

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra základního zpracování dřeva



Vliv řezání laserovým paprskem na změnu kontaktního úhlu řezaných ploch v porovnání s řezáním pilovým kotoučem

Bakalářská práce

Studijní program: PDNP
Pracoviště (katedra/ústav): Fakulta lesnická a dřevařská
Autor: Dominika Berežná
Vedoucí práce: Ing. Miroslav Sedlecký, Ph. D.

Zadání závěrečné práce

Cílem práce je zkoumání změny kontaktního úhlu řezaných ploch dubového řeziva při řezání laserovým paprskem v porovnání s pilovým kotoučem. Změna kontaktního úhlu bude vyhodnocována při proměnné počáteční vlhkosti.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Vliv řezání laserovým paprskem na změnu kontaktního úhlu řezaných ploch v porovnání s řezáním pilovým kotoučem“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Miroslava Sedleckého a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědoma, že zveřejněním bakalářské 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

.....

Dominika Berežná

Poděkování

Ráda bych poděkovala zejména vedoucímu práce, Ing. Miroslavovi Sedleckému, Ph.D. a doc. Ing. Milanovi Gaffovi, Ph.D. za odbornou pomoc a věnovaný čas potřebný k řešení dané problematiky. Dále mé poděkování patří také všem autorům knižních i internetových publikací, kteří poskytli potřebné informace.

Abstrakt

Technologie řezání pilovým kotoučem je v průmyslu zpracování dřeva dnes již zažitým standardem. Vzhledem k relativně rychlému pokroku dnešní doby a vývoji veškeré techniky, ani dřevozpracující průmysl nezůstává pozadu. To dokazuje i vývoj řezání laserovým paprskem nejen do kovových nebo plastových materiálů. Své využití laser našel právě i v odvětví zpracování dřeva. Nejen kvůli skvělým výsledkům v ohledu výtěžnosti a rozmanitosti tohoto stroje je již od 60. let stále středem pozornosti při vývoji řezných strojů. Protože však laserový paprsek může mít za následek změnu povrchových vlastností dřeva, byl vytvořen následující výzkum. Cílem výzkumu, a tedy i mé práce, je zkoumání změny kontaktního úhlu řezaných ploch dubového řeziva při řezání laserovým paprskem v porovnání s řezáním pomocí pilového kotouče. Změna kontaktního úhlu bude vyhodnocována při zadané počáteční vlhkosti řeziva. Protože se při běžném obrábění dřeva pilovým kotoučem používá materiál s danou vlhkostí cca 8 %, byl i pro tento výzkum použit materiál pouze s touto vlhkostí. U řezání pomocí laserového paprsku byl v rámci výzkumu využit materiál i s vyšší vlhkostí 30 %.

Práce je strukturována do dvou částí. Teoretická část je zaměřena na standardní technologii řezání pilovým kotoučem a laserovou technologii. V praktické části jsou zpracovány samotné výsledky měření kontaktního úhlu pomocí goniometru za předpokladu dvou různých vlhkostí u použití laserové technologie, zaokrouhleno na 8 % a 30 %. U řezu pilovým kotoučem byla použita vlhkost dřeva jen 8 %. Z výsledných tabulkových hodnot, případně i z přiloženého grafu, lze vyčíst stav povrchu dubového řeziva, respektive změnu jeho vlastnosti smáčivosti povrchu tekutinou při změřené hustotě zkoumaného dubového řeziva 690 kg/m^3 . Vlivem řezání laserového paprsku má dřevěný materiál tendenci stahovat póry, z tohoto důvodu není smáčivost povrchu tak vysoká. Podle hodnot je tedy zřejmé, že kontaktní úhel řezaného materiálu laserovým paprskem bude o dost vyšší, než při řezání pilovým kotoučem. V průměru se zde bavíme o hodnotách $94 - 102^\circ$ při řezu laserem oproti kontaktnímu úhlu při řezu pilovým kotoučem, který se pohybuje kolem 58° .

Klíčová slova

Kontaktní úhel, laserový paprsek, vlhkost řeziva

Abstract

Saw blade cutting technology is a standard in the woodworking industry today. Due to the relatively rapid progress of today and the development of all technology, the woodworking industry is not far behind. This is also proven by the development of laser beam cutting not only in metal or plastic materials. The laser has also found its use in the wood processing industry. Not only because of its excellent results in terms of yield and versatility, this machine has been the focus of attention in the development of cutting machines since the 1960s. However, because the laser beam can result in a change in the surface properties of the wood, the following research has been made. The aim of this research, and therefore also my work, is to investigate the change in the contact angle of the cut surfaces of oak lumber during laser beam cutting in comparison with saw blade cutting. The change in contact angle will be evaluated at the specified initial lumber moisture. Because material with a given moisture content of approx. 8 % is used in conventional woodworking with a saw blade, material with this moisture content was also used for this research. For laser beam cutting, the research used material with a higher humidity of 30 %

The work is structured into two parts. The theoretical part is focused on standard saw blade cutting technology and laser technology. In the practical part, the results of measuring the contact angle using a goniometer are processed, assuming two different humidities using laser technology, rounded to 8 % and 30 %. For the mentioned reason, only 8 % of the wood was used for the saw blade cut. From the resulting table values, or from the attached graph, it is possible to read the state of the oak lumber surface, or the change of its surface wettability property by liquid at the measured density of the examined oak lumber 690 kg / m³. Due to the cutting of the laser beam, the wood material tends to shrink the pores, for this reason the wettability of the surface is not so high. From the values, it is therefore clear that the contact angle of the material cut by the laser beam will be much higher than when cutting with a saw blade. On average, we are talking about values of 94 - 102 ° when cutting with a laser compared to the contact angle when cutting with a saw blade, which is around 58°.

Key words

Contact angle, laser beam, moisture of lumber

Obsah

Seznam ilustrací	8
Seznam tabulek	9
Slovník termínů.....	10
1. Úvod.....	11
2. Rozbor problematiky.....	12
2.1. Řezný materiál	12
2.1.1. Dub letní.....	13
2.1.2. Vlastnosti dubového dřeva.....	13
2.2. Vlhkost dřeva	14
2.2.1. Metody měření vlhkosti dřeva	15
2.3. Obrobitelnost dřeva.....	16
2.3.1. Obrábění dřeva.....	16
2.3.2. Obrábění dřeva kotoučovou pilou.....	17
2.3.3. Řezná rychlost stroje.....	18
2.4. Nekonenční metody obrábění dřeva.....	18
2.4.1. Princip a historie laseru	19
2.4.2. Typy laserů a jejich použití.....	21
2.4.3. Základní vlastnosti laseru.....	22
2.4.4. Základní součásti laseru	23
2.4.5. Řezání laserem	23
2.5. Sušení dřeva	24
2.6. Povrchová kvalita dřeva.....	25
2.6.1. Povrchové vlastnosti dřeva	26
2.6.2. Cévy – póry dřeva	27
2.7. Kontaktní úhel.....	28
2.7.1. Měření kontaktního úhlu.....	28
3. Metodika	30
3.1. Příprava vzorků pro měření kontaktního úhlu.....	30
3.2. Měření	31
3.2.1. Přístroj pro měření kontaktního úhlu	31
3.2.2. Software pro práci s kontaktním úhlem	32
3.3. Postup při měření kontaktního úhlu	32
3.4. Výsledky měření	39
4. Diskuze.....	40
5. Závěr	41
7. Seznam použité literatury.....	42

Seznam ilustrací

Obrázek č. 1 - Schéma kotoučové pily (Slideserver.com).....	18
Obrázek č. 2 - Schéma laseru (Slideplayer.cz)	21
Obrázek č. 3 - Monochromatický paprsek (Berežná, 2019)	22
Obrázek č. 4 – princip přirozeného sušení dřeva (www.agrojournal.cz).....	25
Obrázek č. 5 – průběh měření kontaktního úhlu (Berežná, 2019)	29
Obrázek č. 6 – Přímé metody měření kontaktního úhlu na naklánějící se destičce (VŠCHT.cz)	29
Obrázek č. 7 – Přímé metody měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce (VŠCHT.cz)	29
Obrázek č. 8 – Goniometr od firmy KRÜSS (Kruss.com)	31
Obrázek č. 9 – Advance software (advancesoftware.com)	32
Obrázek č. 10 – princip měření kontaktního úhlu (Berežná, 2019).....	34
Obrázek č. 11 – Proces měření kontaktního úhlu (Berežná, 2019).....	34
Obrázek č. 12 – Graf zobrazující stav kontaktního úhlu (Berežná, 2019).....	39

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 – měření kontaktního úhlu při 8% vlhkosti před – řez laserem	35
Tabulka č. 2 - měření kontaktního úhlu při 30% vlhkosti.....	36
Tabulka č. 3 – měření kontaktního úhlu při řezáním pilovým kotoučem a vlhkosti 8	38
Tabulka č. 4 – měření kontaktního úhlu při řezáním pilovým kotoučem a vlhkosti 8%	40

Slovník termínů

Biomasa - souhrn látek tvořící těla všech organismů, rostlin, bakterií, sinic, hub, nebo živočichů

Amplifikace - jedná se o druh hyperboly spočívající v rozšíření výpovědi tím, že se daná věc opakuje užitím souznačných slov z několika perspektiv

Plotter - souřadnicový zapisovač, pomocí tužky nebo pera kreslí obraz

Software - pojem v informatice znamenající soustavu počítačových programů, provádějící souvislou činnost, pro naše účely byly použity aplikační softwary

Amplifikace – zvětšení, zesílení, rozšíření

Emise – látky vypouštěné různými zdroji do atmosféry

Koherence – soudržnost

Foton – částice, která zprostředkuje elektromagnetickou interakci

Interakce – vzájemná spolupráce

Klimatizační komora – komora ke klimatizování vzorků s možnou regulací vlhkosti a teploty

Gravírování – technologie nahrazující ruční rytí

1. Úvod

Technologie řezání laserovým paprskem je populární již řadu let, dodnes je toto téma ale ve výzkumné pozici. Laserová technologie je úspěšná například z důvodu výtěžnosti materiálu, kde je zvyšována přesnost opracování dřeva a snižováno množství odpadu. Jsou zde ale i jiné důvody, například kvalita opracování povrchu. Pokud jde ale o některé vlastnosti povrchu dřevěného materiálu, který byl opracován laserovou technologií, jsou zde i jisté nedostatky. A právě to je důvod, proč vznikl výzkum zabývající se porovnáním technologií opracování dřeva. Konkrétně srovnání technologie řezání kotoučovou pilou a laserovým paprskem. Požadovaným výsledkem této práce je určení vlivu na kontaktní úhel řezáním zmíněnými technologiemi.

V teoretické části se nacházejí základní informace pro seznámení se s jednotlivými tématy. Například náhled na vlastnosti konkrétní zpracovávané dřeviny (dub lesní „*Quercus robur*“), seznámení se s pilovým kotoučem a jeho vlivem na zpracovávaný materiál, úvod do problematiky řezání laserovou technologií a prostředky, které byly využity k měření v praktické části práce.

Praktická část se zabývá už samotným výzkumem, tedy rozdílem mezi jednotlivými hodnotami řezaného materiálů pomocí dvou různých technologií, a to sice laserem či pilovým kotoučem.

Z pohledu účelnosti této práce je spoléháno na výsledky, které mohou pomoci s výběrem rezných technologií při požadovaném zpracování daného konkrétního materiálu.

2. Rozbor problematiky

2.1.Řezný materiál

Pro výzkum bylo jako řezný materiál zvoleno dřevo. Jedná se o pevnou stavbu pletiva stonků vyšších rostlin, které dále označujeme jako dřeviny. Je to obnovitelný zdroj energie, jako jeden z druhů biomasy. Velice oblíbený a využívaný materiál po celou dobu dřevozpracujícího průmyslu. Pro dřevo existuje samotná nauka o dřevinách, tzv. dendrologie. Je to část systematické botaniky, která se zabývá genetikou, morfologií (rozlišovacími znaky dřeva) a ekologií dřevin. Dřevo jako takové je zařazováno do dvou základních skupin - listnaté a jehličnaté. Tato skutečnost je znatelná nejen prvním pohledem na rostoucí strom, při kterém je možné určit, zda dřevina oplývá jehličím nebo listím. V dřevařském průmyslu se do pilnic dováží již vytěžená kulatina u které je nutné určit, zda se jedná o skupinu jehličnatých nebo listnatých dřevin. K tomuto účelu slouží právě dendrologie, díky které dokážeme makroskopickými a mikroskopickými znaky dřevinu spolehlivě určit. K primárním makroskopickými znaky, tedy ke znakům viditelným na první pohled je řazena např. kůra, nebo letokruhy, které nejčastěji prozradí o jakou dřevinu se jedná. Mikroskopické znaky jsou pozorovatelné při 150 – 200 násobném zvětšení pomocí mikroskopických materiálů a to na řezech s tloušťkou 15 – 30 mm. Do těchto znaků řadíme např. cévy, které nejsou vidět pouhým okem, cévice, libriformní vlákna, nebo parenchymatické buňky. Tato práce je zaměřena na dřevo listnaté, konkrétně dub letní. (Křupalová, 2003)

2.1.1. Dub letní

Dub letní, latinsky „*Quercus robur*“, se vyskytuje v Evropě, Malé Asii a ve vybraných lokalitách severní Afriky. Daří se mu na vlhkých hlinitých půdách, jeho kořeny jsou velmi hluboké a mohou tvořit spojení se spodní vodou, což je příčinou zvýšené pravděpodobnosti zasažením bleskem.

Roste do výšky 40 až 60 metrů, má mohutný kmen a velmi silné větve, které tvoří mohutnou a nepravidelně rozloženou korunu protáhlou směrem vzhůru. Jeho květy lze pozorovat během dubna až května. Kůra je zpočátku hladká, zelenavě až světle šedá. (Křupalová, 2003)

Její pozdější podoba šedohnědé až černé barvy s tlustou a tvrdou strukturou se tvoří 15 až 30 let. Nakonec z ní vznikne kostkovitě rozpraskaná borka s podélnými i příčnými hlubokými trhlinami. Co se týče mikroskopických znaků, dub poznáme podle zřetelných letokruhů, běl má úzkou se světle hnědou barvou, zatímco jádro je žlutohnědé až temně hnědé. (Křupalová, 2003)

Dub se vyznačuje např. svou trvanlivostí, tvrdostí, těžkostí. Označuje se za dřevo jádrové, protože má velmi úzkou běl. Při zkoumání makroskopických znaků jsou nápadně viditelné cévy, které tvoří velký průměr a jsou tedy patrné pouhým okem jako kruhové maličké otvory na příčném řezu. Na podélných řezech je můžeme vidět jako podélné rýhy, které obráběním nejde odstranit. Jarní přírůstky letokruhů jsou barevně odlišné od těch letních, jejich přechod je ale jen pozvolný, kresba na tangenciálním řezu je velmi výrazná. Využití nalezne dub ve stavebnictví i truhlářství. Často se z něho vyrábí schodiště, parkety nebo prahy. Hojně se využívá pro výrobu dých a sudů nebo v oblasti umělecké truhlářiny. (Požgaj et al., 1993)

2.1.2. Vlastnosti dubového dřeva

Vlastnosti tohoto materiálu jsou rozdělovány na vlastnosti mechanické a fyzikální. K vlastnostem fyzikálním patří vlhkost dřeva, jeho hustota, objem, bobtnání dřeva, tepelná vodivost a další. Mezi nejvýznamnější mechanické vlastnosti patří pevnost dřeva, deformovatelnost (tvrdost – pružnost) a jiné technologické vlastnosti dřeva, například ohybatelnost, štípatelnost nebo dokonce schopnost udržení spojovacích prostředků.

Hustotu dřeva charakterizuje zejména podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu uváděny v jednotkách kg/m^3 . Vzhledem k hygroskopicitě dřeva je poměrně složité určit hustotu dřeva ve srovnání s jinými materiály. Hmotnost, ale i objem dřeva, je výrazně ovlivněn vlhkostí dřeva. I přesto se ale jedná o nejvýznamnější charakteristiku, která má vliv na většinu mechanických a fyzikálních vlastností dřeva. (Siklienka a Kminiak, 2013).

Pro ovlivnění vlhkostí dřeva se používají následující vlhkostní stavy:

- Hustota dřeva v suchém (absolutně suchém) stavu ($w_{as} = 0 \%$)
- Hustota dřeva při vlhkosti 12 %
- Hustota vlhkého dřeva ($w > 0 \%$)

Hustota dubu se pohybuje v rozmezí $630 - 720 \text{ kg/m}^3$. (Požgaj et al., 1993)

2.2. Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva se vyjadřuje podílem hmotnosti vody ku hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu - vlhkost absolutní w_{abs} , nebo podílem hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva - vlhkost relativní w_{rel} . Vlhkost se nejčastěji vyjadřuje v procentech. (Kolb, J., 2011)

Z hlediska uložení vody ve dřevě je dělena na:

- **Vodu chemicky vázanou** - je součástí chemických sloučenin. Nelze ji ze dřeva odstranit sušením, ale pouze spálením, proto je ve dřevě zastoupena i při nulové absolutní vlhkosti dřeva. Zjišťuje se při chemických analýzách dřeva a její celkové množství představuje 1-2 % sušiny dřeva. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam
- **Vodu vázanou (hygroskopickou)** - nachází se v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxilové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulózy. Voda vázaná se ve dřevě vyskytuje při vlhkosti kolem 0-30 %. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má největší a zásadní význam

- **Vodu volnou (kapilární)** - vyplňuje ve dřevě lumeny buněk a mezibuněčné prostory. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností má podstatně menší význam než voda vázaná. (Kolb, J., 2011)

Největší vliv na vlhkost dřeva má jeho stavba, hustota dřeva, teplota okolí i dokonce mechanické namáhání dřeva. V rostoucím kmeni je možné se setkat s nerovnoměrně rozloženou vlhkostí. Ta se mění s výškou a průměrem kmene. U jehličnatých stromů se vyskytuje rozdíl mezi vlhkostí jádra a běli, kde jádro, tedy vyzrálé dřevo, má 3 - 4 krát menší vlhkost než běl. U listnatých dřevin se vlhkost rozkládá mnohem rovnoměrněji. (Požgaj et al., 1993)

2.2.1. Metody měření vlhkosti dřeva

Podle vlhkosti je v praxi dřevo děleno do následujících skupin:

- Dřevo absolutně suché ($w = 0 \%$)
- Vysušené dřevo na pokojovou teplotu ($w = 8 - 15 \%$)
- Vysušené dřevo na vzduchu ($w = 15 - 22 \%$)
- Dřevo čerstvě pokáceného stromu ($w = 50 - 100 \%$, některé dřeviny až 180%)
- Mokré dřevo nebo dřevo dlouhodobě uložené ve vodě ($w > 100\%$)

Pro zjištění vlhkosti dřeva existuje celá řada metod a způsobů. Ty jsou děleny na přímé (absolutní), kterými se zjišťuje skutečný obsah vody ve dřevě, nebo nepřímé (relativní), které určují obsah vody prostřednictvím měření jiné veličiny. Z nepřímých metod měření vlhkosti dřeva se nejčastěji používají elektro fyzikální veličiny. K nejefektivnějším, nejpraktičtějším a nejčastěji používaným metodám zjišťování množství vlhkosti ve dřevě patří bez pochyby vlhkoměr. V současné době jsou nejspolehlivějšími druhy vlhkoměrů elektrické fungující na principu měření elektrických veličin dřeva, které jsou výrazně ovlivňovány vlhkostí obsaženou ve dřevě. (Siklienka a Kminiak, 2013a)

2.3.Obrobitelnost dřeva

Obrobitelnost dřeva je definována jako náročností obrábění jednotlivých druhů dřeva strojově nebo ručně. Na náročnost řezání má vliv druh dřeviny, její vlhkost a směr řezu vůči podélné ose kmene. Řezání do suchého dříví tvrdých listnatých dřevin kolmo na vlákna je nejnáročnějším. Lépe obrobitelné je dřevo, které je polosuché a do kterého se řeže ve směru podél osy kmene stromu a jeho vláken. Následkem vyšší vlhkosti je dřevo hůře dělitelné na třísky a tvoří se otřepy. Při řezu směrem napříč vlákny klade dřevo větší odpor z důvodu větší tvrdosti. Takto lze také odhadnout čas a námahu na vykonání řezné práce. (Brlica, 2010)

2.3.1. Obrábění dřeva

Obráběním dřeva je rozuměno opracování dřeva, při kterém se mění rozměry a tvar. Tyto změny lze provádět chemicky nebo mechanicky. Při chemickém obrábění dřeva dochází k opracování bez porušení dřevních vláken (lisováním, ohýbáním). U mechanického opracování dochází naopak k fyzickému oddělování dřevních vláken (soustružením, dlabáním, škrábáním, vrtáním, frézováním, hoblováním, pilováním, broušením, řezáním). Na výsledný efekt má velký vliv i směr obrábění materiálu. Hlavními směry řezání jsou příčný, radiální a tangenciální.

- **Příčný** – jedná se o řez, který je veden v rovině kolmé k ose kmene
- **Radiální** – zvaný též jako středový nebo poloměrový, je veden v rovině rovnoběžné s osou kmene a prochází přímo středem kmene, tzv. dření
- **Tangenciální** – zvaný též jako tečnový nebo fládrový řez je vedený v rovnoběžné rovině s osou kmene, ale neprochází středem kmene (dření) (Siklienka, M., Kminiak, R., 2013)

2.3.2. Obrábění dřeva kotoučovou pilou

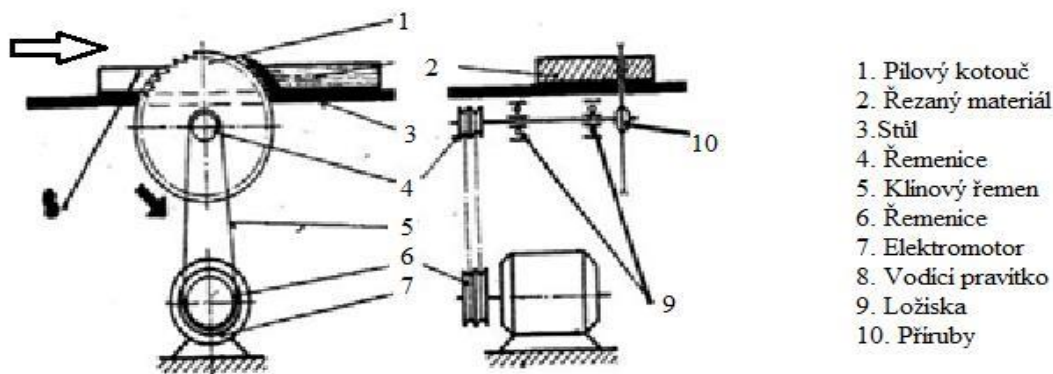
Kotoučová pila slouží k řezání dřeva, ale i jiného materiálu. V dřevařském průmyslu využívána při zpracování výřezů, řeziva, přířezů, při řezání aglomerovaných materiálů apod. Různé konstrukce kotoučových pil umožňují řezání ve všech směrech. Kotoučové pily bývají ruční, stolní nebo ve stojanovém provedení. Hlavním pracovním mechanismem je hřídel, na kterém je upnutý pilový kotouč. Pohon hřídele je zabezpečený pomocí řemenového převodu, který bývá poháněn elektromotorem. Materiál se do řezu nejčastěji posouvá ručně, může zde ale být podávací mechanismus materiálu, který je tvořen různou konstrukcí dopravníků (řetězový, pásový, válečkový, bubnový, vozíkový). (Bílek, O., Kovařík, M., 2019)

Nejčastější rozdělení kotoučových pil je podle jejich použití:

- **rozmítací**
- **omítací**
- **formátovací**
- **zkracovací**
- **ostatní (např. cylindrické, drážkovací)**

Při obrábění dřeva dochází k fyzikálním jevům, jako je například tření bočních ploch o materiál v řezné spáře, tření hřbetu zubů o obráběnou plochu, tření třísky o čelo obráběcího nástroje, odklonění třísky čelem nástroje. V neposlední řadě dochází k deformaci materiálu v místě styku nástroje a daného obrobku, která je úměrná velikosti úhlu řezu, stupni otupení břitu, pružností opracovaného materiálu a podobně. (Doc. Ing. Varkoček, Doc. Ing. Rousek, Ing. Holopírek, 2001)

Na přesnost obrábění má vliv několik faktorů, například přesnost jednotlivých částí stroje, jeho typ a druh. Opotřebení a tuhost nástroje, podávací zařízení, dopravníky, pracovní postup (posuvná rychlost), vlastnosti daného obrobku, upnutí nebo i rozměry obrobku. (Svoren, J., 2002)



Obrázek č. 1 - Schéma kotoučové pily (Slideserver.com)

2.3.3. Řezná rychlost stroje

Pod pojmem řezná rychlost se rozumí rychlost pohybu řezu, to znamená relativního pohybu mezi nástrojem a obrobkem. Řezný pohyb se rozkládá na dvě složky: hlavní pohyb a posuv. U některých způsobů obrábění (například soustružení, vrtání, frézování) probíhají oba pohyby současně, u jiných způsobů odděleně (například hoblování, obrážení). Ve všech případech je ale rychlost posuvu mnohem menší než rychlost hlavního pohybu, a proto je řezná rychlost často nesprávně označovaná, jako rychlost hlavního pohybu. (Ball, N. 1975)

2.4. Nekonvenční metody obrábění dřeva

Nekonvenční metody obrábění dřeva se charakterizují použitím stroje k úběru materiálu. V tomto případě totiž nedochází k úběru třísky pomocí standardního rezného stroje. K obrábění dochází za pomoci elektrických, chemických, abrazivních, ultrazvukových nebo fyzikálních principů, v některých případech i jejich kombinací. Lez konstatovat, že se jedná o bezsilové obrábění dřevěného materiálu. Původně vznikly nekonvenční metody obrábění jako alternativa k obrábění dřeva, v současnosti se staly jednou z vhodných alternativ obrábění dřeva. Mezi výhody patří obrobiteľnosť materiálu, jednoduchá tvarová komplexnosť dílců, snadná automatizace výroby,

vysoká přesnost a integrita povrchu a v neposlední řadě minimalizace dílců. Za nevýhody jsou považovány hlavně ekonomické ukazatele, jako je například vysoká pořizovací cena a provoz strojů při kusové nebo malosériové výrobě. (Badonia, P., 2017)

2.4.1. Princip a historie laseru

Laser je zkratka pro **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation. V překladu amplifikace světla stimulovanou emisí. Jedná se o optický zdroj elektromagnetického záření. Jinak řečeno zesílení světla pomocí vynucené (stimulované) emise záření. (Barnekov V., 1986)

Vzniklé záření je tedy buď monochromatické (tzn. má jednu, přesně definovanou vlnovou délku) nebo koherentní, což znamená, že příslušné částice (fotony) se ve svazku pohybují stejnoměrně a jsou v jeho průřezu buď stejnoměrné, nebo alespoň velmi pravidelně rozděleny.

Světlo je z laseru vyzařováno ve formě úzkého svazku, jehož princip využívá zákonů kvantové mechaniky a termodynamiky. Je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie. (Eltawahni et al., 2016)

Princip laseru již v historii fyzikálně popsal Albert Einstein v roce 1917, nýbrž vznik laseru je datován až od roku 1960. Předchůdcem laseru byl tzv. „MASER“, který pracuje na velmi podobném principu s rozdílem generování mikrovlnného záření. V roce 1960 předvedl funkční laser Theodore H. Maiman v USA. Tři roky poté byl vynalezen plynový CO₂ laser, což je v dnešní době pravděpodobně nejpoužívanější a nejsilnější laser s účinností okolo 20 %. Následovalo období sovětských fyziků Nikolaje Basova a Alexandra Prochorova, kteří pracovali nezávisle na problému kvantového oscilátoru a vyřešili tím problém nepřetržitého výstupu záření tím, že použili více než dvě energetické hladiny a umožnili tím ustanovení takzvané populační inverze. V roce 1964 Charles Townes, Nikolaj Bosov a Alexandr Prochorov obdrželi Nobelovu cenu za fyziku díky zásadnímu pokroku ve výzkumu v rámci oboru kvantové elektroniky, který dále vedl ke konstrukci oscilátorů a zesilovačů založených na principu maserů a laserů. (Yusoff N., et. Al., 2008)

Jedná se o nekonvenční metodu obrábění nejen dřeva. U této metody se nepoužívá standardní řezný nástroj, nýbrž k úběru materiálu dochází tepelnými, chemickými nebo abrazivními účinky, popřípadě jejich vzájemnou kombinací.

Používáme je v případech, kde je klasický způsob obrábění příliš obtížný nebo dokonce nemožný. Možné je obrábět materiály s vysokou pevností, tvrdostí a materiály, které jsou tvarově velmi složité. Jejich přednost spočívá v možnosti obrábění složitých tvarů, zavedení plné automatizace, zvýšení technologičnosti konstrukce, sériovosti výroby a snížení pracnosti výroby. Rychlost a výkonnost nezávisí na mechanických vlastnostech obráběného materiálu, ani nemusí být nástroj tvrdší nebo pevnější než obráběný díl. Tímto postupem současně dochází k cílené změně vlastností povrchové vrstvy obráběného materiálu a to odolnost proti korozi nebo jeho pevnosti. (Kannatey - Asibn E., a kol., 2009).

V průmyslové výrobě se laser začal používat od druhé poloviny 60. let. Vývoj laseru i jeho aplikace procházejí neustálou inovací. Sledují se jak nové technické možnosti, tak i příznivější ekonomie provozu. Základní předností laserových technologických operací je možnost opracování bez mechanického kontaktu s výrobkem, možnost opracování obtížně přístupných částí materiálu a technologické zpracování těžkoobrobitelných materiálů. (Eltawahni et al., 2016)

V technologii se laser používá pro svařování, vrtání, řezání, tepelné zpracování, značení a gravírování, povrchové úpravy, povlakování, metody tvorby modelů a prototypů a pro laserovou podporu konvenčního obrábění. Každá z těchto oblastí má svá specifika pokud jde o typ laseru, a způsoby jeho užití. Obrobitelnost materiálu laserem je dána schopností pohlcovat energii světelnou a měnit ji na kinetickou. (Gochev Z., 2016)

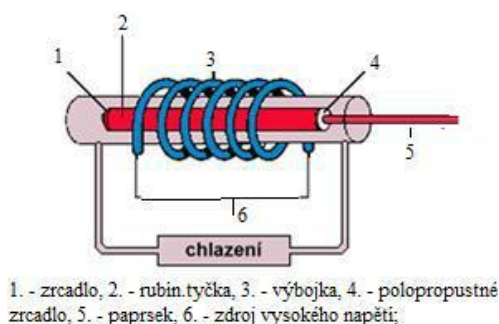
Laser má tři hlavní části. Jedná se o jeho aktivní prostředí, což je pevná, kapalná nebo plynná látka, v níž může docházet k inverzní populaci energetických stavů a tím k zesilování světla cestou stimulované emise. Dále pak optický rezonátor, čímž se rozumí dutina obklopená odrazovými plochami, v níž je pasivní dielektrické prostředí. Odrazy záření v rezonátoru se využívají k dosažení inverzní populace. Nejjednodušším příkladem optického rezonátoru je soustava dvou rovnoběžných rovinných zrcadel. (Eltawahni et al., 2016)

2.4.2. Typy laserů a jejich použití

Laser se používá v mnoha odvětvích, proto také existují různé druhy laserů na základě jejich využití. Podle jejich typu je rozpoznatelné, jaké je jejich hlavní aktivní prostředí. Tříděny mohou být také podle různých skutečností.

Například podle:

- **Aktivního prostředí (nejpoužívanější):** pevnolátkové, polovodičové, plynové, kapalně, plazmatické
- **Vlnových délek optického záření, které vysílají:** infračervené (760 nm – 1 mm), ultrafialové (400 – 200 nm), rentgenové (1 pm – 10 nm)
- **Typu kvantových přechodů (energetických hladin):** molekulární (rotační, rotačně – vibrační), elektronové, jaderné
- **Typu buzení:** optické, buzené elektrickým výbojem, buzené elektronovým svazkem, buzené tepelnými změnami, buzené chemicky, rekombinací nebo injekcí nosičů náboje
- **Časového režimu provozu laserů:** pulzní, kontinuální
- **Délky generovaného pulzu:** s dlouhými, s krátkými, s velmi krátkými pulzy (Riverio A., a kol., 2010)

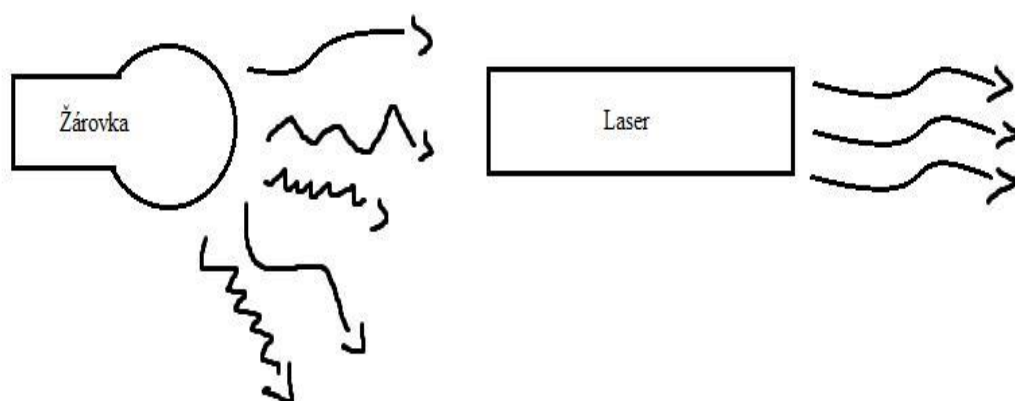


Obrázek č. 2 - Schéma laseru (Slideplayer.cz)

Použití laseru je z hlediska oboru velmi široké. Zejména je možné nalézt laser v průmyslu pro řezání nebo vrtání, a to z důvodu právě zmíněné koherence a monochromatickosti laseru, díky čemuž můžeme laserovým paprskem soustředit na malé ploše velké množství energie. Jeho použití je v dnešní době využitelné také v medicíně, zejména v dermatologii (akné, pigmentová znaménka, odstranění tetování apod.), v medicíně (stomatologie, chirurgie, gynekologie apod.) V armádě je používán pozemním vojskem, námořnictvem a letectvem pro zbraňové systémy s výkonem až 100kW k označování cíle, navádění raket a munice. Vzhledem k rychlému vývoji technologie je využíván laser i v našich domácnostech např. při tisku s využitím laserové tiskárny. (Barnekov, V.G., 1986)

2.4.3. Základní vlastnosti laseru

- **Monochromatický paprsek** – to znamená, že má paprsek jednu vlnovou délku



Obrázek č. 3 - Monochromatický paprsek (Berežná, 2019)

- **Minimální sbíhavost** – charakterizuje ji poloviční hodnota vrcholového úhlu kuželu laserového paprsku, který vstupuje z rovinného zrcadla laseru
- **Intenzita záření** – již od počátku 60. let má vývoj intenzity laserového záření neustále stoupající charakter (Badonia, P., 2017)

2.4.4. Základní součásti laseru

- **Aktivní prostředí** – látka, obsahující energetické hladiny elektronů jenž jsou oddělené. Aktivní prostředí můžeme rozdělit následovně:
- **Rezonátor** – zařízení umožňující zformátování a zesílení laserového záření pomocí zrcadel
- **Chladicí zařízení** – určeno ke chlazení zařízení a k ochraně probíhajícího procesu, nejvíce používaným chladicím médiem je voda
- **Budící zařízení** – slouží k ovlivnění pracovního režimu a aktivaci procesů, plynné médium se skoro pokaždé budí elektrickým výbojem
- **Zdroj** – zajišťuje energii (Badonia, P., 2017)

2.4.5. Řezání laserem

Úběr třísky pomocí laseru zajišťuje vysokou řeznou rychlost, přesnost řezu, čisté hrany a kolmost řezu. Šířka řezu dosahuje obecně kolem 0,1 – 1 mm. V místě dopadu laserový paprsek zahřeje materiál tak silně, že se roztaví nebo vypaří. Tomuto bodovému průniku se říká zápich a až poté nastává proces samotného řezání materiálu. Tímto způsobem lze vyrábět například hračky, dekorativní předměty, umělecké výrobky, suvenýry, vánoční ozdoby, architektonické modely apod. Pro řezání dřeva a dřevěných materiálu se nejčastěji používají lasery CO₂, které jsou uchyceny do plotterů, nebo tzv. systémů s rozmítací hlavou. V případě řezání pomocí plotterů se laser pohybuje přímo nad materiálem, do kterého vyřezává vzor podle zadané předlohy. (Badonia, P., 2017)

Pokud se jedná o systém s rozmítací hlavou, samotný laser se nehýbe, jeho svazek je speciální optikou přenášen k pracovnímu bodu. Řezání pomocí rozmítací hlavy bývá často mnohem rychlejší, neboť je méně limitováno setrvačností poměrně těžkého laseru, který se musí v plotterech nad materiálem pohybovat. (Riverio, A., a kol., 2010)

Laserem se dají řezat ve své podstatě všechny materiály. V případě dřevěného materiálu je možné řezat až už masivní dřevo, dřevěné deskové materiály či kompozitní materiály na bázi dřeva jako např. překližky, sololit, nebo MDF desky

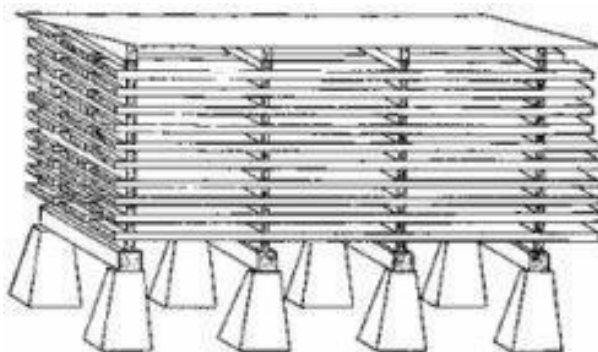
(medium density fibreboard). Mezi výhody řezání laserem patří možnost řezání extrémně jemných kontur a vysoká kvalita řezu. Tím, že průměr paprsku laseru se pohybuje kolem 0,1 mm, je možné řezat i tenké desky. Vzhledem k velmi nízké početnosti odpadu při řezání, není třeba časté čištění stroje a jeho opotřebení je téměř nulové. K nevýhodám je řazena možná deformace opracovávaného materiálu z důvodu vysokého tlaku nebo vlhkého prostředí. To se ovšem dá patričně ošetřit pomocí chemických těsnících materiálů. (Gochev, Z., 2016)

Řezání jako takové se dnes provádí na složitějších strojích zvaných CNC. CNC vzniklo z anglického Computer Numerical Control, v překladu počítačem řízený obráběcí stroj, neboli stroje, které jsou řízeny počítačem. Paprsek CNC laseru ohřívá a odpařuje dřevo, se kterým přijde do kontaktu. Nastavit lze i hloubku řezu pomocí intenzity světla paprsku. Odpad je ve většině případů v podobě kouře. Pokud kromě kouře vznikne i odpad v podobě pilin, štěpek, odřezků a dalších, je dále využit dle zpracování dřevního odpadu. Při gravírování lze například nastavit hloubku řezu na mělké, střední a hluboké, čímž se vytvoří buď gravírování, reliéfní řezba, nebo řezání vzorů či otvorů. (Radovanovic, M., 2011)

2.5. Sušení dřeva

Pro další zpracování dřeva je nutné jej nejprve vysušit. Proces sušení se provádí z důvodu vysokého obsahu vody v čerstvě pokáceném stromě. Proto probíhá proces sušení dřeva na takovou vlhkost, při které se daná dřevina dobře obrábí. Dalším důležitým faktorem je, aby vlhkost dřeva byla srovnatelná s vlhkostí prostředí, ve kterému se bude výrobek využívat. Sušení dřeva lze rozdělit na sušení přirozenou nebo umělou cestou. V případě přirozeného sušení dřeva dochází ke skladování řeziva nebo přířezů na volných prostranstvích. Skladování musí odpovídat jasným pravidlům a zásadám, aby nedošlo k poškození materiálu. Často se taková místa pro sušení nachází přímo na pilách, popřípadě může být i u zpracovatele. Řezivo se uskládňuje proložené na předem připraveném skladě.

Oba způsoby sušení mají stejné zásady, například závislost na teplotě, vlhkosti a rychlosti proudění vzduchu, druh dřeviny, rozměrech onoho materiálu, nebo na počáteční a konečné vlhkosti. U umělého sušení spočívá rozdíl a také výhoda v tom, že je možné si parametry sušícího prostředí měnit a řezivo tak vysušit na téměř libovolnou konečnou vlhkost. V našich klimatických podmínkách lze dřevo přirozeně vysušit maximálně na 13 – 15 %. Běžně se uvádí hodnoty okolo 20 %. Přirozené sušení se může uskutečnit téměř kdekoliv bez nároků na energii. Nevýhodou přirozeného sušení je tzv. umrtvení kapitálu po dobu sušení, proto se v dnešní době množství přirozeně sušeného řeziva kolem truhláren minimalizovalo. V praxi je hojně využívaná kombinace přirozeného předsušení a umělého dosušení na konečnou požadovanou vlhkost. (Mytting, L., 2015)



Obrázek č. 4 – princip přirozeného sušení dřeva (www.agrojournal.cz)

2.6. Povrchová kvalita dřeva

Ani za předpokladu nejpečlivěji obrobeného povrchu dílce nebude povrch nikdy dokonale hladký. Bude vykazovat vlnitost nebo určitou drsnost. Taková drsnost je znatelná makroskopickými i mikroskopickými rýhami, vyvýšeninami, nebo prohlubněmi. Někdy je možné se setkat i s vytrženými svazky dřevních vláken či vytrhanými suký. (Barcík, 2001)

Tato skutečnost ale tvoří velmi malou odchylku od ideálně rovné plochy oproti odchylkám rozměrů nebo tvaru dílce, kde nepřesnost rozměrů může způsobit značnou ztrátu suroviny. Na kvalitu povrchu působí kromě výše uvedených vlivů i následující faktory:

- **Vlhkost obrobku** - zde platí pravidlo čím vyšší vlhkost, tím horší kvalita povrchu. Nejhorší výsledky zde bývají zaznamenány při vlhkosti okolo 27 - 30 %
- **Tloušťka třísky** - na obrobený povrch má zásadní vliv větší tloušťka třísky
- **Řezná rychlost** - při nezměněných ostatních parametrech obrábění je vliv řezné rychlosti nepatrný
- **Posuvná rychlost** - při nižší posuvné rychlosti je zajištěn přesnější úběr třísky
- **Otupení ostří** - velmi důležitý parametr pro předejití vytrhávání vláken nebo pálení povrchu
- **Řezný úhel nástroje** - mohou vznikat záštěpy (Doc. Ing. Varkoček, Doc. Ing. Rousek, Ing. Holopírek, 2001)

2.6.1. Povrchové vlastnosti dřeva

Mezi povrchové vlastnosti dřeva, které lze vnímat smysly, jsou lesk, barva, vůně nebo textura a k ní spjatá smáčivost povrchu.

Lesk je povrchová vlastnost viditelná zejména na radiálním řezu, který je proveden v rovině procházející osou kmene a veden přes dřeň. Na radiálním řezu lze vidět tzv. zrcátka, což jsou dřeňové paprsky, které vytváří různě velké plošky a odrážejí dopadající světlo.

Barva je charakteristická pro každou dřevinu. Tato vlastnost je velmi proměnlivá a mění se vlivem vlhkosti, světla a vzduchu. Například dřeviny z tropického pásma (teak, eben) mají tmavší barvu než dřeviny, které rostou v mírném pásmu (topol, dub).

Vůně dřeva je způsobena látkami obsaženými ve dřevě, které jsou označovány jako extrakty. Tyto látky ovlivňují mimo jiné světlostálost, vysýchavost, vodoodpudivost nebo také hořlavost, zároveň mají ochrannou a zásobovací funkci. Extrakty jako pryskyřici, taniny a terpeny je možné vnímat čichem. Z tuzemských dřevin mají nejintenzivnější vůni jehličnany díky obsahu pryskyřice. Listnáče mají vůni méně výraznou zejména z důvodu obsahu tříslovin.

Textura je tvořena různou kombinací makroskopických znaků (letokruhy, jádro, běl, dřeň, dřeňové paprsky a skvrny, pryskyřičné kanálky, cévy – póry) na opracovaném povrchu dřeva. Některé dřeviny, např. dub, ořech nebo švestka mají výraznou texturu díky které je téměř na první pohled možné dřevinu určit. V této práci se blíže věnuji jednomu z makroskopických znaků, který je spjatý se smáčivostí povrchu dřeva, a to pórům. (Křupalová, 1997; Požgaj 1993)

2.6.2. Cévy – póry dřeva

Cévy, odborně zvané jako tracheje, jsou vodivé elementy dřeva, které se vyskytují pouze u listnatých dřevin. Jejich hlavní funkcí je vedení vody spolu s rozpuštěnými nerostnými látkami od kořenů ke koruně stromu. Tzv. letní cévy mají i funkci mechanickou z důvodu větší pevnosti dřeva v oblasti letních přírůstků dřeva. Stejně tak, jako je voda vedena skrze póry do dřeva, je i vedena ven například při sušení. Pouhým okem jsou znatelné pouze velké cévy, jejichž průměr je více než 0,1 mm. Na příčném řezu, který je vedený napříč ose kmene jsou viditelné jako okrouhlé póry, zatímco na podélných řezech se jeví, jako rýhy. Podle této charakteristiky se pak dále dělí listnaté dřeviny na roztroušeně pórovité (buk, habr, olše, lípa, javor, topol) a kruhovitě pórovité (dub, jasan, jilm, akát, moruše, kaštanovník). (Křupalová, 1997; Požgaj 1993)

V porozumění chemických a fyzikálních procesů hraje vztah mezi pevnou látkou (dřevem) a kapalinou významnou roli v mnoha průmyslových odvětvích. Průmyslové technologické procesy, např. barvení, čištění nebo lepení jsou úzce závislé na smáčivosti povrchu dřeva, to lze jednoduše charakterizovat pomocí kontaktního úhlu. (Požgaj et al., 1993)

2.7. Kontaktní úhel

Kontaktní úhel, smáčivost či úhel smáčení. Smáčivost je v případě tohoto výzkumu vlastnost kapaliny přilnout k povrchu dřeva. Jedná se o úhel, který je svírána tečnou k povrchu kapky. Vztah mezi jednotlivými mezifázovými energiemi a úhlem smáčení je dán Youngovou rovnicí $\gamma_{BC} - \gamma_{AC} = \gamma_{AC} \cos \theta$ (B značí pevné látky, A kapalně a C plynné nebo kapalně látky, θ značí úhel smáčení). Tyto hodnoty kontaktního úhlu mohou být ovlivněny například adsorpcí látek přítomných v plynné fázi na povrchu tuhé látky. To vede ke snížení povrchové energie pevné látky. (Švorčík, V., Kolářová, K.,)

Velký vliv na smáčivost má drsnost povrchu. Závisí na tom, zda kapka tekutiny zvlhčí povrch, nebo jestli mezi kapkou a povrchem zůstanou povrchové kapsy. Nízké hodnoty kontaktního úhlu ukazují tendenci vody se šířit a přilnout k povrchu. Vysoké hodnoty naopak poukazují na vlastnost vodu odpuzovat. V případě úplného smáčení se pohybuje hodnota kontaktního úhlu 0° , smáčitelný je povrch pevné látky v rozmezí naměřených hodnot $0 - 90^\circ$, v případě hodnot nad 90° je povrch látky nesmáčitelný. Význam kontaktního úhlu je důležitý zejména tam, kde je potřeba zkontrolovat nebo posoudit intenzitu kontaktu mezi kapalnými a pevnými látkami obecně. V tomto případě např. lakování, lepení, impregnace apod. (Mittal K.L., 2006)

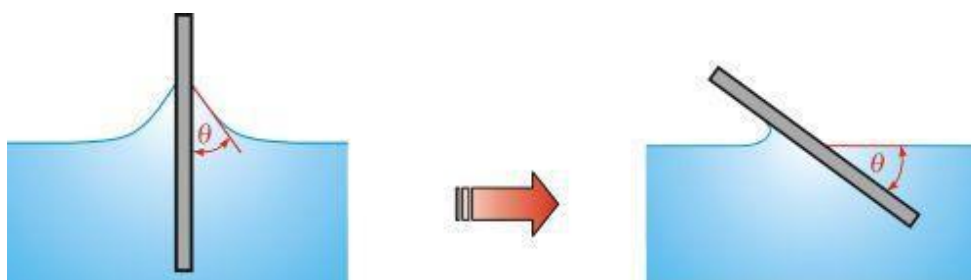
2.7.1. Měření kontaktního úhlu

Jedná se o jednu z přímo měřitelných vlastností fázového rozhraní mezi pevnou látkou / plynem / kapalinou. Stanovit ho je možné dvěma způsoby: nepřímým nebo přímým měřením. (Bartovská, L., Šišková, M., 2005)

- **Nepřímé metody**
 - o Stanovení úhlu smáčení na drsných rovinných površích
 - o Stanovení úhlu smáčení na práškovitých materiálech
 - **Přímé metody**
 - o Měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce
 - o Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce nebo přilnající bublině
- (Kvítek, L., Pikal, P., Kovaříková, L., Hrbáč, J., 2002)



Obrázek č. 5 – průběh měření kontaktního úhlu (Berežná, 2019)



Obrázek č. 6 – Přímé metody měření kontaktního úhlu na naklánějící se destičce (VŠCHT.cz)



Obrázek č. 7 – Přímé metody měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce (VŠCHT.cz)

3. Metodika

3.1. Příprava vzorků pro měření kontaktního úhlu

Pro účel výzkumu byla použita kotoučová – formátovací pila a laserový paprsek. U kotoučové pily byla nastavena řezná rychlost 4 000 otáček a byl zde použit ruční posuvných mechanismus. Stroj byl obsluhován pověřenou odbornou osobou, která měla možnost si posuv obrobku sama korigovat. Tak se dělo z důvodu zamezení pálení obrobku, nebo jinému poškození. Ač se může zdát automatický posuv lepší, nemusí tomu tak vždy být. Je nutné brát ohled na obráběný materiál a jeho strukturu. Automatický posuv funguje u všech materiálů stejnou rychlostí, zatímco při ručním posuvu je možné si rychlost hlídat podle potřeby, a tím často zamezit právě jistému poškození nebo přepalování materiálu.

Pro řezání dubových vzorků laserovou technologií byl zvolen Laser BLT wood cut, který vyrobila firma Biatek Technology s.r.o., s výkonem 5 kW a rychlostí posuvu laserové hlavice 3 m/min. Zde bylo ohnisko umístěno do horní třetiny obráběného materiálu. Celý proces spočíval ve vyříznutí 60 kusů jednotlivých vzorků z dubového dřeva. Nejprve se nařezaly vzorky laserovým paprskem v počtu 20 kusů při vlhkosti 8 %, dalších 20 kusů při vlhkosti 30 %. Následně 20 kusů vzorků byly nařezány pomocí pilového kotouče, kde rozdělení podle vlhkosti už nevzniklo a to proto, že na formátovacích kotoučových pilách se zpravidla řeže proschlé dřevo, nikoliv nasáklé, proto byla kotoučová pila vztažena jen na (7,8 %), zaokrouhleně 8 % vlhkosti. Každý vzorek po seříznutí dostal své označení příslušnou značkou a pořadovým číslem pro pozdější rozlišení a použití při měření a byl přesunut do klimatizační komory.

3.2. Měření

3.2.1. Přístroj pro měření kontaktního úhlu

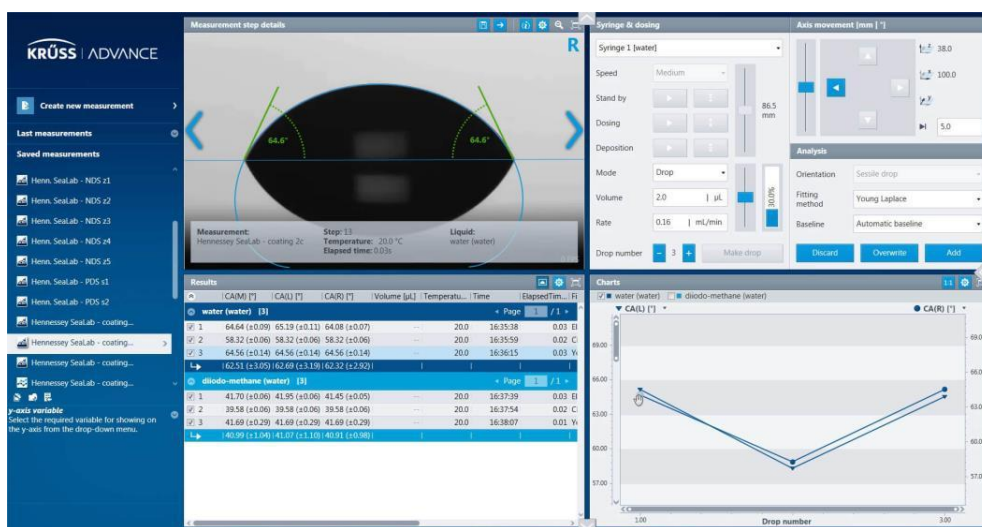
Samotné měření výzkumu mé práce byl uskutečněn na stroji zvaném goniometr, nebo-li analyzátor tvaru kapky. Konkrétně se jednalo o značku KRÜSS. Tento přístroj je vybaven vysoce kvalitními optickými komponenty a fotoaparátem s vysokým rozlišením, což zajišťuje přesný obraz dávkované kapky pro spolehlivé vyhodnocení kontaktního úhlu. Otvor na osvětlovací jednotce poskytuje optimální optické podmínky pro malé kontaktní úhly a reflexní vzorky, které jinak často představují výzvu při měření kontaktního úhlu. Stroj je vybaven nastavitelnou destičkou, kterou je možné posouvat všemi svislými směry. To umožní vzorek dostat do ideální polohy pro přesnější měření. Destička byla sestavena ze dvou odnímatelných částí, které jsou postaveny na sebe největší plochou a zajištěny pomocí šroubů. V případě, že je vzorek vyšších rozměrů, je možné vrchní část destičky odmontovat. (KRÜSS-scientific.com, 2019)



Obrázek č. 8 – Goniometr od firmy KRÜSS (Krus.com)

3.2.2. Software pro práci s kontaktním úhlem

Ke zpracování dat a komunikaci se samotným přístrojem bylo nutné použít adekvátní software. V tomto případě byla k dispozici aplikace s názvem ADVANCE. Příslušné funkce pro každý jednotlivý krok jsou uspořádány v dlaždicích, které zobrazují potřebné informace. Dlaždice je možné nastavit, respektive je možné poskládat dlaždice tak, aby se zobrazovaly jen informace, které jsou potřebné. (KRÜSS-scientific.com, 2019)



Obrázek č. 9 – Advance software (advancesoftware.com)

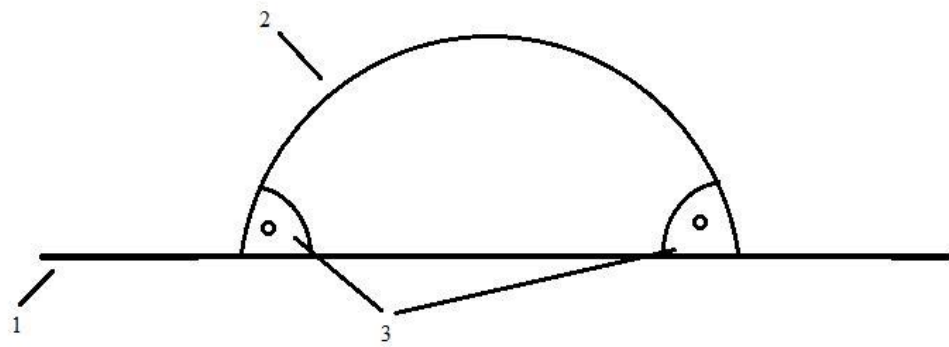
3.3. Postup při měření kontaktního úhlu

Samotné měření kontaktního úhlu tedy probíhalo následovně. Zprvu byl určen počet opakování měření na jednom kusu vzorku. Čím více opakování měření, tím přesnější výsledek. Vzhledem k množství materiálu byl přizpůsoben i počet vzorků. Vzhledem k tomu, že povrch/strana vzorku, na kterém probíhalo samotné měření byl náchylný na jakoukoliv změnu, nebo porušení bylo nutné povrch chránit vůči jiným vnějším i vnitřním náchylnostem. Také bylo nutné opakovat měření stále na stejném místě a pokud možno za stejných podmínek, např. světelných kvůli odrazu světla v měřicím přístroji goniometru.

Po spuštění potřebné techniky, to znamená goniometru a počítače, bylo na čase si pomocí aplikace ADVANCE ověřit dostatek tekutin obsažených v nádržkách goniometru. Pro účely této práce se vyskytovala destilovaná voda v jedné z nádržek. Konkrétně byly dlaždice nastaveny takto: přímý přenos dávkování a měření kapky (v levém horním rohu), prvky pro nastavení goniometru (přiblížení / oddálení / posuv do stran desky, nebo nastavení výšky s měřeným vzorkem a pohyb jehly v pravém horním rohu), seznam měřených hodnot (v levém dolním rohu) a grafické znázornění měření (v pravém dolním rohu).

Za pomocí aplikace ADVANCE bylo možné v horní dlaždici vpravo nastavit umístění jehly produkující destilovanou vodu na přiložený vzorek dubového dřeva. Stisknutím tlačítka „Drop“, byla vytvořena kapka destilované vody o objemu 5 μ l, následně tlačítkem „Dossing“ přiložena na povrch vzorku. Posledním tlačítkem „Deposition“ byla jehla vrátcena na svou původní pozici tak, aby se nedotýkala vytvořené kapky a nijak jí neporušovala nebo neovlivňovala měření kontaktního úhlu. V levé horní dlaždici bylo možné proces sledovat pomocí optického mechanismu, stejně tak vytvořenou kapku.

Hned po umístění kapky destilované vody a následného nastavení jehly na původní pozici bylo spuštěno nahrávání v délce 5 sekund, ve kterém probíhalo měření kontaktního úhlu. Klíčová hodnota se nacházela v 5. sekundě v podobě průměru kontaktního úhlu. Proces se dohromady konal dvakrát na každém vzorku řezaném pilovým kotoučem (v případě laseru proběhla 4 opakování). Po naměření hodnoty se kapky ze zkoumaného materiálu odstranily pomocí setřesení. Vzorky byly následně uloženy zpět do klimatizační komory.



1 - Vzorek dubového řeziva; 2 - kapka destilované vody; 3 - kontaktní úhly z nichž se počítá průměr

Obrázek č. 10 – princip měření kontaktního úhlu (Berežná, 2019)



Obrázek č. 11 – Proces měření kontaktního úhlu (Berežná, 2019)

Naměřené hodnoty viz tabulky níže:

Tabulka č. 1 – měření kontaktního úhlu při 8% vlhkosti před – řez laserem

No.s	WS	MC	Kód	Kontaktní úhel (°) Upraveno laserem (8 % vlhkost)	
				První měření	Druhé měření
1	Q	8	1-Q-8	102,22	85,62
2	Q	8	2-Q-8	118,72	111,36
3	Q	8	3-Q-8	121,98	91,68
4	Q	8	4-Q-8	82,31	88,42
5	Q	8	5-Q-8	77,92	64,11
6	Q	8	6-Q-8	90,75	86,3
7	Q	8	7-Q-8	99,36	93,83
8	Q	8	8-Q-8	113,43	99,48
9	Q	8	9-Q-8	88,57	80,07
10	Q	8	10-Q-8	99,04	104,09
11	Q	8	11-Q-8	90,8	88,24
12	Q	8	12-Q-8	85,42	95,74
13	Q	8	13-Q-8	113,49	106,49
14	Q	8	14-Q-8	88,3	87,31
15	Q	8	15-Q-8	98,19	94,06
16	Q	8	16-Q-8	90,44	94,28
17	Q	8	17-Q-8	106,1	115,92
18	Q	8	18-Q-8	96	113,39
19	Q	8	19-Q-8	101,75	94,32
20	Q	8	20-Q-8	72,13	65,97

* **No.s.:** pořadové číslo vzorku

* **Q :** druh dřeviny označením prvního písmene (Quercus) dub

* **MC:** označení stavu vlhkosti, zde zaokrouhlena hodnota vlhkosti z 7,8% na 8%

První měření dubového řeziva s vlhkostí 8 %, které bylo řezáno laserovým paprskem vyhodnotilo průměrnou hodnotu kontaktního úhlu 94,94°. Směrodatnou odchylku vyjadřující výši hodnoty lišící se od vypočítaného průměru zde činí 13,47°.

Tabulka č. 2 - měření kontaktního úhlu při 30% vlhkosti

No.s	WS	MC	Kód	Kontaktní úhel (°) Upraveno laserem (30 % vlhkost)	
				První měření	Druhé měření
1	Q	>FSP	1-Q->FSP	98,88	101,88
2	Q	>FSP	2-Q->FSP	89,67	83,2
3	Q	>FSP	3-Q->FSP	101,02	109,28
4	Q	>FSP	4-Q->FSP	89,27	85,43
5	Q	>FSP	5-Q->FSP	100,74	99,51
6	Q	>FSP	6-Q->FSP	110,85	110,19
7	Q	>FSP	7-Q->FSP	100,63	105,11
8	Q	>FSP	8-Q->FSP	98,32	113,47
9	Q	>FSP	9-Q->FSP	120,05	125,86
10	Q	>FSP	10-Q->FSP	101,1	87,58
11	Q	>FSP	11-Q->FSP	108,59	87,76
12	Q	>FSP	12-Q->FSP	108,59	93,45
13	Q	>FSP	13-Q->FSP	83,6	114,86
14	Q	>FSP	14-Q->FSP	96,97	97,63
15	Q	>FSP	15-Q->FSP	105,15	107,12
16	Q	>FSP	16-Q->FSP	112,2	115,22
17	Q	>FSP	17-Q->FSP	88,95	92,08
18	Q	>FSP	18-Q->FSP	106,29	115,25
19	Q	>FSP	19-Q->FSP	102,85	101,02
20	Q	>FSP	20-Q->FSP	118,51	97,18

* **MC:** označení stavu vlhkosti, zde zaokrouhlena hodnota vlhkosti 30 %.

Při měření vzorků s vlhkostí 30 % je možné všimnout průměrné hodnoty kontaktního úhlu $102,05^\circ$, přičemž směrodatná odchylka odlišností průměru vykazuje $10,6^\circ$. Při tomto poznatku je zřejmé, že řezivo, které má vyšší vlhkost vykazuje vyšší kontaktní úhel, smáčivost povrchu je jinak řečeno nižší než řezivo, které má vlhkost nižší. Dále byly měřeny vzorky dubového řeziva řezané pomocí pilového kotouče. Postup měření byl stejný, jako u měření vzorků řezaných laserem. V aplikaci bylo možné proces sledovat, stejně tak vytvořenou kapku. Trvání relace opět zabralo 5 sekund, při kterých se spustilo nahrávání a goniometr změnil kontaktní úhel. Zapsaná hodnota, která se stala důležitou byla opět v 5. sekundě v podobě průměru kontaktního úhlu. Proces se tentokrát opakoval celkem čtyřikrát, pro zaznamenání co nejpřesnější hodnoty měření.

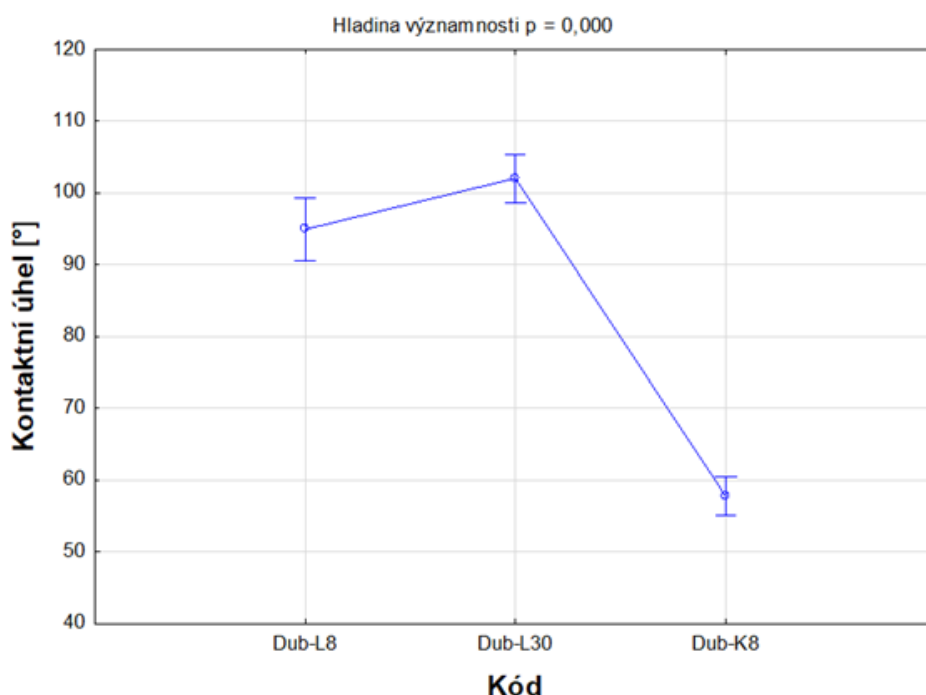
Další měření dubového řeziva s vlhkostí 8 %, které bylo řezáno tentokrát pilovým kotoučem pro porovnání jednotlivých rozdílů vyhodnotilo průměrnou hodnotu kontaktního úhlu s číslem $61,78^\circ$. Směrodatnou odchylku vyjadřující výši hodnoty lišící se od vypočítaného průměru zde činí $11,32^\circ$. Zde lze pozorovat už jen nejnižší naměřené hodnoty, což znamená, že smáčivost povrchu je vyšší v případě řezu pilovým kotoučem. Stejně měření řeziva s vlhkostí tentokrát 30 % ve stavu před nasáknutím, které bylo řezáno pilovým kotoučem pro porovnání jednotlivých rozdílů vyhodnotilo průměrnou hodnotu kontaktního úhlu s číslem $54,07^\circ$. Směrodatnou odchylku vyjadřující výši hodnoty lišící se od vypočítaného průměru zde činí $12,01^\circ$. Zde jsou viditelné nejnižší naměřené hodnoty vůbec a to znamená, že přilnutí tekutiny k povrchu řeziva je mnohem snazší v případě řezu pilovým kotoučem a jeho vlhkost má na přilnutí pozitivní vlivy.

Tabulka č. 3 – měření kontaktního úhlu při řezáním pilovým kotoučem a vlhkosti 8

No.s	WS	MC	Kód	Kontaktní úhel (°) Pilový kotouč (8 % vlhkost)	
				První měření	Druhé měření
1	Q	8	1-Q-8	60,01	61,79
2	Q	8	2-Q-8	67,36	68,36
3	Q	8	3-Q-8	59,4	52,61
4	Q	8	4-Q-8	60,47	71,08
5	Q	8	5-Q-8	61,46	55,85
6	Q	8	6-Q-8	47,89	43,6
7	Q	8	7-Q-8	42,44	43,67
8	Q	8	8-Q-8	62,78	64,3
9	Q	8	9-Q-8	59,21	62,39
10	Q	8	10-Q-8	69,47	47,08
11	Q	8	11-Q-8	94,08	83,32
12	Q	8	12-Q-8	80,76	50,26
13	Q	8	13-Q-8	66,1	61,15
14	Q	8	14-Q-8	67,8	58,7
15	Q	8	15-Q-8	66,6	84,37
16	Q	8	16-Q-8	52,59	63,38
17	Q	8	17-Q-8	66,64	62,37
18	Q	8	18-Q-8	58,06	66,26
19	Q	8	19-Q-8	73	53,71
20	Q	8	20-Q-8	51,89	49,08

3.4. Výsledky měření

Všechny výsledky byly průběžně zadávané do aplikace pro tvorbu tabulek, Microsoft Office Excel. Průměrná hodnota z prvního měření ve stavu vzorků řezaných laserem před nasáknutím při vlhkosti 8 % byla zaznamenána 94,94°. U měření vzorků s vyšší vlhkostí materiálu byl úhel smáčení o něco vyšší, tedy s hodnotou 102,13°. Druhé měření vzorků ve stavu po nasáknutí bylo vyhodnoceno s průměrnou hodnotou kontaktního úhlu při 8 % vlhkosti 65,02° a u vlhkosti 30 % hodnotu 70,68°. Posledním měřením vzorků řezané kotoučovou pilou byla naměřena průměrná hodnota smáčení ve stavu před nasáknutím při 8 % vlhkosti 57,92°. Menší hodnota kontaktního úhlu je způsobena použitou technologií obrábění. Zde tedy platí, že čím menší je kontaktní úhel, tím vyšší je smáčivost povrchu. Při řezání laserovým paprskem totiž dochází ke stahování pórů dřevěné plochy, a proto je přilnavost tekutiny horší. I v případě vyšší vlhkosti dřeva bude kapalina snáze přilínat na povrch řeziva, které bylo řezáno pilovým kotoučem. V hodnotách zapsaných v grafu se vždy jedná o stejný druh dřeviny, a to dubové řezivo.



Obrázek č. 12 – Graf zobrazující stav kontaktního úhlu (Berežná, 2019)

- * **K8** – Kotoučová pila 8 %, vlhkost dřeva, **L8** – Laserový paprsek 8 %, vlhkost dřeva, **L30** – Laserový paprsek 30 %, vlhkost dřeva

Vyhodnocením pomocí Duncanova testu vznikl graf, ze kterého lze vyčíst průměrné hodnoty jednotlivých měření. Všechny tři hodnoty se statisticky významně liší. Je zde uvedena hladina významnosti, která určuje pravděpodobnost správného výsledku a která byla zvolena $p = 0,05$, tedy 5 %. To znamená, že výsledek je na 95 % správný. Podle přiložené tabulky níže je možné si všimnout, že hodnoty vytvořené pomocí Duncanova testu byly vyhodnoceny dokonce s mnohem lepší hodnotou. Lze tedy říct, že správnost výsledků je dokonce vyšší než 95 %.

Tabulka č. 4 – měření kontaktního úhlu při řezání pilovým kotoučem a vlhkosti 8%

Stupeň °	94,940 (1)	102,13 (2)	57,92 (3)
Dub-L8 (1)	X	0,004	0
Dub-L30 (2)	0,004	X	0
Dub-K8 (3)	0	0	X

4. Diskuze

Jak již bylo zmíněno, to jestli je obrobený materiál schopný hůře či lépe absorbovat kapalinu, je závislé na mnoha faktorech. Podle Barnekova, et al. (1986) je jeden z nejdůležitějších faktorů drsnost povrchu. V rámci tohoto výzkumu je možné dodat, že velice záleží na zvoleném způsobu samotného obrábění, kde bylo prokázáno, že u obrábění laserem byly hodnoty kontaktního úhlu přes 90° a při použití standardního naostřeného kotouče určeného na tvrdé dřevo se hodnoty pohybovaly pod 60°. Drsností povrchu dubového dřeva řezaného laserem se zabýval např. výzkum (Vališ, 2019), kde došli k závěru, že u dubu roste drsnost se snižující se vlhkostí z BNV na 8 %. Což koresponduje s výsledky tohoto výzkumu u řezání laserem, kde byl při vlhkosti 8 % naměřen nižší kontaktní úhel, což by mělo odpovídat vyšší drsnosti. Tyto výsledky potvrzuje i Sikora, A. (2016) ve své diplomové práci. Vždy je důležité vědět, na co bude výsledný výrobek použit, a zda je zapotřebí, aby snadno absorboval kapalinu či nikoli. Pokud ne, lze doporučit obrábění laserem při vyšší vlhkosti, to má ale za následek navýšení spotřeby energie (Hernández-Castañeda, J. C., 2011). Z výsledků dále vyplývá, že kontaktní úhel na povrchu obráběném pilovým kotoučem je nižší než u obrábění pomocí laseru. To je způsobeno nejenom vlivem drsnosti, ale i vlivem nehomogenní struktury dřeva.

5. Závěr

Kontaktní úhel pomohl určit smáčivost povrchu materiálu po řezání dvěma různými technologiemi. Obě tyto technologie, skýtající výhody i nevýhody, jsou hojně využívané, zejména pak pro spoustu řemeslníků i velkých pilnic a výrobců.

Vzhledem k proměnným hodnotám lze výsledky shrnout následovně. Čím menší kontaktní úhel goniometr změřil, tím vyšší je hodnota smáčivosti dřeva.

Při obrábění má na smáčivost povrchu vlhkost materiálu vliv i v rámci použití jedné technologie. Tento vliv je minimální v případě porovnání laserového paprsku s pilovým kotoučem. Při řezu laserovým paprskem u vlhkosti materiálu 30 % je smáčivost povrchu o 7,57 % vyšší než u vlhkosti materiálu 8 %. V případě porovnání použitých technologií (laserový paprsek, pilový kotouč) je rozdíl významnější. Zde při hodnotě vlhkosti materiálu 8 % a zvolené technologii řezu laserovým paprskem je smáčivost povrchu o 63,92 % vyšší, než v případě použití pilového kotouče.

Fakt, že je povrch materiálu smáčivější může být z jistých důvodů velmi žádoucí, a to zejména v případě použití nátěrových hmot, nebo impregnací.

Ovšem to, co se v některých případech může jevit jako pozitivní účinek, nemusí nutně znamenat totéž v jiných případech. A to zejména vůči vyšší náchylnosti při skladování dřeva ve vlhkém prostředí před samotným opracováním, které by v tomto případě bylo pro materiál nežádoucí.

Laserový paprsek při řezání způsobí stažení, nebo-li zacelení pórů dřeva, díky čemuž materiál hůře absorbuje tekutinu, se kterou přijde do kontaktu. To může mít pozitivní vliv při skladování již nařezaného materiálu v případě, že bude uskladněno v prostorách s vysokou vlhkostí nebo v exteriéru.

7. Seznam použité literatury

ADVANCE SOFTWARE, *Advance software*. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=advance+software&client=firefox-b-ab&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiMoqu9_9bhAhUfTRUIHdJFAuIQ_AUIDigB&biw=742&bih=964#imgrc=3KdHMII9ikGZqM:

AGROJOURNAL, *Princip přirozeného sušení dřeva*. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: <https://www.agrojournals.cz/clanky/suseni-dreva-91>

BADONIA, P., *CO2 Laser Cutting of Different Materials – A Review, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, ISSN: 2395-0056, 2017

BALL, N. *Circular Saws and the History of Technology. Bulletin of the Association for Preservation Technology*, [cit. 20.01.2019]. Dostupné z: www.jstor.org/stable/1493506

BARNEKOV, V. G., a kol. *Factors influencing laser cutting of wood*. 1986. [cit. 18.03.2019]. Dostupné z: <https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/7972>

BARTOVSKÁ L.; ŠÍŠKOVÁ M.: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*. Vydavatelství VŠCHT 2005, Praha. ISBN 80-7080-579-X.

BEA cs SPOL. s.r.o. Doc. Ing. Varkoček, CSc; Doc. Ing. Rousek, C; Ing. Holopírek, C. *Dělení, obrábění a tváření materiálu*. 2001; Praha, Žďár nad Sázavou, Olomouc, Tepelnice, Písek.

BÍLEK, O.; KOVAŘÍK, M., *Stress analysis of the rotating circular saw blade*, článek ve sborníku SolidState Phenomena 2017, ISSN: 1992-9779

BRLICA V., Bc. *Technologické aspekty nástrojů pro obrábění* [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29897.
Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

ELTAWAHNI, H.A.; BENYOUNIS, K.; OLABI, A. G. (2016). High Power CO2 Laser Cutting for Advanced Materials – Review. 10.1016/B978-0-12-803581-8.04019-4.

HERNANDEZ – CASTANEDA, J., & SEZER, H., & Li, L. *The effect of moisture content and tracheids orientation in fibre laser cutting of dry and wet pine wood*. ICALEO 2009 - 28th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Congress Proceedings. 102. 1409-1418, 2009

KANNATEY-ASIBN, E., a kol. *Principles of laser materials processing*. New Jersey: 2009; ISBN 978-0470177983.

KAPLANOVÁ M.; VALIŠ J.; JAŠŮREK B.; SYROVÝ T., *Effect of surface roughness on surface free energy of coated papers*. Scientific Papers of the University of Pardubice, Series A, Faculty of Chemical Technology. Univerzita Pardubice, (2011).

KOLB, J., 2011. *Dřevostavby – systém nosných konstrukcí, obvodové pláště*. . ISBN 978-80-247-4071-3. Praha. 2011.

KRÜSS. *Drop shape analyzer*. [online] [cit. 15.04.2019]. Dostupné z: <https://www.kruss-scientific.com/products/drop-shape/dsa30/drop-shape-analyzer-dsa30/>

KRÜSS, *Goniometr od firmy KRÜSS*. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: https://www.google.com/search?q=goniometr+kruss&client=firefox-b-ab&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjggZmJ_NbhAhVQWxUIH%20YA3CAcQ_AUIDigB&biw=1268&bih=855#imgrc=YsoBQSLsDCBMRM:

KŘUPALOVÁ, Z. *Nauka o materiálech*. 1997 Praha; Nakladatelství Sobotáles. ISBN 80-85920-57-3.

KVÍTEK L.; PIKAL P.; KOVAŘÍKOVÁ L.; HRBÁČ J.: *The study of the wettability of poder inorganic pigments based on dynamic contact angle measurements using wilhelmy metod*. [online]. 2002, [cit. 2019-2-19]. dostupný n: <http://publib.upol.cz/~obd/fulltext/Chemica41/CHemica41-3.pdf>

MITTAL K. L.: *Contact Angle, Wettability and Adhezion*. Boston 2006. ISBN 90-6764-436-6.

MYTTING, L., *Vše o tom, jak dřevo sekát, skladovat a sušit – a o duši palivového dřeva*. 2015 ISSN 978-80-242-4721-2.

GOCHEV, Z. *Laser Wood Cutting And Modifications In Its Structure*. 2016. [cit. 10.04.2019]. Dostupné z: https://translate.google.com/translate?hl=cs&sl=en&u=https://www.researchgate.net/publication/311450106_LASER_WOOD_CUTTING_AND_MODIFICATIONS_IN_ITS_STRUCTURE&prev=search

Prof. Ing. POŽGAJ, A. D. *Štruktura a vlastnosti dreva*. 1997; Bratislava: Příroda, a.s. ISBN 80-70-00960-4.

PEVA, *Formátovací kotoučová pila*. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: https://www.google.com/search?client=firefox-b-e&biw=1920&bih=966&tbm=isch&sa=1&ei=Aqi4XK2ZDta11fAP6Oib0A4&q=kotou%C4%8Dov%C3%A1+form%C3%A1tovac%C3%AD+pila&oq=kotou%C4%8Dov%C3%A1+form%C3%A1tovac%C3%AD+pila&gs_l=img.3...28971.29772..29991...0.0..0.105.455.3j3.....0....1..gws-wiz-img.6BvIrTWlXtM#imgrc=imHQfPjHIz-A5M:

RIVEIRO A., a kol. *Parametric investigation of CO2 laser cutting of 2024-T3 alloy*, Journal of Materials Processing Technology 210 (2010) ISSN 1138–1152.

SIKORA, A. 2016. *Vliv urychleného stárnutí na kvalitu povrchové úpravy dřeva upraveného nátěrovými látkami*. Zvolen. 2016.

SLIDESERVER, *Schéma kotoučové pily*. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: https://www.google.cz/search?biw=1920&bih=888&tbm=isch&sa=1&ei=pWKz%20XKjkCLeHjLsPiPiJ6AE&q=kotou%C4%8Dov%C3%A1+pila+sch%C3%A9ma%20&oq=kotou%C4%8Dov%C3%A1+pila+sch%C3%A9ma&gs_l=img.3...760.2280.%20.2415...0.0..0.218.667.6j0j1.....1....1..gws-wiz-%20img.....0j0i24.mB15xUyp81o

SLIDEPLAYER, *Schéma laseru*. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: https://www.google.cz/search?imgrc=9gzYVZ9BsLIAqM:sPiPiJ6AE&q=kotou%C4%8Dov%C3%A1+pila+sch%C3%A9ma%20&oq=kotou%C4%8Dov%C3%A1+pila+sch%C3%A9ma&gs_l=img.3...760.2280.%20.2415...0.0..0.218.667.6j0j1.....1....1..gws-wiz-%20img.....0j0i24.mB15xUyp81o&cad=h

SVOREŇ, J. *Drevárske stroje. Časť I*. Zvolen 2002. ISBN 80-228-1188-2.

ŠVORČÍK V.; KOLÁŘOVÁ K.: *Goniometrické stanovení povrchové smáčivosti*. VŠCHT Praha [cit. 12.08.2019][Online]. Dostupný z WWW: www.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/labsvl-001/n111043-1.pdf

VALIŠ, J., JAŠŮREK, B., SYROVÝ, T., KAPLANOVÁ M., *Effect of surface roughness on surface free energy of coated papers*. Scientific Papers of University of Pardubice, Series A, Faculty of Chemical Technology. Univerzita Pardubice, 2011.

VŠCHT, *Přímé metody měření kontaktního úhlu na naklánějící se destičce, Přímé metody měření kontaktního úhlu na přisedlé kapce*. [cit. 06.12.2018]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/mereni_uhlu_smaceni.html