na 0%.





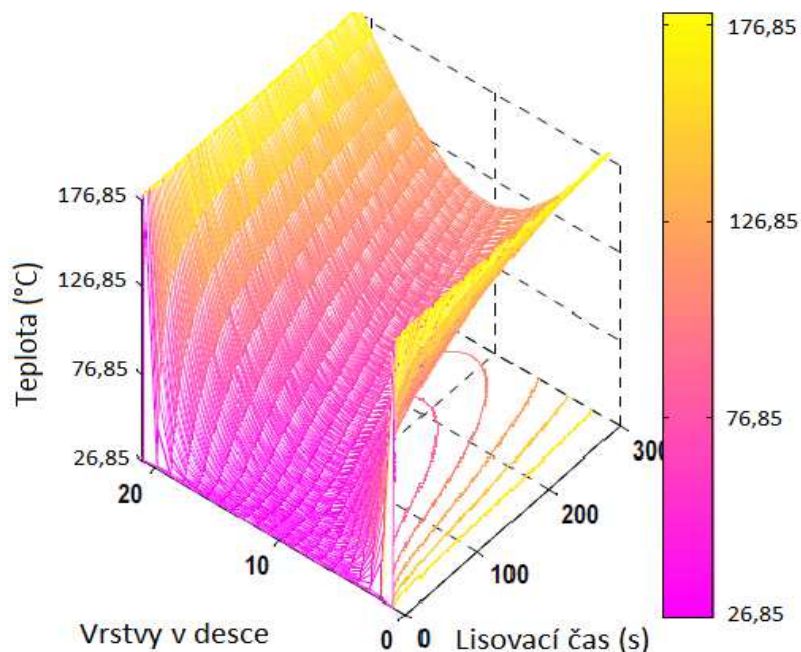
**Graf 3-2: 3D model závislosti napětí a lisovacího času v průřezu MDF desky (Gupta, 2006).**



**Graf 3-3: 3D model závislosti lisovacího času na obsahu vlhkosti v průřezu desky (Gupta, 2006).**

Teplota je stejně jako hustotní profil také nerovnoměrná. Na Graf 3-4 můžeme vidět, že teplota před vstupem do lisu je 26,86 °C. Jakmile se vláknitý koberec dotkne desky lisu, teplota na povrchu ihned stoupne téměř na maximum 176,85 °C. Díky tloušťce desky se koberec neprohřívá rovnoměrně, stejně jako tomu bylo v předchozích grafech s hustotou a vlhkostí. Na povrchu lisovaného koberce se tedy

teplota již nezmění až do konce lisování. Střed desky se však pomalu prohřívá, na konci simulovaného procesu byla teplota zjištěna přibližně 90 °C.



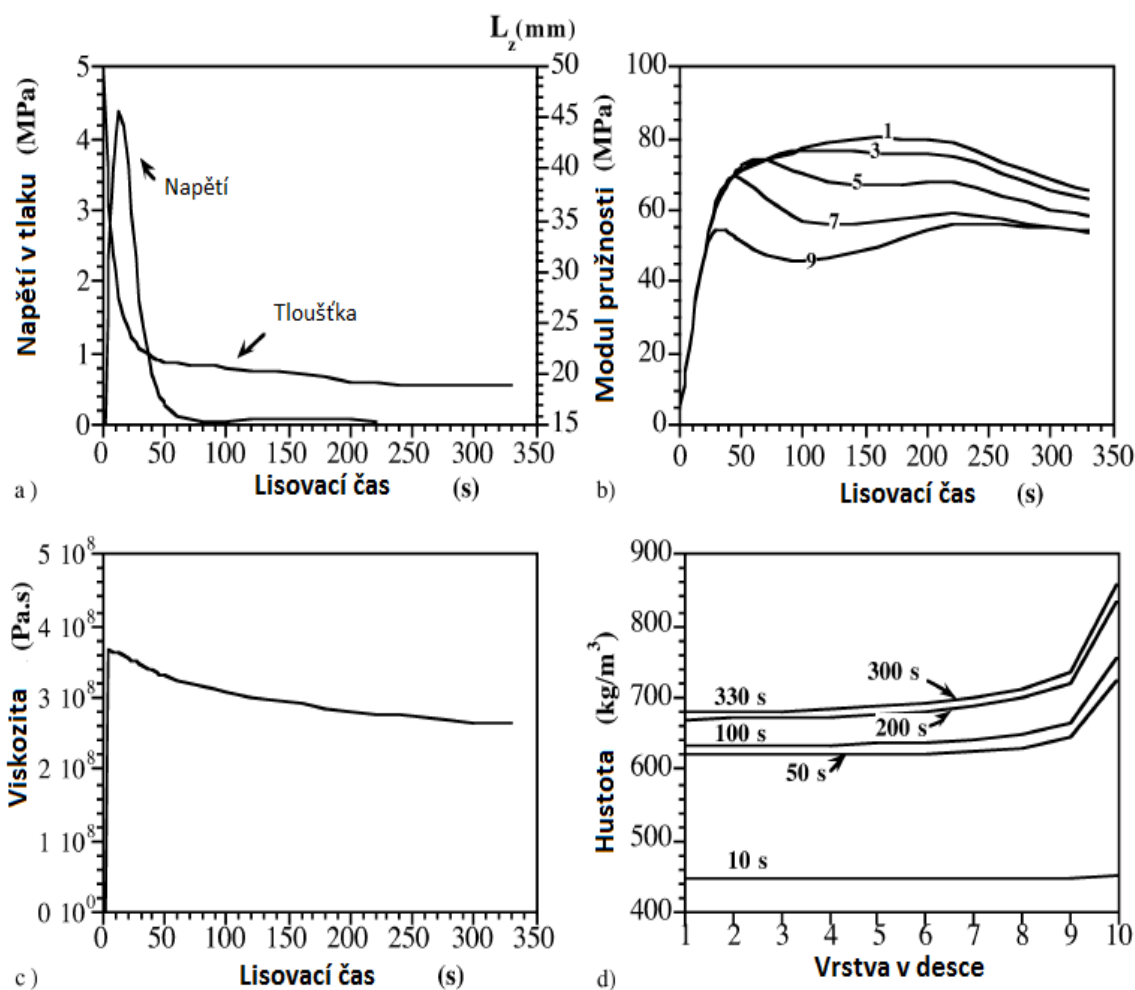
**Graf 3-4: 3D model závislosti lisovacího času na rozložení teploty v profilu desky. (Gupta, 2006).**

Součástí tohoto modelu však nebyla simulace vývoje tlaku plynů a vývoj parciálního tlaku plynu v desce. Jak se tyto veličiny chovají je dobře popsáno v následujícím modelu vytvořeného Carvalhem a Costou (2003). Vstupní parametry, při kterých byl tento model vytvořen, jsou uvedeny v Tabulka 3-2.

Hustota panelu	750 kg/m <sup>3</sup>
Obsah vlhkosti	11 %
Obsah lepidla	8,5 %
Teplota lisu	190 °C
Lisovací čas	330 s
Rychlost uzavírání lisu	40 s
Tloušťka	19 mm

**Tabulka 3-2: Tabulka pro simulaci lisovacího modelu dle Carvalha a Costy (Carvalho, Costa, 2003).**

Na Obrázek 3-2 jsou zobrazena modelovaná data. Obrázek 3-2a zobrazuje křivky průběhu napětí v tlaku a změnu tloušťky vláknitého koberce. Je zde vidět, že nejvyšší napětí vzniká již při začátku lisování, tam hodnota tlaku je okolo 4,2 MPa, dále již zatížení jen klesá. Tloušťka se pochopitelně mění od výšky vláknitého koberce do požadované tloušťky výsledné MDF desky. Je zde vidět podobně jako u tlaku, že k největšímu stlačení dojde také na začátku přibližně do 50 s. Dále už se tloušťka mění jen minimálně. Obrázek 3-2b nám ukazuje průběh Youngovo modulu pružnosti v jednotlivých vrstvách desky. Křivka č. 1 zobrazuje střed desky a křivka č. 9 kraj desky. Můžeme zde vidět, že díky hustotnímu profilu se mění i moduly pružnosti. Obrázek 3-2c popisuje tzv. dynamickou viskozitu. Tato veličina charakterizuje vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Z grafu je patrné, že viskozita dřevovláknitého koberce okamžitě stoupne při stisknutí lisu a zatuhnutí lepidla. V průběhu lisovacího procesu o něco klesne, ale po otevření lisu již lepidlo zatvrdne a viskozita zůstane na stabilní úrovni, v tomto případě je to  $3 \cdot 10^8$  Pa.s. Poslední obrázek 3-2d ukazuje hustotní profil desky, kde deska byla rozdělena do 10 vrstev. Vrstva 1 je střed desky a vrstva 10 okraj desky. I tyto křivky ukazují, že hustota v desce je rozdílná, ve středu tedy vrstvy 1 je hustota po skončení lisování přibližně  $680 \text{ kg/m}^3$ . Na krajích desky je hustota vyšší pohybuje se okolo  $950 \text{ kg/m}^3$ . (Carvalho, Costa 2003).

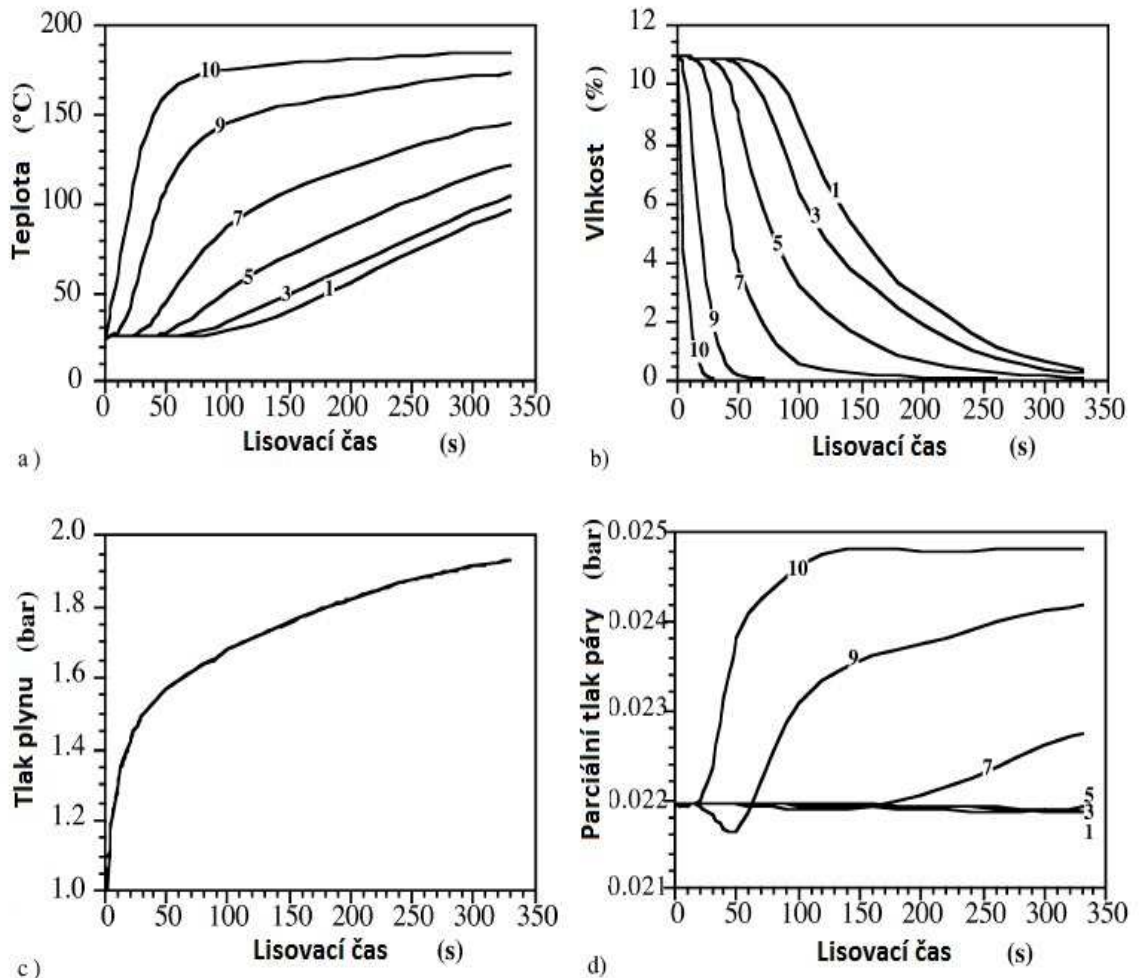


**Obrázek 3-2: Grafy lisovacího modelu vytvořeného Carvalhem a Costou.**

a) graf popisující napětí v tlaku a změnu tloušťky desky v průběhu lisování, b) graf zobrazující modul pružnosti v jednotlivých vrstvách v závislosti na lisovacím čase, c) graf zobrazující vývoj viskozity v závislosti na lisovacím čase, d) graf zobrazující hustotní profil desky (Carvalho, Costa 2003).

Na Obrázek 3-3 jsou zobrazeny grafy proměnných závislých na lisovacím čase. V grafech 3-3a, b, d je deska rozdělena do vrstev 1-10. Vrstva 1 je střed desky a vrstva 10 je povrch desky. Obrázek 3-3a popisuje průběh teploty, podobně jako u modelu podle Gupty zde můžeme vidět, že teplota ve středu desky je podstatně nižší, než teplota na povrchu, na tento fakt přímo navazuje graf na obrázku 3-3b, který popisuje vlhkost. Ve střední vrstvě, kde je nižší teplota, vlhkost klesá mnohem pomaleji a i po konci lisování je o něco vyšší, než teplota na okraji desky. Na grafu 3-3c, jelikož se lisováním snižuje pórovitost v koberci, můžeme pozorovat výrazné zvyšování tlaku plynu, který může unikát pouze přes hrany a plocha hran je menší, než plocha celé

desky, kde plyn vzniká, proto se tlak zvyšuje. Na grafu 3-3d můžeme sledovat nárůst parciálního tlaku páry v povrchových vrstvách. Ve středu desky zůstane parciální tlak páry prakticky beze změny. To je způsobeno především snížením pórovitosti a zhoršením prostupnosti pro teplo a hmotu. Tímto výzkumem se zabýval Carvalho (1999) (Carvalho, Costa 2003).



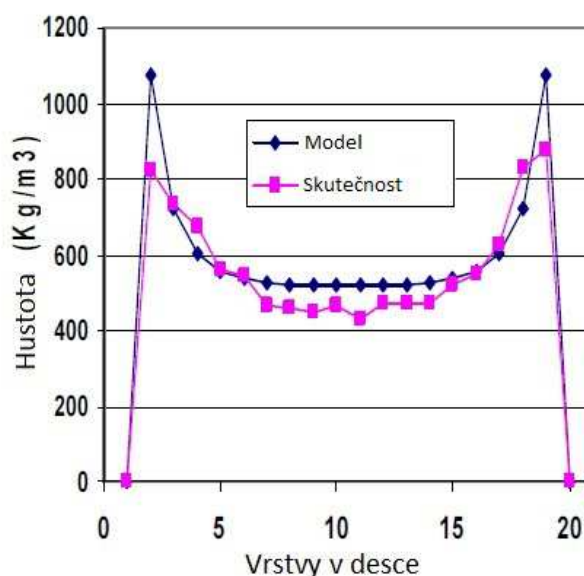
**Obrázek 3-3: Grafy lisovacího modelu vytvořeného Carvalhem a Costou.**

a) Vývoj teploty ve vrstvách desky v průběhu lisování, b) snižování vlhkosti v jednotlivých vrstvách desky v průběhu lisování, c) v důsledku snížení pórovitosti narůstá tlak plynu uvnitř desky d) zobrazení parciálního tlaku páry v jednotlivých vrstvách desky (Carvalho, Costa 2003).

### 3.4 Porovnání dat modelů a experimentálními daty

Důležité samozřejmě je, aby se modely co nejvíce přibližovaly realitě. Proto se provádí měření vlastností desek experimentálně a posléze se skutečné hodnoty porovnávají s těmi modelovými. Díky tomu se dají modely nadále rozvíjet a zpřesňovat. V následujícím textu si ukážeme několik grafů, které porovnávají hodnoty předpokládané modelem a posléze skutečné vlastnosti (Gupta, 2007).

Jako první bude uvedeno srovnání modelů dle Gupty. Nejdůležitější ze sledovaných veličin je hustotní profil desky. Jak bylo výše zmíněno, deska nemá v průřezu stejnou hustotu, na krajích je vyšší a směrem do středu se snižuje. Z Graf 3-5 je patrné že model kopíruje s jistou odchylkou skutečné hodnoty. Největší rozdíl je v předpokládané hustotě na povrchu desky, kde byla předpokládaná hustota přes 1000 kg/m<sup>3</sup> a skutečná se pohybovala mezi 800 až 900 kg/m<sup>3</sup> (Gupta, 2007).

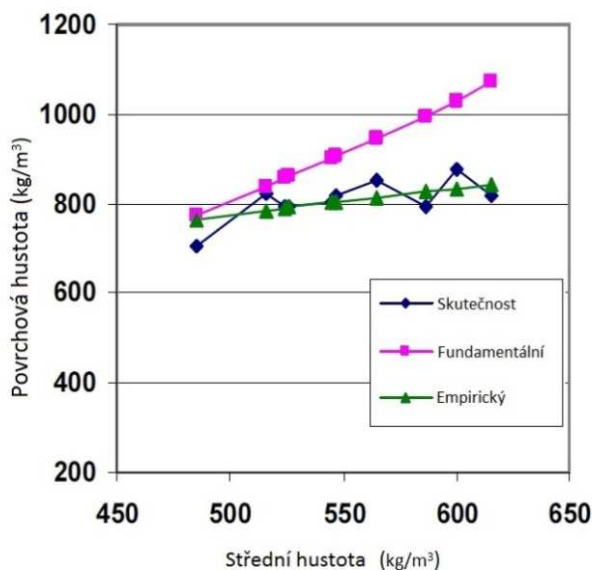


**Graf 3-5: Porovnání hustotního profilu u fundamentálního modelu a experimentálního měření (Gupta, 2006).**

Pro rozhodování, jaký model před samotnou výrobou využít, se také používá poměr mezi hustotou na povrchu desek a střední hustotou. Z logiky věci by se mohlo zdát, že čím větší hustota na povrchu, tím větší bude i celková střední hustota výrobku. S tímto faktem pracuje fundamentální analýza. Avšak z Graf 3-6 je zřejmé, že se fundamentální model od skutečnosti liší. Pravděpodobnou příčinou je, že při

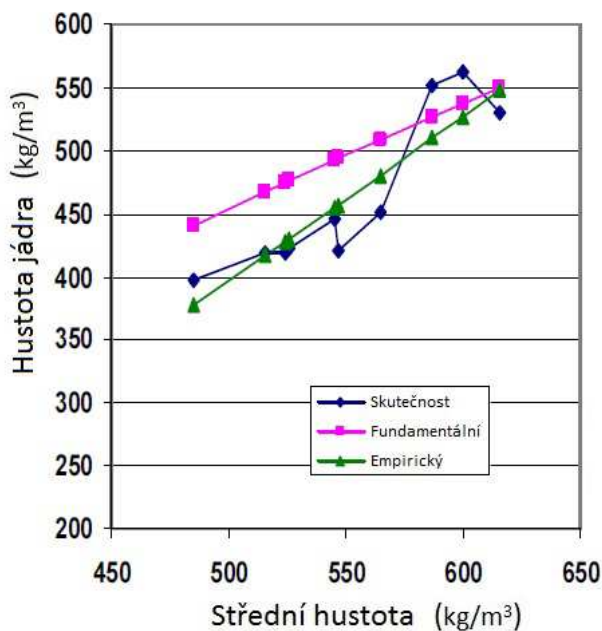


výpočtu fundamentální analýzy byl použit modul pružnosti masivního dřeva, díky tomu jsou výsledky zkruseny. Empirický model už je přesnější (Gupta, 2007).



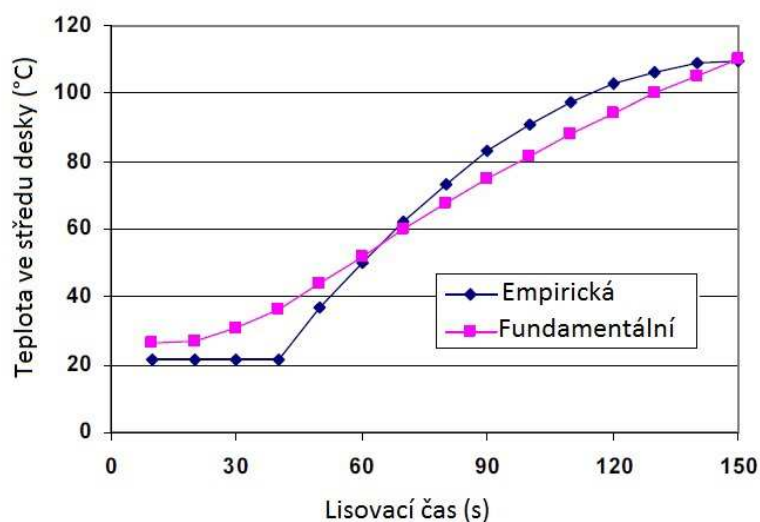
**Graf 3-6: Poměr mezi povrchovou hustotou a střední hustotou u jednotlivých modelů (Gupta, 2006).**

Druhý Graf 3-7 srovnává hustotu v jádru desky se střední hustotou. V tomto případě jdou oba modely shodně se skutečným měřením. Dochází jen k drobným odchylkám.



**Graf 3-7: Poměr mezi hustotou jádra a střední hustotou u jednotlivých modelů (Gupta, 2006).**

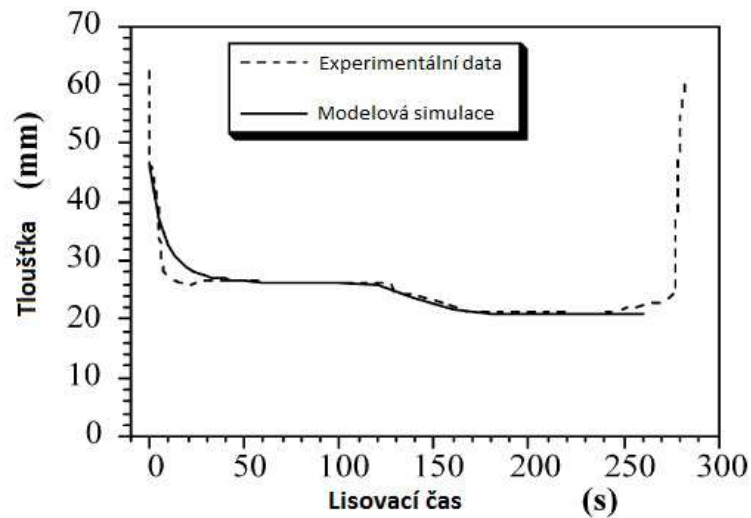
Jak již bylo zmíněno, je nutné modelovat průběh teplot v jádru desky. Čím déle je deska v lisu, tím je teplota vyšší. Graf 3-8 nám znázorňuje, jak se předpokládaná teplota liší u každého modelu zvlášť. Z obrázku je dále patrné, že na začátku vykazuje křivka fundamentální metody vyšší teplotu, poté mírně klesá. Tento jev je pravděpodobně způsoben ztrátou díky vyzařování tepla do okolí při lisování. (Gupta, 2007).



**Graf 3-8: Srovnání průběhu teplot ve středu desky závislých na lisovacím času (Gupta, 2006).**

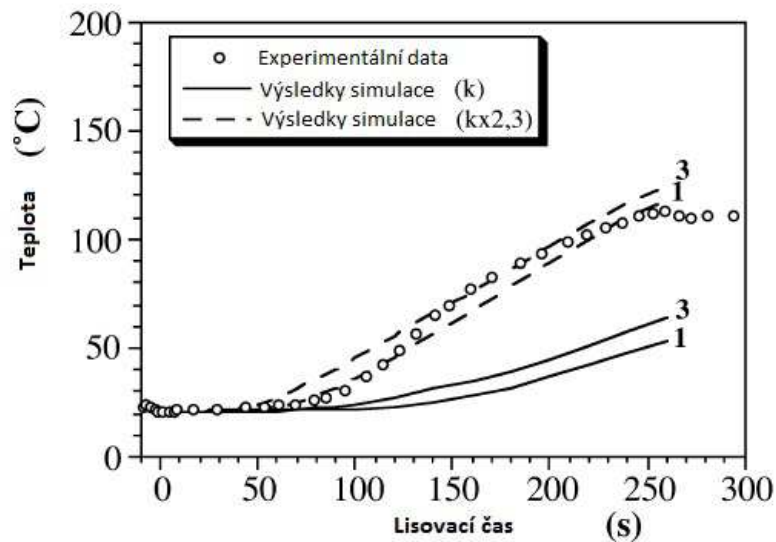
V předchozím textu byl uveden model od Carvalho a Costy, je tedy nutné udělat srovnání s experimentálním měřením i zde.

Jako první byla srovnána předpokládaná tloušťka. Z Graf 3-9 můžeme vidět, že čerchovaná čára, která představuje experimentální měření zjištěné výrobcem, téměř kopíruje data zjištěná modelem. Jediná odchylka vzniká v 10. sekundě, kdy snížení tloušťky u reálného měření je ostřejší než model předpokládal (Carvalho, Costa, 2003).



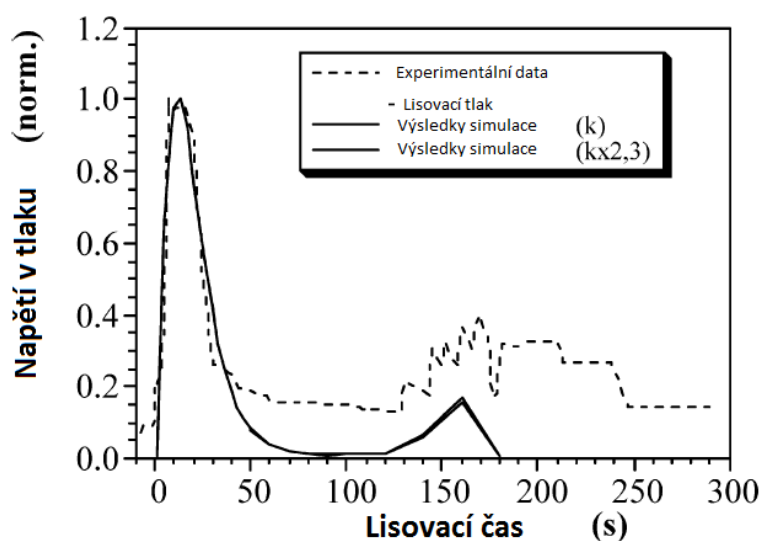
**Graf 3-9: Srovnání simulované předpokládané tloušťky a reálné zjištěné experimentální metodou (Carvalho, Costa, 2003).**

Graf 3-10 ukazuje experimentální a simulovaný vývoj teploty v závislosti na čase ve středu desky. Výsledky byly získány díky termočládku umístěného blízko středu vláknitého koberce. V simulaci se použily dvě hodnoty tepelné vodivosti materiálu. Výsledky se jako v předchozím případě opět shodovaly s naměřenými hodnotami, lze tedy tvrdit, že model je poměrně přesný předpokládal (Carvalho, Costa, 2003).



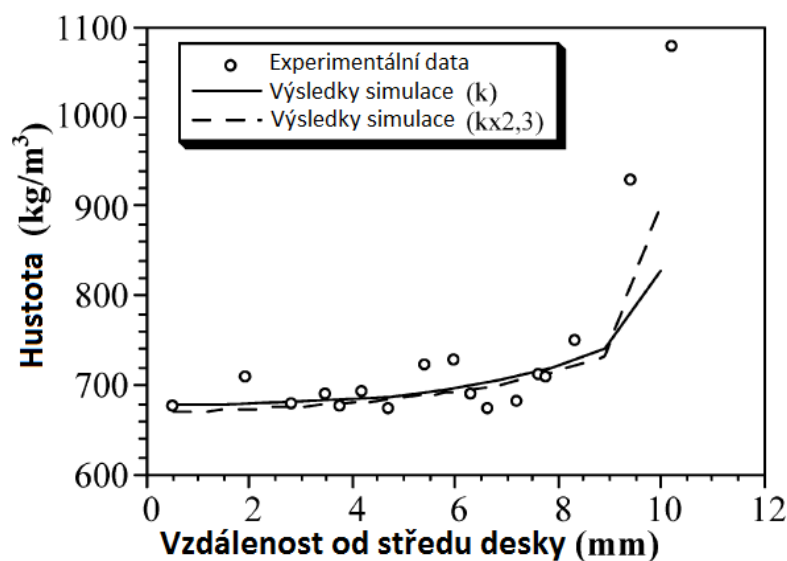
**Graf 3-10: Porovnání vývoje teplot ve středu desky mezi simulovaným modelem a reálnými daty (simulovány byly dvě rozdílné tepelné vodivosti desky) (Carvalho, Costa, 2003).**

Graf 3-11 popisuje rozdíl mezi simulovaným tlakem a reálným tlakem změřeným ve výrobě. Hodnoty pro tlak byly normalizovány, protože reálný tlak z lisu je znám pouze z pístu hydraulického systému a není rozdělený na jednotlivé etáže. Analýza ukazuje, že model předpovídá větší pokles tlaku po uzavření lisu. To znamená, že relaxace při reálném lisování je nižší, než se předpokládalo při simulaci (Carvalho, Costa, 2003).



**Graf 3-11: Porovnání modelovaného lisovacího tlaku s reálným tlakem naměřeným při výrobě (simulovány byly dvě rozdílné tepelné vodivosti desky) (Carvalho, Costa, 2003).**

Na Graf 3-12 můžeme vidět srovnání skutečného hustotního profilu se simulovaným. Měření hustotního profilu bylo zjištěno pomocí densimetru využívající  $\gamma$ -paprsek. Díky měření se došlo k závěru, že předpokládaný hustotní profil vytvořený pro obě tepelné vodivosti desek se shoduje s experimentálním měřením. Tento parametr je velmi důležité sledovat kvůli mechanickým vlastnostem výsledného produktu. Sledují se hlavně modul pružnosti v ohybu, pevnost v ohybu a pevnost v tahu kolmo k rovině desky. Bohužel přímé porovnání těchto mechanických vlastností s těmi, které mohou být předpovězeny, není možné. Z tohoto důvodu se zjistil modul pružnosti v tlaku na několika vzorcích MDF destiček o rozměrech 50 x 50 x 16 mm (Carvalho, Costa, 2003).



**Graf 3-12: Porovnání modelového profilu hustoty s experimentálně změřeným. (0 je střed desky, 12 je povrch desky) (Carvalho, Costa, 2003).**

Když tedy shrneme porovnání predikčního modelu a experimentálních výsledků z výrobního závodu na výrobu MDF, můžeme analyzovat vývoj dvou závislých proměnných: teploty a tlaku, z mechanických vlastností potom vertikální hustotní profil a modul pružnosti. Model může přijatelným způsobem předpovídat vývoj teploty ve středu desky během lisovacího cyklu (budeme-li brát predikci pro vyšší hodnotu tepelné vodivosti). Namáhání v tlaku sleduje v reálné výrobě protitlak lisu. Jelikož bylo zjištěno, že relaxace v reálných podmínkách byla nižší, než se předpokládalo, viskózní složka bude tedy vyšší. Pokud jde o mechanicko-fyzikální vlastnosti, model je schopen předpovědět velmi přesně vertikální hustotní profil jakožto i Youngův modul pružnosti (Carvalho, Costa, 2003).

Nicméně modely mají stále nedostatky, které se dají postupně odstraňovat. Bohužel jediným způsobem jak se dostat k reálným datům je spolupráce s firmami, které výzkum umožní. Ale situace se zlepšuje a samotné společnosti zjistily, že je takovýto výzkum zapotřebí a díky přesnějším predikcím všech procesů výroby je možné dosáhnout lepších vlastností jejich výrobků a minimalizovat spotřebu energie (Carvalho, Costa, 2003).

### 3.5 Závěrečné shrnutí lisovacích modelů

Stručně byly přestaveny dvě základní skupiny modelů dle Gupty. Důležité je však specifikovat, kdy je vhodné použít fundamentální model a kdy zase model empirický.

Empirický model předpovídá fyzikální vlastnosti daného lisovacího cyklu, jako obsah vlhkosti, obsah pryskyřice. Výsledky jsou vhodné pro nastavení podmínek, ze kterých jsou odvozeny regresivní rovnice. Model dává přesné výsledky pro tloušťky desek v rozmezí 10 až 13,5 mm a hustotě od 485 kg/m<sup>3</sup> do 718 kg/m<sup>3</sup> (Gupta, 2006).

Fundamentální modely mají schopnost přesně předpovědět vertikální hustotní profil pro širokou škálu podmínek. Tyto druhy modelů jsou mnohem složitější a variabilnější než empirické. Můžeme zde měnit parametry jako například: teplotu desek lisu, počáteční vlhkost vláken a rychlost uzavírání lisu. Dále pak můžeme sledovat dopad změn těchto parametrů na konečný hustotní profil desky (Gupta, 2006).

Závěrem lze říci, že modely nám v dnešní době dokáží s odpovídající přesností předpovědět přenos tepla a hmoty (teplota, vlhkost a tlak plynu), chemické reakce a mechanické chování (lisovací tlak, napětí, modul pružnosti a hustotu). Ve zde představených modelech byly použity typické provozní podmínky a parametry (fyzikální, mechanické a transportní vlastnosti) pro tepelné lisování MDF desek jaké se používají v reálných provozech. Pro vytvoření modelů byly použity teoretické korelace z literatury zabývající se vlastnostmi dřeva, dřevotřískových desek nebo MDF desek. Kinetika UF vytvrzovací reakce byla odvozena Ramanovou spektroskopií. Díky těmto simulacím se nám podařilo lépe pochopit složité mechanismy spojené s lisovacím procesem. (Carvalho, Costa, 2003).



## 4. Experimentální měření v procesu komerční výroby

Všechna měření probíhala ve společnosti DDL Lukavec. Měřicí systém byl vybrán od německé společnosti GreCon. Společnost DDL Lukavec s ním má již zkušenosti a výsledky jsou přesné.

### 4.1 GreCon

Německá společnost GreCon patří mezi přední výrobce preventivní požární ochrany a měřících systémů na celém světě. Jejich měřicí systémy používají největší výrobci deskových materiálů a jsou prověřeny i certifikovány (GreCon, 2014).

#### 4.1.1 Sada GreCon

Měřicí systém GreCon funguje na principu čidel, které se vloží v průběhu výrobního procesu do vláknitého koberce. V koberci potom putují do etážového lisu, kde čidla měří teplotu a tlak (GreCon, 2014).

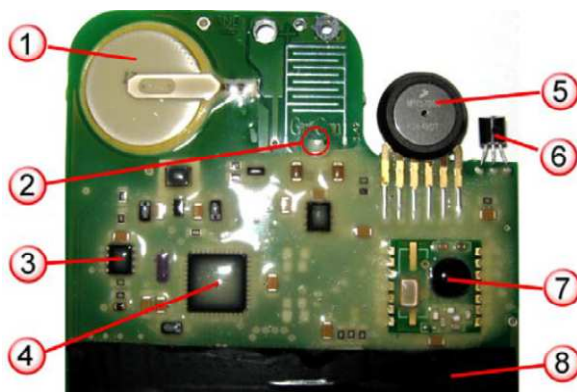


Obrázek 4-1: Měřicí sada GreCon.

Celý tento systém funguje bezdrátově, což nám umožňuje sledovat lisovací proces v aktuálním čase. Všechna data se zároveň ukládají do vnitřní paměti čidel a po vychladnutí desky je lze kompletně načíst do softwaru GreCon, kde s nimi můžeme dále pracovat. Pro měření se používají dva druhy čidel. Oba jsou jednorázové a fungují bezdrátově (GreCon, 2014).

### 4.1.2 Čidla ContiLog

Je starší typ, který obsahuje aktivní vysílač. To znamená, že po vložení čidla do vláknitého koberce můžeme do vzdálenosti šesti metrů zjišťovat aktuální hodnoty teploty a tlaku v desce. Bohužel díky aktivnímu vysílači vydrží baterie v čidlu pouze pět až šest hodin. Proto se tento druh čidel používá pro zmapování lisovacího procesu (GreCon, 2014).



**Obrázek 4-2: Záznamové čidlo ContiLog (GreCon, 2014)**

1 – Napájecí baterie, 2 – Dioda zobrazující zapnutí čidla, 3 – Paměťový čip o velikosti 32 kB (1056 záznamů), 4 – Procesor zaznamenává naměřené hodnoty v nastaveném čase, 5 – Senzor tlaku plynu, 6 – Senzor teploty, 7 – Rádiový modul (aktivní vysílač), 8 – Izolační páska.

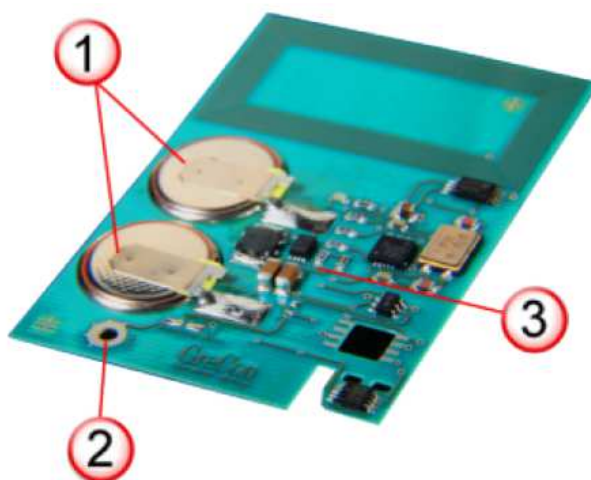
Vlastnosti čidla ContiLog	
Rozměry ( d x š x v )	79 x 67 x 5,5 [mm]
Hmotnost	22 g
Napájecí napětí	3,0 V / 560 mAh (165 mAh)
Absolutní rozsah měření tlaku	0-600 kPa
Maximální chyba měření	2.5 % při 0-85°C
Rozsah měření teploty	od -55 °C do +125 °C
Přesnost měření	+/- 2 °C
Radiofrekvence	868 MHz

**Tabulka 4-1: Parametry čidel ContiLog (GreCon, 2014).**

Pomocí těchto čidel můžeme zjišťovat informace o vytvrzení pryskyřice v panelu, optimalizovat lisovací proces, urychlit celý výrobní proces, analyzovat předcházející procesy (např. hydratace), měřit může kdekoliv v panelu až šest čidel současně. Manipulace je snadná a bezpečná (GreCon, 2014).

### 4.1.3 Čidla EasyLog

Je nejnovější výrobek pro měření teploty ve výrobním procesu u deskových materiálů na bázi dřeva. Na rozdíl od ContiLogu využívá pasivního vysílače. To znamená, že data můžeme načíst pouze pomocí čtecího zařízení. To se přikládá do míst, kde je čidlo zalisováno. Díky tomuto vysílači čidlo může zaznamenávat data až 20 hodin od jeho spuštění. Používá se na zmapování teploty při a po lisovacím procesu. Můžeme zjistit, jak se deska v jednotlivých vrstvách ochlazuje a díky tomu navrhnout lepší klimatizační proces (GreCon, 2014).



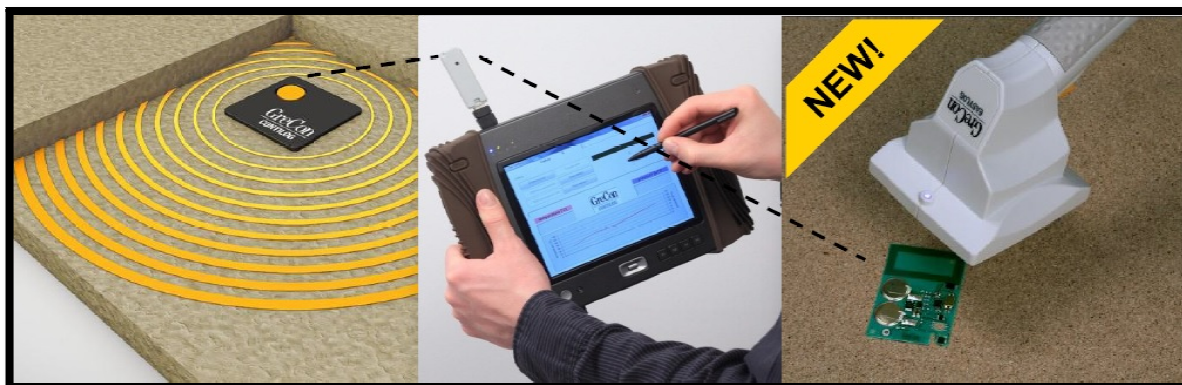
**Obrázek 4-3: Záznamové čidlo EasyLog (GreCon, 2014).**

1 – Napájecí baterie s výdrží až 20 hodin, 2 – Aktivační místo, 3 – snímač teploty a procesor a paměťový čip.

Vlastnosti čidla EasyLog	
Rozměry ( d x š x v )	69 x 45 x 2,5 mm
Hmotnost	7,5 g
Napájecí napětí	3,0 V / 560 mAh (165 mAh)
Měřicí rozlišení	programovatelné ( max. 0,25 ms)
Rozsah měření teploty	od -55 °C do +125 °C
Přesnost měření	+/- 2 °C
Radiofrekvence	868 MHz

**Tabulka 4-2: Parametry čidel EasyLog (GreCon, 2014).**

Pomocí těchto čidel můžeme zjišťovat informace o vytvrzení pryskyřice, optimalizovat lisovací cyklus, díky dlouhé výdrži baterií můžeme analyzovat klimatizační proces, můžeme měřit panely o tloušťce až 10 mm (GreCon, 2014).



Obrázek 4-4: Ukázka měřicího systému GreCon (GreCon, 2014).

Čidlo ContiLog zalisované v desce (vlevo viz Obrázek 4-4), Tablet který zpracovává data (uprostřed), Čidlo EasyLog s čtečkou dat (vpravo).

## 4.2 Metodika měření

Společnost DDL již dříve pracovala s měřícím systémem GreCon na dřevotřískových deskách. Proto bylo rozhodnuto, že se měření bude provádět i na dřevovláknitých deskách o tloušťce 16 mm a hustotě 770 kg/m<sup>3</sup>.

Měřením potřebujeme získat reálná data při lisovacím procesu a na jejich základě zjistit, zdali se shodují s nastavenými hodnotami softwarem lisu. Výsledkem by měla být kalibrace lisovacích parametrů, popř. optimalizace lisovacího modelu. Díky novým čidlům EasyLog je možné měřit teplotu desek i po lisovacím cyklu. Na základě toho získáme data o teplotách desek ve hvězdicovém chladiči. Podle toho, můžeme rozhodnout, zdali je chladicí čas dostatečný, nebo je potřebná úprava.

Čidla budou zalisována do stejné desky MDF 16 mm. Vloženy budou těsně před lisovacím cyklem do středu dřevovláknitého koberce. Vzdálenost od kraje desky je 1000 mm a čidla se umístí minimálně 200 mm od sebe, aby nedocházelo ke zkreslování dat. Deska se před vstupem do lisu označí, abychom posléze mohli načíst data.

Čidla se dají nastavit více způsoby. Pro detailní zmapování lisovacího cyklu se u senzoru ContiLog vybralo ukládání dat po jedné sekundě, díky tomu se sníží celkový možný lisovací čas na několik minut, což nám k danému účelu postačí.

Čidla EasyLog budou nastaveny stejným způsobem. Důležité je zmapovat teploty po ukončení chladícího procesu.

Po skončení lisování budou načtena všechna data vyhodnocena do tabulek a grafů. Na základě výsledků bude vytvořeno doporučení jak zefektivnit výrobní proces.

### 4.3 Experimentální měření

Měření bylo provedeno 9. 4. 2014 ve výrobní hale MDF desek společnosti DDL.

#### 4.3.1 Příprava

Před samotným měřením je nutná důkladná příprava. Jelikož čidla fungují pouze omezený čas, není zde prostor na prodlevy. Každé čidlo je opatřeno spouštěcím obvodem. Po zapnutí čidla se provede spárování s měřícím softwarem instalovaným v tabletu. Čidla s tabletem komunikují pomocí bezdrátových bluetooth a wifi technologií.



Obrázek 4-5: Příprava měřících sad EasyLog a ContiLog.

#### 4.3.2 Průběh měření

Jakmile byla připravena deska určená pro měření. Pracovníci DDL zastavili výrobní linku a vložili čidla, dle předem určených podmínek. Na Obrázek 4-6 můžeme vidět zaměstnance vkládající čidla před lisovacím cyklem. Obrázek 4-7 poté detailněji zobrazuje vláknitý koberec a vložení čidel do jeho středu.





**Obrázek 4-6: Zaměstnanci DLL při vkládání čidla do středu dřevovláknitého koberce.**



**Obrázek 4-7: Ukázka vložení čidel do středu vláknitého koberce.**

Po vložení čidel byla deska označena a znovu se mohla spustit výrobní linka. Deska byla slisována v etážovém lisu a pokračovala dále do hvězdicového chladiče, kde byl důležitý sledovat pokles teplot. Po skončení chladicího procesu byla označená deska vyjmuta z balíku a z čidel se načetla získaná data.



Obrázek 4-8 znázorňuje čidlo ContiLog po ukončeném měření. Deska byla rozříznuta v polovině své tloušťky a čidlo vyjmuto.



**Obrázek 4-8: Vyjmutí čidla z desky.**

### **4.3.3 Závěr měření**

Na každé měření se musí použít nové čidlo, které je kalibrováno přímo od výrobce. Díky tomu je měření poměrně nákladné a musí probíhat přesně dle pokynů v manuálu. Jelikož se každé čidlo použije jen jednou, lze téměř na 100% říci, že výsledky budou přesné a nemůže dojít k žádnému zkreslení dat případnou špatnou kalibrací, nebo opakovaným používáním.

## 5. Vyhodnocení zjištěných výsledků experimentálního měření

Jedním z hlavních účelů diplomové práce bylo využití výsledků výzkumu přímo v praxi. Výrobní společností byly poskytnuty interní informace a postupy, zahrnující především přesné parametry lisovacího procesu. Následně pak bylo provedeno zkušební měření, analýzy a vyhodnocení zlepšující lisovací proces a tím i kvalitu vyráběných vláknitých desek. Zveřejnění veškerých poskytnutých informací a zjištěných závěrů by mohlo výrobní společnost poškodit na trhu nebo poskytnout konkurenční výhodu ostatním výrobcům. Proto jsou všechny výsledky umístěné do přílohy 2, 3 a 4, která je neveřejná.

Ze získaných výsledků byla nejprve vyhodnocena data z čidla ContiLog, ve druhé části se potom budeme zabírat vyhodnocením výsledků z čidla EasyLog.

### 5.1 Čidlo ContiLog

Měření probíhalo 16 minut a pro podrobné zmapování lisovacího procesu se ukládání dat nastavilo po jedné sekundě. Jak již bylo zmíněno výše, čidlo ContiLog dokáže měřit teplotu, vlhkost a parciální tlak páry v lisované desce. Všechna data a vyhodnocení naměřená čidlem jsou uvedena v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

### 5.2 Čidlo Easylog

Jako druhé bylo vyhodnoceno čidlo EasyLog. Data změřená tímto typem čidla byla očekávána o něco více než ze senzorů ContiLog, protože ta již společností DDL byla v minulosti používána. EasyLog byl společností použit premiérově a hlavním cílem bylo zjistit, jak se chová teplota středu desky, ve hvězdicovém chladiči. Na základě získaných výsledků upravit chladicí proces. Doposud bylo poměrně obtížné zjistit jaký chladicí čas navrhnout, protože se dalo řídit pouze teplotou na povrchu desek. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, na snížení teploty ve středu desky je třeba delší chladicí čas.

Měření probíhalo 35 minut a stejně jako v předchozím případě se data ukládala po jedné sekundě. Byla zjištěna teplota středu desky v lisovacím a chladícím cyklu.

Všechna změřená data včetně vyhodnocení jsou uvedena v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

## 6. Závěr

V úvodní kapitole této diplomové práce je sepsán stručný historický vývoj MDF desek ve světě a v Evropě. Dále je uvedena definice dřevovláknitých desek dle platných ČSN EN norem.

Druhá kapitola se zabývá popisem výrobního procesu dřevovláknitých desek. Jelikož je na trhu je k dostání veliký sortiment tohoto materiálu a tím pádem je více výrobních procesů, byla snaha popsat proces výroby konkrétně dřevovláknitých desek se střední hustotou (MDF). Tyto desky se v dnešní době vyrábějí tzv. suchým způsobem. Tento výrobní proces je tedy v této kapitole stručně popsán.

Třetí kapitola je zaměřená na lisovací proces MDF desek. V první části jsou popsány nejdůležitější veličiny sledované při lisovacím cyklu, druhá část rozebírá návrh lisovacího procesu, popis a rozdělení lisovacích modelů. Poslední část této kapitoly je zaměřena na porovnání lisovacích modelů s experimentálním měřením ve výrobním procesu a ověřením jejich přesnosti.

Čtvrtá kapitola popisuje měřicí systém společnosti Grecon, který byl použit k popsání lisovacího procesu. Dále je rozebrána metodika, jakou bylo měření prováděno a nakonec popsán samotný měřicí den ve společnosti DDL.

Pátá kapitola shrnuje všechny měřené veličiny a použitá měřicí zařízení, která byla k vytvoření této diplomové práce použita.

Z naměřených dat byly vytvořeny grafy, ve kterých se porovnaly reálné hodnoty lisovacích parametrů s hodnotami naměřených softwarem etážového lisu. Díky tomu se zmapoval lisovací a chladicí proces ve střední vrstvě MDF desky. Bylo také sepsáno několik doporučení, jak výrobní proces zefektivnit. Vše je uvedeno v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Všechna měření a výsledky této práce byly předány vývojovému oddělení společnosti DDL a budou sloužit ke zlepšení výrobního procesu. Do budoucna je počítáno s dalším navazujícím výzkumem, který má za cíl zhodnotit vliv nastavených lisovacích parametrů na mechanické a fyzikální vlastnosti MDF desek.

Důvodem proč byl tento výzkum proveden a do budoucna se počítá s jeho rozšířením je zefektivnění výrobního procesu, případné snížení energií při výrobě a zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností MDF desek vyráběných společností DDL.

## 7. Seznam použité literatury

### 7.1 Použitá literatura

**BOLTON, A.J., HUMPHREY, P.E.:** *The Hot Pressing of Dry-formed Wood-based Composites, Part I. A Review of the Literature, Identifying the Primary Physical Processes and the Nature of their Interaction.* Holzforschung, 42, 1988, č.6, s. 403-406.

**BOWEN, M.E.:** *Heat transfer in particleboard during dressing.* Disertační práce. Colorado State University, 1970.

**CALVALHO, L.H., COSTA, C.:** *Modelling and simulation of the hot pressing process in the production of the medium density fibreboards (MDF).* Chem. Eng. Comm., 1998, 1-21.

**CARVALHO L.M., COSTA C.:** *Modeling and simulation of the hot-pressing in the production of medium density fibreboard (MDF).* Chem Eng Comm., 1998.

**CAVALHO L.M., COSTA, C.:** *Modeling rheology in the hot-pressing of MDF: comparison of mechanical models.* Wood Fiber Sci, 2001.

**DAI, C., STEINER, P.R.:** *Compression behaviour of randomly formed wood flake mats.* Wood fiber Sci, 1993.

**DENISOV, O.B., SOSNIN M.S.:** *Besonderheiten der Veränderung von Temperatur und Dampfdruck in grobformatigen Holzspanplatten während der pressung.* 1967.

**DEPPE, H.J., ERNST, K.:** *MDF – Mitteldichte Faserplatten.* DRW- Verlag Weinbrenner GmbH. Co, Leinfelden-Echterdingen, 1996, 200 s.

**EISNER, M.:** *Technológia výroby konstrukčných veľkoplošných materiálov, časť II.* Technológia aglomerovaných materiálov, VŠLD, 1982, 223 s.

**FISCHER, J.:** *Siegeszug angetreten.* Aus den Kindertagen der Holwerkstoffe. HK Holz und Kunststoffverarbeitung, 35, 2000, č. 4, s. 62-64.

**GEFAHRT, J.,** *Zur Spanevorwärmung mit Hochfrequenzenergie – Modell zur Berechnung des Temperaturverlaufes in Vlimitte bei der Heißpressung.* 1977



- GUPTA, A.:** *Modeling and optimisation of MDF hot dressing*. Athesis submitted in partial fulfillment of Doctor of Philosophy in Chemical and Process Engineering, University of Canterbury, 2007.
- HASELEIN C.R.:** *Numerical simulation of dressing wood-fibre composites*. Disertační práce, Oregon State university, 1998.
- HUMPHREY, P.E., A.J. BOLTON.:** *The hot dressing of dry-formed wood based composites*. Part II. A simulation model for heat and moisture transfer. *Holzforschung*, 1989a.
- HUMPHREY, P.E.:** *Pressing issues in panel panel manufacture*. Proc. Of the 25. Particleboard and Composite Materials Symp., 1995, 25-108.
- KAMKE, F.A., WOLCOTT, M.P.:** *Fundamentals of flakeboard manufacture: wood-moisture relationship*. *Wood Sci Technol*, 1991.
- KOLEKTIV:** *Taschenbuch der Holztechnologie*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1975
- KOLLMANN, KUENZI, STAMM:** *Principles of Wood Science and Technology II*. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 1975, ISBN 3-540-06467-2
- LAMPERT, H.:** *Faserplatten*. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 1967, 456 s.
- MIKULČÁK, J.:** *Matematické, fyzikální a chemické tabulky a vzorce pro střední školy*. Prometheus, 2003
- SIEMPELKAMP:** *Die Geschichte der Holzwerkstoffen*. Firmenliteratur, 1999, 25 s.
- SOINÉ, H.:** *Holzwerkstoffe, Platten, Beschichtungsstoffe, Formteile, Türen Möbel*. DRW- Verlag Weinbrenner GmbH, Leinfelden- Echterdingen, 1995, 368 s.
- STRICKLER, M.D.:** *Effect of press cycles and moisture content on properties of Douglas-fir flakeboards*. *Forest Prod. J.*, 1959, 203-215.
- SUO S., BOWYER, J.L.:** *Simulation modeling of particleboard density profile*. *Wood Fiber Sci*, 1994
- ŠTEFKA, V., MÝTNÝ, F.:** *Lisovacia technika a lisy pre aglomerované materiály*. Technická univerzita vo Zvolene. 2001. 59 s. ISBN 80-228-1029-0

**ŠTEFKA, V.:** *Kompozitné drevné materiály, časť II.* Technická univerzita vo Zvolene. 2002. 205 s. ISBN 80-228-1136-X

**VACH, T.:** *Návrh a výpočet sušícího zařízení pro dřezpracující průmysl.* Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, 2008

**VON HASS, G.:** *Untersuchngen zur Heibpressung von Holzwerkstoffmatten unter besonderer Berücksichtigung des Verdichtungsverhaltens der permeabilitat, der Temperaturleitfähigkeit und der Sorptionsgeschwindigkeit.* Dissertation, Univ, Hamburg, Germany, 1998.

## 7.2 Normy

1. ČSN EN 316, Dřevovláknité desky – Definice, klasifikace značky, 2003
2. ČSN EN 622-1, Vlákennité desky – Požadavky – Část 1: Všeobecné požadavky, 2009

## 7.3 Elektronické prameny

**CARVALHO, COSTA:** *A global model for the hot-pressing of MDF.* [cit. 25. ledna 2014] Wood Sci Technol, [[online](#)] 2003. Dostupný z:  
<<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00226-003-0170-z>>

**GUPTA, U., JORDAN, P., PANG, S.:** *Development of An Empirical Model for MDF Hot Press and Comparison with A Fundamental Model.* [cit. 22. ledna 2014] Wood Technology Reserch Centre, Department of Chemical & Process Engeneering [[online](#)]. University of Caterbury, 2006. Dostupný z:  
<[http://www.researchgate.net/profile/Arun\\_Gupta8/publication/29487088\\_Development\\_of\\_An\\_Empirical\\_Model\\_for\\_MDF\\_Hot\\_Press\\_and\\_Comparison\\_with\\_A\\_Fundamental\\_Model/file/50463525e5245776f4.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Arun_Gupta8/publication/29487088_Development_of_An_Empirical_Model_for_MDF_Hot_Press_and_Comparison_with_A_Fundamental_Model/file/50463525e5245776f4.pdf)>

**GRECON:** Firemní literatura společnosti GreCon, manuál k použití čidel ContiLog, EasyLog. [[online](#)] 2014. [cit. 25. ledna 2014] Dostupný z:  
<<http://www.grecon.com/en/products>>

## Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Schéma dvojrotorového rozvlákňovače „Bauer“ .....	12
Obrázek 2-2: Schéma rozvlákňovacího zařízení typu Defibrator-Rafinér na výrobu vlákna.....	14
Obrázek 2-3: Schéma vystřelovacího děla podle Masona .....	16
Obrázek 2-4: Profil teploty A (lisovací teplota 200 °C) a profil vlhkosti B .....	18
Obrázek 3-1: Schéma vzájemné interakce dějů, lisovacího času, spotřeby energie a vlastností výrobku v lisovacím procesu (Bolton, Humphrey, 1988). .....	20
Obrázek 3-2: Grafy lisovacího modelu vytvořeného Carvalhem a Costou.....	31
Obrázek 3-3: Grafy lisovacího modelu vytvořeného Carvalhem a Costou.....	32
Obrázek 4-1: Měřicí sada GreCon.....	40
Obrázek 4-2: Záznamové čidlo ContiLog (GreCon, 2014) .....	41
Obrázek 4-3: Záznamové čidlo EasyLog (GreCon, 2014). .....	42
Obrázek 4-4: Ukázka měřicího systému GreCon (GreCon, 2014). .....	43
Obrázek 4-5: Příprava měřících sad EasyLog a ContiLog.....	44
Obrázek 4-6: Zaměstnanci DLL při vkládání čidla do středu dřevovláknitého koberce. ....	45
Obrázek 4-7: Ukázka vložení čidel do středu vláknitého koberce.....	45
Obrázek 4-8: Vyjmutí čidla z desky.....	46

## Seznam tabulek

Tabulka 3-1: Vstupní parametry pro simulaci dle Gupty (Gupta, 2006).....	26
Tabulka 3-2: Tabulka pro simulaci lisovacího modelu dle Carvalha a Costy (Carvalho, Costa, 2003).....	29
Tabulka 4-1: Parametry čidel ContiLog (GreCon, 2014).....	41
Tabulka 4-2: Parametry čidel EasyLog (GreCon, 2014).....	42

Tabulka P1-1: Všeobecné požadavky na různé typy desek (ČSN EN 622 - 1, 2003).  
..... **Chyba! Záložka není definována.**

Tabulka P1-2: Tolerance jmenovité tloušťky vláknitých desek při dodávání (ČSN EN 622 - 1, 2003).  
..... **Chyba! Záložka není definována.**

## Seznam grafů

Graf 2-1: Závislost spotřeby elektrické energie při rozvláknění na teplotě předehřívání štěpek (Lampert, 1967). .....	13
Graf 3-1: Ukázka simulace vývoje hustotního profilu dřevovláknité desky (Gupta, 2006). .....	27
Graf 3-2: 3D model závislosti napětí a lisovacího času v průřezu MDF desky (Gupta, 2006). .....	28
Graf 3-3: 3D model závislosti lisovacího času na obsahu vlhkosti v průřezu desky (Gupta, 2006). .....	28
Graf 3-4: 3D model závislosti lisovacího času na rozložení teploty v profilu desky. (Gupta, 2006). .....	29
Graf 3-5: Porovnání hustotního profilu u fundamentálního modelu a experimentálního měření (Gupta, 2006). .....	33
Graf 3-7: Poměr mezi hustotou jádra a střední hustotou u jednotlivých modelů (Gupta, 2006). .....	34
Graf 3-6: Poměr mezi povrchovou hustotou a střední hustotou u jednotlivých modelů (Gupta, 2006). .....	34
Graf 3-8: Srovnání průběhu teplot ve středu desky závislých na lisovacím času (Gupta, 2006). .....	35
Graf 3-10: Porovnání vývoje teplot ve středu desky mezi simulovaným modelem a reálnými daty (simulovány byly dvě rozdílné tepelné vodivosti desky) (Carvalho, Costa, 2003). .....	36
Graf 3-9: Srovnání simulované předpokládané tloušťky a reálné zjištěné experimentální metodou (Carvalho, Costa, 2003). .....	36

Graf 3-11: Porovnání modelovaného lisovacího tlaku s reálným tlakem naměřeným při výrobě (simulovány byly dvě rozdílné teplotní vodivosti desky) (Carvalho, Costa, 2003).....	37
Graf 3-12: Porovnání modelového profilu hustoty s experimentálně změřeným. (0 je střed desky, 12 je povrch desky) (Carvalho, Costa, 2003).....	38