

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

KATEDRA MATERIÁLU A STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Technická
fakulta**

**Zhodnocení technologie briketování kovových a nekovových
materiálů z pohledu energetické náročnosti**

Disertační práce

Vypracoval:

Ing. Vojtěch Liška

Školitel:

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Rok vyhotovení:

2020

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Zhodnocení technologie briketování kovových a nekovových materiálů z pohledu energetické náročnosti“ vypracoval sám, pod odborným vedením mého školitele prof. Ing. Milana Brožka, CSc. Při zpracování práce jsem využil literaturu, která je shrnuta v závěru práce v seznamu literatury. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

V Praze dne 20.7.2020

.....
Ing. Vojtěch Liška

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému školiteli prof. Ing. Milanovi Brožkovi, CSc. za profesionální a odborný přístup, jakož i za rady, které pro mě byly velice cenným zdrojem informací a inspirace při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval i všem zaměstnancům působícím na katedře Materiálu a strojírenské technologie Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze za vstřícné jednání a odbornou pomoc v průběhu mého studia v doktoranském studijním programu.

ABSTRAKT

Tato disertační práce řeší energetickou náročnost briketování v závislosti na briketovaném vstupním materiálu. U nekovových materiálů (dřevní hmota, papírové skarty, chmel a cukrová třtina) z pohledu spotřeby elektrické energie hydraulického pístového briketovacího lisu v ekonomickém kontextu jeho provozu v korelaci s kvalitativními vlastnostmi produkce briket (zejména vlhkostí, mechanickými vlastnostmi a hustoty). Dále je řešena závislost teploty příhřevu lisovací komory briketovacích lisů (pístové i šnekové konstrukce) na kvalitu výsledné produkce briket (mechanické vlastnosti, vlhkost a hustota briket). U kovových materiálů je řešena energetická náročnost výroby briket z pohledu spotřeby mechanické práce a dále měrné hmotnosti produkce briket - experimentálně hodnotí kvalitu kovových briket z materiálů, které jsou v průmyslové praxi nejpoužívanější (třísky z obrábění hliníkových slitin, litin a ocelí). Práce též poskytuje ekonomický rozbor (z pohledu proveditelnosti i ekonomické rentability s ohledem na vývoj ceny vhodných komodit) získání vstupních surovin (kovových i nekovových materiálů) pro tuto technologii formou komoditních burz, a to jak v České republice, tak v Evropě. V neposlední řadě práce navrhuje zcela nové vstupní materiály na bázi stavebního a demoličního odpadu, které je možné zpracovat technologií briketování, a to s ohledem na spotřebu mechanické práce (energetickou náročnost) procesu briketování a stanovuje technické parametry jejich zpracování a dalšího uplatnění v podobě nových materiálů použitelných v zemědělském i stavební oboru.

Klíčová slova: Brikety; briketování; energetická náročnost; spotřeba elektrické energie.

ABSTRAKT V ANGLICKÉM JAZYCE

The thesis is all about energy intensity of briquetting depending on the briquetted input materials. Non-metallic materials (wood, papers, hops and sugar cane) from the point of view of electricity consumption of a hydraulic piston briquetting press in the economic context of its operation in correlation with the qualitative properties of briquette production (especially moisture, mechanical properties and density). Furthermore, the dependence of the heating temperature of the pressing chamber of briquetting presses (piston and screw constructions) on the quality of the final production of briquettes (mechanical properties, humidity and density of briquettes) is solved. Metal materials, the energy intensity of briquette production is solved from the point of view of mechanical work consumption and specific weight of briquette production - experimentally evaluates the quality of metal briquettes from materials that are most used in industry (chips from machining aluminum alloys, cast irons and steels). The paper also provides an economic analysis (in terms of feasibility and economic profitability with respect to the development of the price of suitable commodities) to obtain input materials (metallic and non-metallic materials) for this technology in the form of commodity exchanges, both in the Czech Republic and Europe. Last but not least, the thesis proposes completely new input materials based on construction and demolition waste, which can be processed by briquetting technology, with regard to the consumption of mechanical work (energy intensity) of the briquetting process and determines the technical parameters of their processing and further application in the form of new materials usable in agriculture and construction industry.

Key words: Briquettes; briquetting technology; energy intensity; electricity consumption.

OBSAH

PROHLÁŠENÍ	i
PODĚKOVÁNÍ	ii
ABSTRAKT	iii
ABSTRAKT V ANGLICKÉM JAZYCE	iv
1 ÚVOD	1
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	3
2.1 Význam a možnosti zpracování biomasy jako zdroje energie.....	3
2.2 Briketovací zařízení	4
2.2.1 Pístový hydraulický lis.....	5
2.2.2 Šnekový briketovací lis	7
2.3 Energetická náročnost technologie briketování.....	10
2.3.1 Spotřeba elektrické energie briketovacího lisu	10
2.3.2 Spotřeba mechanické práce.....	11
2.4 Technologie přípravy materiálu pro briketování	15
3 TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI BRIKET A METODY POSUZOVÁNÍ.....	19
3.1 Vlhkost vstupního lisovaného materiálu.....	20
3.2 Základní materiál	20
3.3 Hustota brikety.....	21
3.4 Mechanická zkouška briket	22
3.5 Zkouška pevnosti briket na rozštěp	23
4 STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD	27
4.1 Zpracování odpadu z broušení při výrobě cihel.....	29

5	EKONOMICKÉ HLEDISKO PROVOZU BRIKETOVACÍHO LISU	32
5.1	Vstupní briketovaný materiál.....	32
5.1.1	Vliv nových technologií.....	34
6	CÍL PRÁCE.....	35
6.1	První cíl.....	36
6.1.1	Dílčí cíl prvního cíle	36
6.2	Druhý cíl	36
6.3	Třetí cíl.....	36
7	MATERIÁL A METODY	37
7.1	Použité materiály	37
7.1.1	Vytipování a sběr vhodných materiálů	37
7.1.2	Příprava materiálů	38
7.2	Měření a stanovení fyzikálních vlastností materiálů	39
7.2.1	Hmotnost.....	39
7.2.2	Měrná hmotnost	39
7.2.3	Vlhkost.....	41
7.3	Měření spotřeby energie při provozu elektrických zařízení	42
7.4	Lineární kompresní test	43
7.5	Laboratorní briketovací lis.....	46
7.6	Použitý statistický aparát	48
8	ENERGETICKÁ NÁROČNOST VÝROBY BRIKET	51
8.1	Spotřeba elektrické energie briketovacího zařízení	51
8.1.1	Ekonomické zhodnocení	56
9	KOVOVÝ ODPAD – ENERGETICKÁ NÁROČNOST	59
10	VLIV TEPLoty LISOVACÍ KOMORY NA KVALITU BRIKET	65

10.1	Vliv teploty lisovací komory - pístová konstrukce briketovacího lisu....	66
10.2	Vliv teploty lisovací komory - šneková konstrukce briketovacího lisu..	72
11	STAVEBNÍ ODPAD	79
11.1	Cihelný obrus - kompresní test	79
11.1.1	Cihelný obrus - energetická náročnost.....	83
11.2	Odpad ze sádrokartonu - kompresní test.....	83
11.2.1	Sádrokartonový odpad - energetická náročnost.....	86
12	ZÁVĚR A DISKUZE.....	87
12.1	První cíl	87
12.1.1	Dílčí cíl prvního cíle	88
12.2	Druhý cíl.....	88
12.3	Třetí cíl.....	90
12.4	Přínos práce a uplatnění briket.....	90
13	SEZNAM LITERATURY	92
14	PŘÍLOHY.....	103

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma pístového briketovacího lisu [67]	6
Obrázek 2 BrikStar 30, typ 12 [10]	7
Obrázek 3 Profilis HOME	7
Obrázek 4 Schéma šnekového lisu [2]	8
Obrázek 5 Lisovací křivka.....	14
Obrázek 6 Příklad na zkoušení briket - buben [33].....	23
Obrázek 7 Ilustrační uchycení zkoušené brikety ve stroji LabTest 5.50ST	24
Obrázek 8 Diagram pevnosti briket na rozštěp – dřevní hmota (prach).....	25
Obrázek 9 Diagram pevnosti briket na rozštěp – dřevní hmota (hoblina)	26
Obrázek 10 Vývoj nakládáním se SDO (2010-2018), využití na terén N1 [70]	27
Obrázek 11 Produkce podnikových odpadů v roce 2016 [30]	28
Obrázek 12 Silo s transportními kontejnery na cihelný obrus	30
Obrázek 14 Měřicí body brikety bez díry [37]	40
Obrázek 15 Univerzální zkušební stroj Tempos ZDM 50.....	43
Obrázek 15 Sestava laboratorní briketovacího lisu	47
Obrázek 16 Realizovaný laboratorní briketovací lis	47
Obrázek 18 Blokové schéma připojení analyzátoru sítě do rozvodné sítě.....	51
Obrázek 18 Spotřeba elektrické energie v závislosti na lisovaném materiálu	55
Obrázek 19 Spotřeba elektrické energie na jednotku produkce	56
Obrázek 20 Pracoviště pro měření kovových briket	61
Obrázek 21 Porovnání vzorků - ocel (kompresní test vs. průmysl)	62
Obrázek 22 Porovnání vzorků - litina (kompresní test vs. průmysl).....	63
Obrázek 23 Porovnání vzorků - hliník (kompresní test vs. průmysl).....	63
Obrázek 24 Snímek z termo kamery – vzorek A, 230 °C	68
Obrázek 25 Snímek z termo kamery – vzorek B, 270 °C	68
Obrázek 26 Šnekový briketovací lis v provozu.....	73
Obrázek 27 Briketa - cihelný obrus, vzorek č.1	80
Obrázek 28 Závislost síly a hustoty na kompresní síle, cihelný obrus, vzorek. č.1	80

Obrázek 29 Proces autoklávování - cihelný obrus	82
Obrázek 30 Briketa - sádrokartonový odpad, vzorek č. 1	84
Obrázek 31 Závislost síly a hustoty na kompresní síle, vzorek. č.1	85
Obrázek 32 Závislost síly a hustoty na kompresní síle, vzorek. č.2.....	85

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Algoritmus - spotřeba mechanické práce, PTC MathCAD.....	45
Tabulka 2 Zkoumané vzorky - spotřeba elektrické energie briketovacího lisu.....	53
Tabulka 3 Zkoumané kovové materiály - kompresní test	60
Tabulka 4 Výsledek kompresního testu - kovové materiály	60
Tabulka 5 Vliv teploty lisovací komory na vlastnosti brikety - pístový lis.....	67
Tabulka 6 Doporučené teploty lisovací komory pro jednotlivé materiály.....	67
Tabulka 7 Statistika vlhkosti produkce briket - pístový lis	69
Tabulka 8 Statistika DU produkce briket - pístový lis	70
Tabulka 9 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 1.....	70
Tabulka 10 Testové statistiky - statistická hypotéza 1	71
Tabulka 11 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 2.....	71
Tabulka 12 Testové statistiky - statistická hypotéza 2	72
Tabulka 13 Vliv teploty lisovací komory na vlastnosti brikety - šnekový lis.....	74
Tabulka 14 Statistika vlhkosti produkce briket - šnekový lis.....	75
Tabulka 15 Statistika DU produkce briket - šnekový lis.....	75
Tabulka 16 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 3.....	76
Tabulka 17 Testové statistiky - statistická hypotéza 3	76
Tabulka 18 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 4.....	77
Tabulka 19 Testové statistiky - statistická hypotéza 4	78
Tabulka 20 Směs a označení zkoumaných vzorků - cihelný obrus.....	79
Tabulka 21 Výsledek kompresního testu - cihelný obrus	83
Tabulka 22 Složení vzorků, sádrokartonový odpad	84

1 ÚVOD

Problematikou lisování, potažmo zpracováním odpadů, se člověk zabýval minimálně od doby začátku zemědělské produkce. Lépe řečeno od uplatňování průmyslových principů v zemědělské výrobě. Technologie briketování je jen jeden z mnoha příkladů využití procesů lisování. Je možné ji aplikovat na široké spektrum materiálů. Jednou z prvních velmi rozšířených aplikací bylo briketování uhlí, respektive uhelného prachu [3].

Portfolio materiálů, které lze touto technologií zpracovat, je však daleko širší: od materiálů čistě biologického charakteru až po materiály kovové. Kovovým materiálem jsou v tomto kontextu míněny hlavně třísky, které vznikají třískovým obráběním zejména při výrobě, prototypování, ale i údržbě zemědělských strojů a zařízení. Briketování se děje na briketovacím lisu a výsledným produktem je briketa, která může podle charakteru vstupního lisovaného materiálu, mít další využití [11]. Jedná-li se o materiál na organickém základu, pak je zpravidla možno briketu dále energicky využít spalováním a získat z ní tepelnou energii.

Lisování obecně, briketování nevyjímaje, je proces poměrně energeticky náročný. Se vzrůstajícím tlakem na hospodárnou produkci, a tím i efektivní výrobu zemědělských produktů, do hry čím dál tím více vstupují ekonomicko-energetické otázky. Ekonomicky udržitelný provoz briketovacího lisu je úzce spjatý nejenom ve spojení s jeho pořizovacími a provozními náklady, ale též se zpracovávanou vstupní surovinou [21]. Praxe ukazuje, že tyto ekonomické otázky (v celém jejich spektru) jsou často nepřilíš akcentované, což má ve středně a dlouhodobém měřítku paradoxně nepříznivý vliv na hospodaření (nejenom) zemědělského podniku, ale též to má multioborový přesah - například i do v současnosti tolik preferovaných ekologických otázek. Proto je záhodno se na zpracování odpadů technologií briketování dívat v celém širokém kontextu od provozní vhodnosti nasazení této technologie v daném provozu, přes ekonomické aspekty, výběr vhodného a rentabilního vstupního materiálu, až po samotné technické otázky, jako je například kvalita vyprodukovaných briket a jejich praktické využití na poli konvenčním nebo potenciálně

zcela novém, kde je předpoklad, že by mohlo dojít k úsporám nejen ekonomickým, ale též ekologickým [12].

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Vzhledem k současnému vývoji celosvětového klimatu je čím dál tím větší důraz kladen na zpracování odpadních materiálů a jejich sekundární využití. Technologie briketování má potenciál nabídnout řešení při zpracování těchto odpadních materiálů. Pro její vhodnou a rentabilní aplikaci je však zapotřebí ji zasadit do současného stavu poznání. Z odborné literatury a vědeckých publikací byly zvoleny jenom takové zdroje, které jsou pro řešenou problematiku stěžejní.

2.1 Význam a možnosti zpracování biomasy jako zdroje energie

Zdroje energie hrají z hlediska dlouhodobé celosvětové udržitelnosti zásadní roli, jejíž význam se bude i nadále zvyšovat. Je to způsobeno celosvětově se zvyšující poptávkou po energii. Obnovitelné zdroje energie z biomasy mají jedinečný potenciál tuto zvyšující se poptávku uspokojit, a to navíc udržitelným způsobem [78]. Uvážíme-li, že např. zásoba ropy bude saturovat současnou spotřebu po dobu dalších cca 40,6 let, pak se stává otázka obnovitelných zdrojů energií velmi aktuální [32]. Podle provedených vědeckých studií, které zkoumaly právě možnosti spojené s využíváním obnovitelných zdrojů energie v celém jejich kontextu od energetické bezpečnosti, přístupu k energii jako takové až po otázky sociálně-ekonomické, se ukazuje, že vhodné začlenění obnovitelných zdrojů energie do produkce může mít pozitivní dopad ekonomický i ekologický [78]. Velmi významným faktorem je v této souvislosti též dlouhodobá energetická udržitelnost a potenciální příležitost k decentralizaci výroby energie, které sebou přináší možnosti pro lokální producenty a tím i o odklon od často komplikovaných, nákladných a ekologicky nepřívětivých logistických řetězců v dodávkách tradičních fosilních paliv [48].

Z hlediska samotné energetické využitelnosti obnovitelných zdrojů energie (biomasy) v podobě zemědělských residuí je největší pozornost věnována (kromě technologie jejich přeměny do zpracovatelného stavu - např. technologií briketování či peletování) spalování a s tím spojenými vlastnostmi [25, 96]. Spalováním vzniklá tepelná energie, kterou je možno přímo využít (např. pro vytápění či vaření) nebo je možno takovou energii využít pro výrobu energie elektrické. Konstrukci zařízení pro spalování

zemědělských residuí je věnována mimořádná pozornost [96]. Z hlediska spalování emitovaných spalin je kritická zejména hladina oxidu siřičitého (SO₂) a dalších emisí, které jsou v rámci vědeckých studií zpravidla sledovány [25].

Dalším alternativním způsobem využití energie v biomase koncentrované je možnost její přeměny na syntézní plyn (tzv. syngas) a ten následně spalovat. Tento plyn může být vyroben zplyňováním se vzduchem nebo zplyňováním parou. Některé vědecké studie porovnávají efektivitu těchto dvou technik pomocí tzv. ekologické účinnosti, kde je jasně patrné, že z ekologického hlediska je to alternativa značně šetrnější k životnímu prostředí ve srovnání s se spalováním s konvenčními druhy paliv [66].

Popsané způsoby využití biomasy jako obnovitelného zdroje energie, které se opírají o publikované vědecké studie, ukazují, že potenciál ve využití této „suroviny“ není zdaleka vyčerpán a technologie, které biomasu zpracovávají (např. právě technologie briketování), jsou vhodnou příležitostí jak biomasu nadále využít, a to nejen energetickým způsobem [101].

2.2 Briketovací zařízení

Podstatný vliv na kvalitu výsledné produkce briket má kromě vstupního lisovaného materiálu i konstrukce briketovacího lisu. Proto je naprosto nezbytné pochopit podstatu konstrukce i princip činnosti takových strojů. Základním kritériem pro rozdělení těchto strojů je tlak, se kterým pracují ve své silové části (lisovací komoře), kde dochází k samotnému stlačení základního lisovaného materiálu [1]. Z toho pohledu dělíme briketovací lisy na:

a) Nízkotlaké

Vyznačují se tím, že síly (respektive působící tlak) v silové části stroje nepřesahují $P \leq 5$ MPa. Konstrukční řešení se nejčastěji omezuje na využití jedné nebo dvou pák, které přímo ovládá obsluha stroje. Výkonnost takového zařízení je nízká a silně závislá na fyzické kondici obsluhy a její predispozici. Výjimečně se objevuje konstrukční řešení na jiných principech (např. šnekové lisy). Nejčastěji používaným materiálem k výrobě

takových zařízení jsou materiály přírodní (např. dřevní hmota), výjimečně pak kovové materiály. Je to dáno jednak jejich dostatečnými mechanickými vlastnostmi pro tuto aplikaci, ale také zejména tím, že tyto lisovací stroje se používají hlavně v rozvojovém světě, případně pro příležitostnou domácí výrobu briket. V průmyslu využívány nejsou [98].

Na naší katedře se těmto lisům věnovala pozornost a byl zde, v rámci řešení disertační práce [21] zkonstruován a vyroben prototyp nízkotlakého briketovacího lisu, který je určen právě do zemí tzv. „třetího světa“.

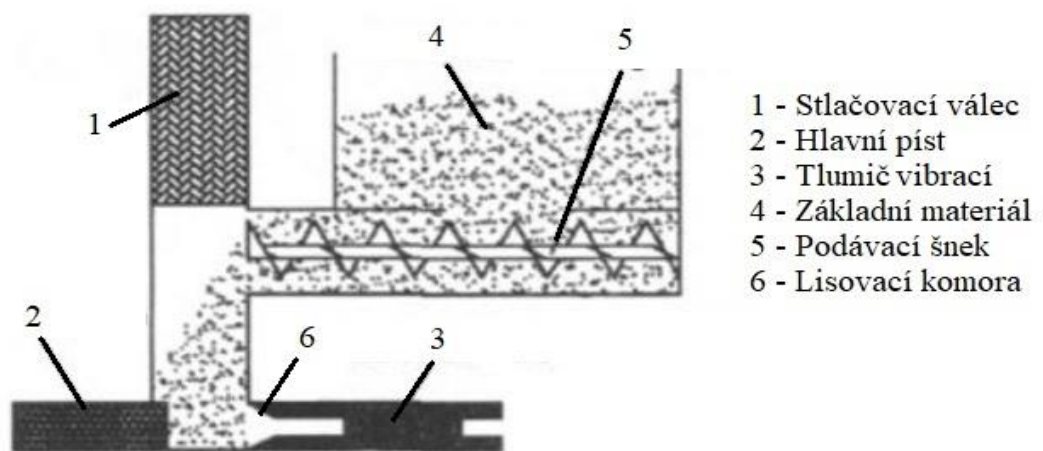
b) Vysokotlaké

Vysokotlaké lisovací stroje operují s tlaky $P > 5 \text{ MPa}$. Nežádá se jedná o tlaky v řádech stovek MPa [2], horní hranici lze jen těžko určit, protože tyto lisovací stroje se používají dokonce při briketování kovových odpadů (např. třísky z třískového obrábění kovů), kde je tato hodnota často výrobním tajemstvím výrobce stroje. Konstruktivních řešení a principů činnosti samotných briketovacích lisů je celá řada [67], avšak v podmínkách technické průmyslové praxe v České republice se nejčastěji uplatňují briketovací lisovací stroje s hydraulickým pohonem a lisovací stroje šnekové s hydraulickým nebo mechanickým pohonem. Tyto dva typy byly též využity pro realizaci experimentálních měření v rámci řešení předkládané disertační práce.

2.2.1 Pístový hydraulický lis

Jedná se o stroj pro diskontinuální výrobní proces. Základní konstrukční uspořádání hydraulického pístového briketovacího lisu je dobře patrné z obr. 1. Princip činnosti je v zásadě následující [2]: lisovaný materiál je pomocí dopravníků transportován do lisovací komory, kde je materiál zhutněn ještě před samotným briketovacím procesem ve stlačovacím válci. Následně dochází k pohybu hlavního pístu, který v lisovací komoře slisuje základní materiál, ten poté prochází tlumičem vibrací a opouští stroj v podobě hotové brikety. Dopravník slouží k optimálnímu naplnění lisovací komory základním materiálem a minimalizuje tak vzduchové kapsy, které se v průběhu pohybu základního materiálu do lisovací komory mohou objevit. Existují i briketovací lisovací stroje, které tímto mechanismem nedisponují a plnění se děje pouze vlastní hmotností materiálu (násypka je

v takovém případě umístěna zpravidla přímo nad lisovací komorou). Takové lisy jsou však vyráběny pro neprůmyslové využití a kvalita výsledné produkce není vždy úplně optimální. Pohon je zajišťován zpravidla hydrogenerátory, které dodávají hydromotorům (rotačním či přímočarým) potřebnou stlačenou hydraulickou kapalinu k vykonání práce v podobě pohonu pístu. Tato koncepce může být doplněna o přehřev lisovací komory jako takové. Tento přehřev je nejčastěji realizován elektricky napájeným topným tělesem, které je elektronicky řízeno [67]. Typickým příkladem takového stroje je briketovací lis Profilis HOME (obr. 3).



Obrázek 1 Schéma pístového briketovacího lisu [67]

Nevýhodou této konstrukční koncepce je celkově nižší výkonnost v porovnání s briketovacími lisy šnekovými. Díky přímočarému vratnému pohybu pístu jsou pohyblivé části relativně více namáhané, což vede ke kratším servisním intervalům a vyšším servisním nákladům. Na druhé straně velkou výhodou je relativně jednoduchá, v praxi hojně rozšířená, konstrukce, která je provozně spolehlivá [2].

Naše katedra disponuje dvěma stroji, které pracují na tomto principu. Jedná se o briketovací lis BrikStar 30, typ 12 (obr. 2) a menší lis Profilis HOME (obr. 3). Jsou to stroje rozdílné třídy. Zatímco BrikStar 30, typ 12 je střední briketovací lis průmyslového typu, tak Profilis HOME je briketovací lis pro domácí použití nebo pro použití v malých (zejména dřevozpracujících) provozech. Za zmínku stojí, že stroj Profilis HOME disponuje elektrickým přehřevem lisovací komory, což umožňuje provádění praktických

experimentálních měření, která jsou nezbytná pro naplnění cílů disertační práce. Shrnutí nejdůležitějších technických parametrů obou strojů uvedeno v příloze č. 1.



Obrázek 2 BrikStar 30, typ 12 [10]

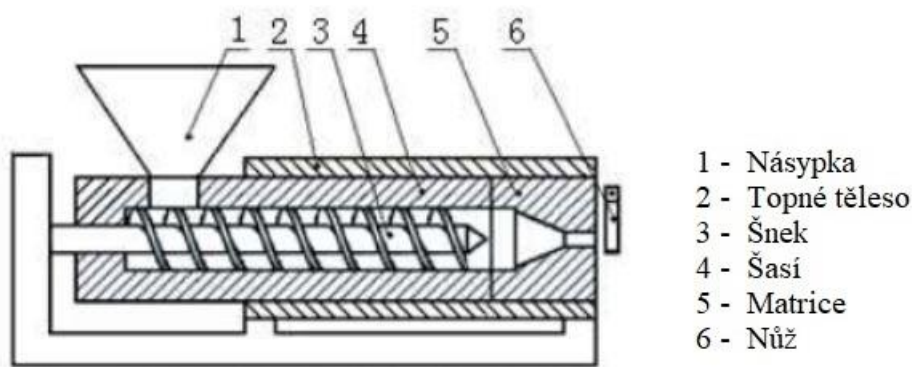


Obrázek 3 Profilis HOME

2.2.2 Šnekový briketovací lis

Jedná se o stroj pro kontinuální výrobní proces. Brikety vyrobené těmito stroji jsou velmi kvalitní, jelikož materiál není zhutňován po částech, ale kontinuálně, čímž nevznikají poruchy ve struktuře výlisků. Tímto způsobem briketování je zajištěn vysoký stupeň zhutnění [9].

Základní konstrukční uspořádání šnekového briketovacího lisu je dobře patrné ze schématu na obr. 4. Do násypky je vkládán (zpravidla strojním dopravníkem) briketovaný materiál. Ten je následně šnekem posouván a stlačován proti matrici, ze které stroj opouští již hotová briketa. Ta je pomocí nože odříznuta v příslušné (předem nastavené) délce. Podle typu stroje je možné místo nože osadit jiné dělicí zařízení. V praxi to nejčastěji bývají různé typy kotoučových nebo pásových pil, které mají požadovanou výkonnost a v prašném výrobním prostředí pracují spolehlivě. Pohon je zajišťován hydraulicky nebo též i mechanicky (elektromotorem s převodovkou). Volba pohonu je závislá na celé řadě faktorů. Mezi ty nejzásadnější patří velikost a výkonnost stroje spolu s požadavkem na dosahovaný tlak v lisovací komoře.



Obrázek 4 Schéma šnekového lisu [2]

Lisovací komora briketovacího lisu je jednou z velmi důležitých součástí stroje. Výsledná kvalita produkce je závislá na její konstrukci, tuhosti a geometrických parametrech, vhodná kombinace těchto faktorů vede k lepším mechanickým vlastnostem produkce briket a k hospodárnější spotřebě elektrické energie. Z tohoto pohledu je klíčová zejména konvexnost lisovací komory, stoupání šroubovice šneku a počet chodů lisovacího šneku [57]. Lisovací komory mohou být částečně vroubkované (ve směru osy šneku) [1]. Drážkování se používá z důvodu zvýšení koeficientu tření mezi zpracovávaným materiálem a lisovací komorou. Zvýšení tření má v zásadě dvě funkce. Zabraňuje rotaci vstupního lisovaného materiálu v lisovací komoře ve smyslu otáčení šneku a též přirozeným způsobem zvyšuje teplotu uvnitř lisovací komory, což má pozitivní dopad na kvalitu produkce briket [80].

Z hlediska teploty lisovací komory je klíčovou konstrukční součástí stroje topení. Tento konstrukční prvek zajišťuje zvýšení, udržování a vyrovnávání (egalizace) teploty uvnitř samotné lisovací komory, což je nezbytné k dosažení optimální produkce briket. Topné zařízení se zpravidla sestává ze třech samostatně řízených okruhů. Jedná se o elektrické topné těleso, které je řízeno regulační jednotkou (zpravidla digitálně řízenou, programovatelnými logickými počítači či průmyslovými počítači opatřenými perifériemi ovládanými operátorem stroje). Dále se jedná o teplotní senzory, které jsou instalovány přímo v lisovací komoře (zpravidla 1 mm od vnitřní stěny), což umožňuje monitorovat její vnitřní teplotu. Teplotní senzory jsou podle konstrukce stroje vhodně umístěny v počtu minimálně třech kusů, což je dostatečný počet pro provádění optimálního měření

v různých částech lisovací komory, která má rozdílnou teplotu. Nastavení vhodné teploty zaručuje optimální výrobní proces a uspokojivou kvalitu výsledné brikety. Topné těleso je typicky ohřáto na teplotu kolem 200 °C, ale optimální nastavení není jednoduchou záležitostí [1]. Výrobní praxe ukazuje, že teplota elektrického přehřevu má na kvalitu výsledné brikety značný vliv. Je nutné ji během výrobního procesu regulovat podle povahy vstupního materiálu, ale i podle např. klimatických podmínek (např.: vzdušná vlhkost, teplota okolí apod.). Kromě vlivu na mechanické vlastnosti produkce briket, má elektrický přehřev vliv i na povrch brikety, který je částečně karbonizovaný, což je také jeden z důvodů proč se takové brikety lépe zapalují a následně spalují [80].

Zajímavým konceptem, který byl publikovaný ve vědecké literatuře, je pokus o nahrazení elektrického topného tělesa (jako bylo popsáno výše) vytápěcími kamny, které přehřívaly briketované materiály (např. odpadním teplem, spalováním plynu nebo podobně apod.) [62]. Takové konstrukční řešení je však v podmínkách české technické praxe nevídané, a i když má jistě dopady na úsporu elektrické energie a celkovou ekonomickou bilanci, je nutno ho pečlivě rozvážit pro konkrétní aplikaci.

Předností konstrukce tohoto typu je snadnější dosažení vyšších lisovacích tlaků v lisovací komoře a kontinuální výroba.

Nevýhodou je naopak poměrně velké axiální zatížení lisovacího šneku, respektive jeho uložení, které si žádá častější servisní zásahy. Ve výrobní praxi bylo zjištěno, že toto je též vůbec nejčastější zdroj poruchy. Výše popsané tření mezi lisovacím šnekem a lisovací komorou samotnou způsobuje vysoké abrazivní zatížení lisovacího šneku, jehož životnost je tak úměrná ke vstupnímu lisovanému materiálu snížena [1, 2].

Je nutné poznamenat, že předkládaná práce se nezabývá konstrukcí briketovacích lisů jako takových. Pro naplnění cílů práce je však nezbytné provést celou řadu provozních i laboratorních měření. Pro správné vyhodnocení naměřených dat, jakož i pro hospodárnost měření, je vhodné zvolit stroj správného typu i konstrukce, který dokáže požadavky na něj v experimentu kladené, nejlépe splnit. Dále bylo nutno uvážit fakt, že při procesu briketování vznikají uvnitř brikety poruchy v závislosti na použití briketovacího zařízení.

Tyto poruchy ovlivňují kvalitu výlisku, jako jsou například jeho mechanické vlastnosti [9]. I proto bylo nutné se s konstrukcí používaných briketovacích lisů důkladně obeznámit.

2.3 Energetická náročnost technologie briketování

Na energetickou náročnost výroby briket je možno se dívat ze dvou úhlů pohledu, které spolu v zásadě velmi úzce souvisí a nelze jeden od druhého oddělit, kdy však pro praktické využití je v průmyslové praxi z ekonomického hlediska kritický pouze jeden z nich. Předmětem zkoumání tedy nebylo posuzovat a zjišťovat energetické vlastnosti briket samotných (např. výhřevnost).

2.3.1 Spotřeba elektrické energie briketovacího lisu

Energetickou náročnost je možno chápat jako spotřebu elektrické energie briketovacího lisu jako celku, která je nezbytná k produkci briket. Spotřebu elektrické energie je v takovém případě z hlediska praktického uplatnění vyjádřit jako hodinovou spotřebu briketovacího lisu [kWh] nebo z hlediska hmotnosti produkce, tedy jako spotřebu elektrické energie na hmotnostní jednotku produkce briket [$\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$]. Je nutno uvést, že v dostupné vědecké literatuře není mnoho publikovaných vědeckých zdrojů, které by se touto problematikou zabývaly.

V literatuře je popsáno měření spotřeby elektrické energie při výrobě briket na šnekovém briketovacím lisu. Jako vstupního lisovaného materiálu bylo využito slámy a sena. V případě těchto materiálů se spotřeba elektrické energie šnekového briketovacího lisu s elektrickým přihřevem lisovací komory pohybovala v rozmezí 128 – 182 $\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$ [75]. Publikace dále ukázala, že zvýšením teploty přihřevu (egalizace) z 200 °C na 250 °C došlo ke snížení spotřeby elektrické energie o 13 %, respektive 15 % (v závislosti na použitém materiálu). Tato studie však neřešila spotřebu elektrické energie pístového hydraulického briketovacího lisu. Dále zvolené materiály nebyly z hlediska české technické praxe typické.

Jiná studie řeší spotřebu elektrické energie v kontextu celé produkce briket [95]. Tato rozsáhlá studie byla provedena s dřevěnými pilinami a obsahovala měření a následně

porovnání různých typů energií, které jsou nutné k produkci jedné tuny briket z tohoto materiálu. Studie ukázala, že celých 78,62 % veškeré vynaložené energie je spotřebováno na sušení vstupního lisovaného materiálu a na samotný proces briketování je spotřebováno 12,63 % veškeré energie, přičemž je spotřebováno $49,73 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$. Měření bylo prováděno v závodě, který disponoval dvěma pístovými briketovacími lisami osazenými v briketovací lince. Tato linka byla dále vybavena odsávacím, prosévacím zařízením.

2.3.2 Spotřeba mechanické práce

Výroba briket technologií briketování je komplexní proces, který vyžaduje jak technologickou kázeň při výrobě, tak klade i poměrně vysoké nároky na přípravu vstupního lisovaného materiálu. Technologií briketování se pro účely této práce rozumí technologie vysokotlakého lisování základního materiálu za účelem výroby kvalitativně vyhovující brikety. Proto je vhodné porozumět mechanickému chování takového základního materiálu v průběhu lisování, tedy obecně řečeno v průběhu kompresního zatížení. Jen tak je možné nejenom významným způsobem ovlivnit právě zmíněné kvalitativní vlastnosti výsledných briket, ale také stanovit optimální silové poměry, což má ve svém důsledku významné ekonomické konsekvence na energetickou spotřebu celého procesu a též v neposlední řadě i na konstrukci celého výrobního (strojního) zařízení - briketovacího lisu [12, 15].

Ke zjištění vztahu mezi působící lisovací silou a výslednou deformací je nejprve nutno provést kompresní test, který spočívá v kompresi předem stanoveného množství zkoušeného základního lisovaného materiálu ve zkušebním zařízení (nejčastěji laboratorním briketovacím lisu). Pro tyto účely je vhodná například jednoduchá válcová konstrukce laboratorního briketovacího lisu [17] a univerzální zkušební stroj, který je schopen vyvinout (pro účely měření a povahu základního materiálu) dostatečnou axiální sílu [49].

Měření na univerzálním zkušebním stroji, který je číslicově řízen, se získají data (diskrétní hodnoty), viz červené body (obr. 5). Taková data je (pro jejich další zpracování a výpočty) vhodné proložit křivkou. Funkce, která naměřenou závislost dobře aproximuje,

je matematicky vyjádřena ve vztahu (2.1) [52, 87]. Lze tedy říci, že vztah mezi deformací a působící silou v lisovací komoře lisu lze obecně popsat matematicky právě pomocí rovnice (2.1) [87]. Jedná se ve své podstatě o popis mechanického chování a deformační charakteristiky lisovaného materiálu [51].

$$f(x) = a_1 \cdot (\tan(a_2 \cdot x))^{a_3} \quad (2.1)$$

kde:

- a₁ koeficient síly [N]
- a₂ deformační koeficient [m⁻¹]
- a₃ exponent funkce [-]

Pro zpracování, vyhodnocování a příslušné výpočty je v této práci používán matematický program PTC MathCAD [82], který disponuje dostatečným portfoliem nástrojů pro řešení úloh na této bázi. Podobným aparátém však disponuje i celá řada jiných odborných matematických programů. Volba použitého programu je tak do značné míry závislá na preferenci zpracovatele.

Pomocí algoritmu založeného na Levenberg-Marquardově metodě lze proložit naměřená data funkcí danou vztahem (2.1). Zmíněný program PTC MathCAD [82] disponuje implementovanou funkcí *genfit* (2.2) [81], která nalezne nejlépe odpovídající parametry k naměřeným datům [79, 87].

$$genfit(vx, vy, vg, F) \quad (2.2)$$

kde:

- vx..... vektor změřené dráhy [m]
- vy..... vektor deformační síly [N]
- vg..... počáteční odhad parametru [-]
- F vstupní parametr obsahující fitovanou funkci a její parciální derivace podle všech parametr, viz (2.3) [-]

$$F(x, a) = \left\{ \begin{array}{l} f(x) \\ \frac{\partial f}{\partial a_1} \\ \frac{\partial f}{\partial a_2} \\ \frac{\partial f}{\partial a_3} \end{array} \right\} \quad (2.3)$$

kde:

x.....nezávislá proměnná [-]

a.....vektor parametrů skládající se ze tří složek a_1, a_2, a_3 [-]

K ověření přesnosti nalezené aproximace disponuje program PTC MathCAD [82] též dostatečnými prostředky. Lze použít obecně známý koeficient determinace, nebo-li v tomto případě druhou mocninu Pearsonova koeficientu mezi naměřenými a aproximovanými daty (2.4) [81].

$$r = corr(V_1, V_2) \quad (2.4)$$

kde:

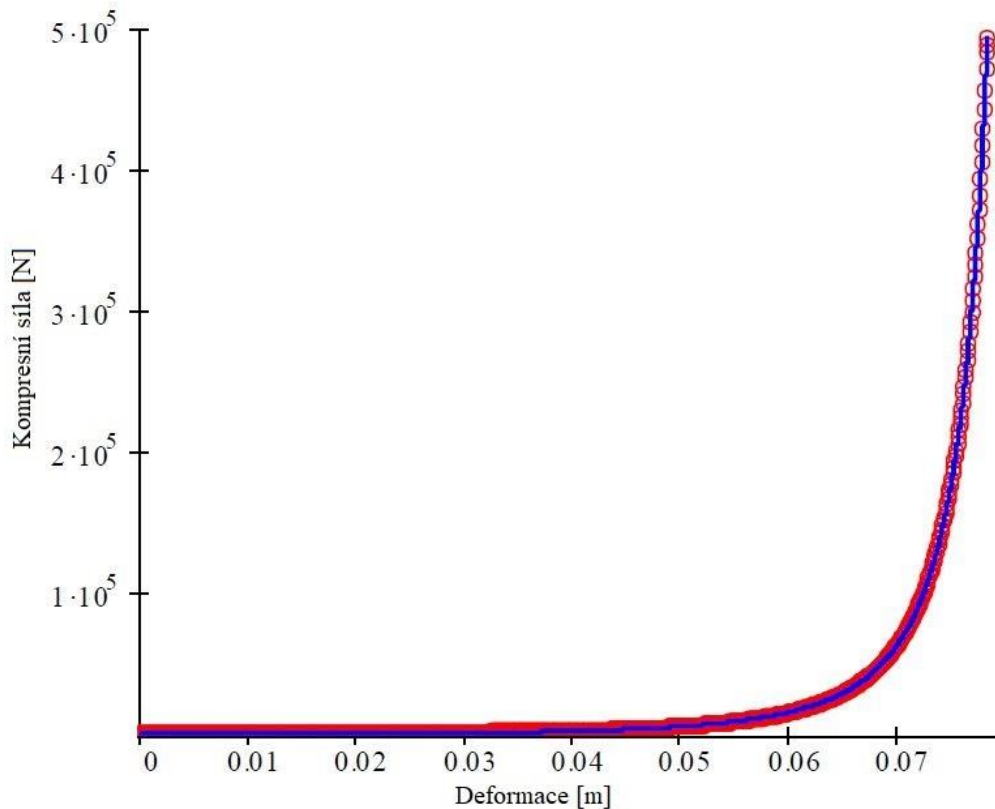
r.....Pearsonův koeficient [-]

corr.....funkce pro výpočet Pearsonova koeficientu mezi naměřenými a aproximovanými daty [-]

V_1naměřená data [-]

V_2aproximovaná data [-]

Naměřená i aproximovaná data lze v programu PTC MathCAD [82] graficky vykreslit. Za pomocí výše popsaných funkcí lze aproximovat naměřená data, která vyjadřují závislost působící síly na deformaci. Typický průběh je vyobrazen na obr. 5, kde červené body představují naměřené hodnoty z kompresního testu a modrá křivka byla získána pomocí popsaného vztahu (2.1) vypočtena aproximací.



Obrázek 5 Lisovací křivka

Je-li známa funkce, která dobře prokládá naměřené hodnoty, pak je výhodné stanovit deformační práci E_d pro daný zkoumaný vstupní lisovaný materiál pomocí určitého integrálu. Určitý integrál lze znázornit jako plochu pod danou křivkou. Matematicky je to poté možné zapsat podle vztahu (2.5) [21].

$$E_d(s) = \int_0^s f(x) dx \quad (2.5)$$

kde:

E_ddeformační práce [J]

$f(x)$nařítovaná funkce popisující závislost působící síly na deformaci [-]

smaximální dráha [m]

Studie, která se zabývala kompresními charakteristikami a energetickou náročností briketování kukuřičných stonků a skořápek arašídů (a jejich směsí v různých poměrech) ukázala, že použitý tlak ovlivňuje jak hustotu briket, tak i specifickou spotřebu energie

[49]. Měrná spotřeba energie pak kolísala od $6,6 \text{ MJ}\cdot\text{t}^{-1}$ až do $25,1 \text{ MJ}\cdot\text{t}^{-1}$. Pro tuto studii byl však využit laboratorní briketovací lis o průměru pístu 20 mm [49].

Jiné studie řeší závislost deformační energie a hustoty na výsledné produkce briket z biomasy (mimo jiné i dřevní hmoty), kde se ukazuje, že energetická náročnost se výrazně zvyšuje u vzorků s hustotou nad $1\,000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [23]. I na naší katedře byla tato problematika již částečně řešena v podobě disertační práce [21].

Z hlediska zaměření práce jsou však z tohoto pohledu relevantnější poznatky k energetické náročnosti briketování kovových odpadů.

Ve vědecké literatuře byla publikována studie, která se zabývala deformační energií a její závislosti na výsledné hustotě kovových briket, přičemž byly použity třísky ze soustružení a frézování mosazi, olova, oceli a litiny [12]. Celý experiment byl realizován na laboratorním briketovacím lisu, který měl průměr lisovací komory 40 mm. Studie mimo jiné prokázala, že minimální potřebný tlak pro zbriketování třísek z uvedeného kovového odpadu se pohybuje v rozmezí 110 MPa až 150 MPa [12].

Podobně tomu bylo v případě další studie, která se také zabývá briketováním třísek z třískového obrábění kovů [13]. Tato studie představuje i možnosti uplatnění kovových briket a řeší hustotu briket z pohledu síly nutné k jejich zhutnění.

2.4 Technologie přípravy materiálu pro briketování

Z provozního, technologického ale i ekonomického hlediska je nutné technologii briketování posuzovat v celém kontextu materiálového toku základního lisovaného materiálu od jeho pořízení či nákupu, přes zpracování až po výslednou briketu. V tomto kontextu je nutné zvažovat technologickou a ekonomickou vhodnost zpracování konkrétního vstupního lisovaného materiálu. Nemá-li totiž vstupní lisovaný materiál potřebné parametry (zejména požadovanou frakci a vlhkost, jak je popsáno v kapitole 3) je nezbytné materiál zpracovat. Za tím účelem je v případě biomasy využívána technologie drcení a štěpkování. Velmi významnou roli zde hraje sušení, které je energeticky náročné,

a proto je vždy nutné (z ekonomického úhlu pohledu) zvažovat vlhkost vstupního lisovaného materiálu. Některé materiály není nutno podrobovat sušení vůbec, jelikož ve své přirozené formě mají velmi malý podíl vody. Jedná se například o cihelný obrus nebo o odpad ze sádkartonových desek. V takovém případě odpadá úplně tato energeticky velmi náročná fáze.

Drtičem je rozuměno takové strojní zařízení, které zpracovává výchozí materiál do požadované formy produkce, a to působením pracovních orgánů stroje. Ty mohou mít podobu kladiv, břitů, drticích čelistí, hrotů nebo kuželových drticích ploch. Rozmělnění materiálu dochází drticích úderem, nárazem či štípáním. Výhodou drcení je fakt, že konstrukčními úpravami lze zajistit separaci materiálů (např. kovových částí při instalaci magnetických separátorů). Drtiče jsou primárně určeny ke zpracování dřevních zbytků, které mohou být potenciálně kontaminovány dalšími materiály, např. právě kovovými [26].

Štěpkovače jsou stroje, které pracují na principu rotačním či posuvným pohybem nožových břitů, které jsou umístěny na pracovním adapteru. Štěpkováním se dosahuje úpravy materiálu (nejčastěji dřevní hmoty), který je strojně nařezán, respektive naštěpán na částice, které mají zpravidla délku 3 - 50 mm. Takový produkt je nazýván štěpkou. Štěpku je možné přímo energicky využít spalováním nebo ji nadále zpracovávat jinými technologiemi, např. kompostováním nebo po další úpravě i briketováním [26].

Z hlediska energetické náročnosti je nejnáročnějším procesem sušení. Energetická náročnost sušení [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$] je vyjádřena jako množství energie potřebné k odpaření 1 kg vody z biomasy či jiného sušeného materiálu. Průběh sušení je reprezentován tzv. křivkou sušení. Křivku sušení je možno vyjádřit jako závislost obsahu vody v materiálu V [-] na čase t [min] v průběhu procesu sušení, tedy $V = V(t)$. Z křivky sušení je možno odvodit rychlost sušení N (2.6) [90].

$$N = \frac{dx_m}{dt} \quad (2.6)$$

kde:

Nrychlost sušení [s^{-1}]

x_mměrná vlhkost materiálu [$kg \cdot kg^{-1}$]

t čas [s]

Sušení lze v zásadě provádět přirozenou (tzv. pasivní cestou), která nevyžaduje sofistikované strojní vybavení (sušárny). Zásadní výhodou tohoto způsobu jsou relativní ekonomické benefity plynoucí z úspory vkládané energie. Nevýhodou je ovšem již zmíněná nepoměrně delší doba sušení a též i fakt, že tímto způsobem nelze dosáhnout vlhkosti nižší než vlhkost vzduchu v prostředí sušení [90].

Druhou alternativou je sušení prováděné tzv. aktivní cestou ve k tomuto účelu zkonstruovaných zařízeních (sušárnách). Podle principu činnosti a konstrukčního uspořádání lze sušárny rozdělit na:

- Pásové [55]
- Rourové [6]
- Bubnové [6]
- Komorové [60]

Výhodou toho postupu, je v porovnání s pasivní metodou, kratší doba sušení (v závislosti na dodané energii, použitém typu sušárny, vstupní a požadované výstupní vlhkosti sušeného materiálu). Nevýhody poté plynou z relativně vysokých pořizovacích a provozních nákladů strojních sušáren. Pro příklad lze uvést, že k výrobě jedné tuny pelet (pelety mají podobné nároky na vlhkost vstupní lisované suroviny jako je tomu u briket) je zapotřebí spálit cca 180 kg štěpky (s výhřevností $10,44 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) k vysušení vstupního lisovaného materiálu do 15% (za předpokladu vlhkosti vstupního materiálu do 40%) [27]. Ukazuje se, že vhodným řešením vedoucím ke snížení energetické náročnosti sušení je využití odpadního tepla z jiných provozů (např. elektráren, tepláren apod.) nebo právě spalováním biomasy (např. zmíněné štěpky v kotlích apod.). Toto řešení však není

univerzální a podmínkách České republiky ho nelze označit za běžně rozšířenou praxi. Jiné provedené vědecké studie na dřevní hmotě (v rámci české technické praxe nejpoužívanější materiál pro technologii briketování) ukazují, že doba sušení je prakticky nezávislá na typu použité dřeviny. Je však silně závislá na použité metodě sušení a počáteční (i požadované) vlhkosti [76]. S tímto faktem jsou spojeny též ekonomické konsekvence.

3 TECHNOLOGICKÉ VLASTNOSTI BRIKET A METODY JEJICH POSUZOVÁNÍ

Briketování je technologie energicky značně náročná. Spotřeba energie při výrobě briket je závislá na celé řadě komplexních faktorů. Zásadní roli hraje konstrukce briketovacího lisu a s tím spojené použité tlaky v lisovací komoře. Velmi důležitou roli hraje i použitý základní lisovaný materiál a jeho vlastnosti (zejména vlhkost jeho frakce). Minoritně lze zmínit další faktory jako jsou atmosférické vlivy (např. relativní vlhkost vzduchu či jeho teplota), či technologická kázeň při přípravě základního lisovaného materiálu i při provozu briketovacího lisu samotného (pravidelná údržba a hospodárné nastavení). Z praktického hlediska průmyslové praxe je však klíčová kvalita výsledné produkce briket, respektive její mechanické vlastnosti.

Zajištění mechanické odolnosti briket je nezbytné nejen z hlediska jejich přepravy a skladování, ale také z funkčního hlediska. Briketa o vyšší hustotě je mechanicky odolnější a též i energeticky lépe využitelná. Proto je nutné výrobním procesem, i vhodným výběrem a přípravou vstupního lisovaného materiálu, zajistit dostatečné a ekonomicky přijatelné mechanické vlastnosti briket. Mechanické vlastnosti briket jsou zkoušeny předepsaným způsobem [33], případně dalšími zkouškami [13].

Za všeobecně uznávanou a velmi rozšířenou zkoušku mechanické odolnosti briket je považována mechanická zkouška briket podle normy ČSN EN 17831 [33]. Tuto normu lze vhodně doplnit dalšími zkouškami, které výsledky zpřesní a dají tak kompletní obraz o vlastnostech zkoumaných briket, a to nejen z mechanického hlediska. Tyto zkoušky však nejsou vesměs normalizované a jsou popsány pouze v příslušné vědecké literatuře. Je nutné k nim proto přistupovat jako k vhodnému doplnění výše zmíněné normy, které ovšem často může být pro relevantní výsledky víc než žádoucí. Za všechny lze jmenovat „Zkoušku pevnosti briket na rozštěp“. Tato zkouška byla vyvinuta na naší katedře [13, 14].

Z pohledu kvality výsledné brikety mají klíčový vliv zejména následující faktory:

3.1 Vlhkost vstupního lisovaného materiálu

Vlivem vyšší vlhkosti vstupního materiálu (typicky vlhkost nad 20 %) je velmi obtížné vyrobit kompaktní briketu. Vlhkost též významným způsobem ovlivňuje mechanické vlastnosti a hustotu výsledné produkce brikety. Vliv vlhkosti na rozměr brikety je naopak jen nepřímo závislou veličinou. Jako optimální se ukazuje vlhkost vstupního materiálu v cca v intervalu 4 % - 18 %, přičemž z hlediska mechanických vlastností a hustoty nejlépe vyhoví briketa s vlhkostí vstupního materiálu do 12 % [15]. Vědecké experimenty provedené na stoncích bavlny a na rýžové slámě prokázaly, že zvýšení obsahu vlhkosti těchto vstupních briketovaných materiálů mělo vliv na snížení kompresního napětí a zvýšení pružnosti výsledné produkce briket [4].

Provedené vědecké studie na materiálech na bázi dřeva, respektive štěpky břízy s vlhkostí od 5,0 % do 16,7 %, prokázaly, že kvalita výsledné produkce briket je závislá právě na vlhkosti vstupního briketovaného materiálu, jelikož při změně vlhkosti značně kolísá [18].

V neposlední řadě je nutno zmínit, že samotným zpracováním základního vstupního materiálu technologií briketování dojde ke snížení vlhkosti ve výsledné briketě, což má následně velký vliv na případnou deponii výsledné produkce briket [19, 24, 77].

3.2 Základní materiál

Na výrobu briket má velmi podstatný vliv též fyzikální povaha a frakce základního lisovaného materiálu.

Zvolená velikost frakce vstupního lisovaného materiálu má vliv na distribuci jednotlivých částí ve výsledné briketě, kde jsou statisticky prokázány významné rozdíly v distribuci a koncentraci těchto částic. Větší částice mají obecnou tendenci se kumulovat na horní straně briket, menší naopak na spodní straně lisované brikety (ve směru pohybu tvořící se brikety lisovací komorou). Významnou roli hraje frakce vstupního materiálu i

v samotném procesu zhutňování a následném lisování v lisovací komoře briketovacího lisu [31].

Kromě distribuce částic během samotného briketování má též velikost částí relativně velký vliv na výhřevnost výsledné produkce briket, kde studie ukazují, že výhřevnost se zvyšuje se zvyšující se velikostí částic [8]. Některé výzkumy též ukazují, že optimální volba velikosti frakce v kombinaci s nasazením technologie briketování v optimálním místě a s tím spojeným zvoleným vhodným tvarem a velikostí produkovaných briket, může dojít k relativně efektivnějšímu spalování a též k menší energetické zátěži při přípravě či samotné výrobě vstupního lisovaného materiálu k briketovací lis [84].

3.3 Hustota brikety

Hustota výsledné brikety je z hlediska kvalitativního jedním z klíčových parametrů. Na výslednou hustotu má vliv kromě výše zmiňované vlhkosti a frakce vstupního materiálu, také tlak v lisovací komoře briketovacího lisu. Se zvyšujícím se tlakem v lisovací komoře se kvalita briket zvyšuje [5, 102]. Vědecké studie též pozorovaly, že hustota briket se zvyšuje se zvyšujícím se poměrem pojiva, a to v závislosti právě na tlaku v lisovací komoře [5].

Co se týče kovových briket, tam je minimální hodnota hustoty předepsána v příslušných normách. Z hlediska této práce jsou klíčové zejména normy ČSN 42 0030, kde je minimální hustota předepsána na $4\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, přičemž se z celkového objemu připouští 1% oleje [34]. U neželezných kovů je situace složitější. Norma ČSN 42 1331 [35] totiž minimální hustotu brikety nestanovuje. Ve vědecké literatuře je hustota stanovena na základě předpokladu, že objemová hustota třísky má stejnou objemovou hustotu jako kompaktní materiál [12]. Vzhledem k údajům uvedených v normě ČSN 42 0030 [34] a objemové hustotě oceli a litiny, je možné prohlásit, že briketa vytvořená z těchto materiálů musí mít objemovou hustotu v rozmezí 0,57 až 0,66 objemové hustoty kompaktního materiálu. Při aplikaci stejné logiky na odpady z hliníkových slitin a brikety

z nich vyrobené dostáváme, že hustota briкеты by se měla pohybovat kolem $1\,600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [12].

Na základě výše uvedených informací, lze tedy jednoznačně konstatovat, že proces výroby briкеты je procesem komplexním a do výroby kvalitativně přijatelné briкеты vstupuje celá řada faktorů, které je potřeba zohlednit.

3.4 Mechanická zkouška briket

Z hlediska nekovových materiálů je obecně uznávaná norma ČSN EN ISO 17831-2 [33]. Jedná se zkoušku mechanické odolnosti briket, která je velmi rozšířená a též poměrně jednoduchá jak na konstrukci zkušebního zařízení, tak na provedení a vyhodnocení zkoušky. Její nevýhodou ovšem může být fakt, že nepopisuje kvalitu jednotlivých zkoušených briket, nýbrž hodnotí celý zkoušený soubor briket. To může mít za důsledek, že poměrně malé procento nevyhovujících briket (v krajním případě i jediná briкета) ve zkoušeném souboru ovlivní významně celý zkoušený soubor.

Princip zkoušky je pak v zásadě jednoduchý. Zkouška samotná probíhá tak, že se do pracovního prostoru zkušebního zařízení (obr. 6) vloží zkušební vzorek podle typu briкеты (typ A, B nebo C), který se určí jako průměr hmotnosti 15 briket (s tolerancí 0,1 kg). Zkušební zařízení se následně uvede v chod otáčením bubnu rychlostí $21\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ (s tolerancí $0,1\text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$) a touto rychlostí se otáčí 5 minut nebo do dosažení 105 otáček (s tolerancí $\pm 0,5$ otáček). Následně se zkušební vzorek vyjme z bubnu a přeseje se přes síto s rozměry ekvivalentními $2/3$ průměru zkoušené jedné briкеты (ne však větším než 45 mm). Mechanická odolnost (DU) je pak zjištěna ze vztahu (3.1) [33].

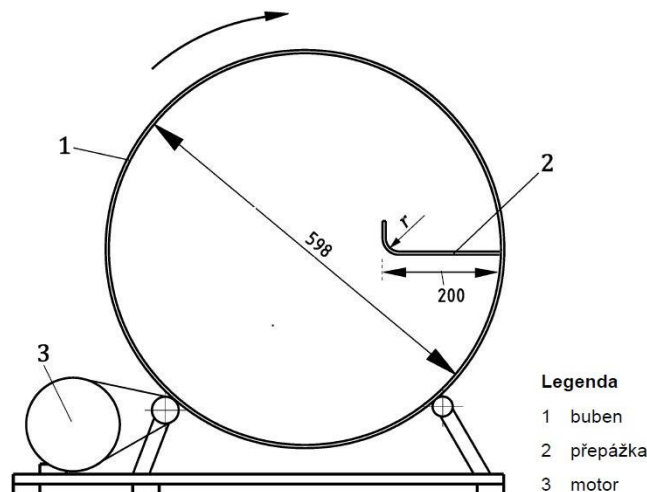
$$DU = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100 \quad (3.1)$$

kde:

DU mechanická odolnost [%]

m_E hmotnost přesátých briket před otáčením v bubnu [g]

m_A hmotnost přesátých briket po otáčení v bubnu [-]



Obrázek 6 Příklad na zkoušení briket - buben [33]

Pro úplnost je vhodné zmínit, že tento přístroj (obr. 6) je na naší katedře k dispozici [16]. To představuje velkou výhodu a časovou úsporu z pohledu vyhodnocování vědeckých experimentů.

3.5 Zkouška pevnosti briket na rozštěp

Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, zkouška pevnosti briket rozštěpem není zkouškou normovanou. Tato zkouška byla vyvinuta na naší katedře a klade si za cíl vhodně doplnit mechanickou zkoušku briket podle příslušných norem [33]. Zkouška podrobuje zkoušení každou jednotlivou briketu, čím lze odhalit nekvalitní kusy produkce, které mohou nepříznivě ovlivnit zkoušený celek při hromadné zkoušce podle výše popsané normy [13, 14].

Zkouška samotná se na naší katedře provádí na univerzálním zkušebním stroji ZDM 5, výrobce WPM, Německo. Stroj pracuje s maximální rychlostí posuvu $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a dovede vyvinout maximální sílu $F_{\text{max}} = 50 \text{ kN}$ [22]. Na katedře je též k dispozici univerzální zkušební stroj LabTest 5.50ST od společnosti LaborTech, s.r.o. [59], který je plně číselně řízen a řídicí software, který je ke stroji dodáván, umožňuje též záznam a uložení naměřených dat, jakožto i jejich grafickou interpretaci.

Princip a provedení zkoušky je popsán v dostupné odborné literatuře [22]. Zkouška spočívá v tom, že je mezi spodní a horní čelist (obr. 7) umístěna zkoušená briketa. Následně se stroj uvede v chod rychlostí posuvu čelistí zpravidla $6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Na zkoušenou briketu je takto vyvíjena síla, která se postupně navyšuje až dojde porušení/rozštěpu brikety. Poté se odečte maximální působící síla v axiálním směru. Takto zjištěná síla je přepočítána na jednotku délky brikety. Nestejná délka brikety je způsobena samotným výrobním procesem. Pro relevantnost zkoušky a možnosti srovnání výsledků je toto nutné zohlednit [13, 22].

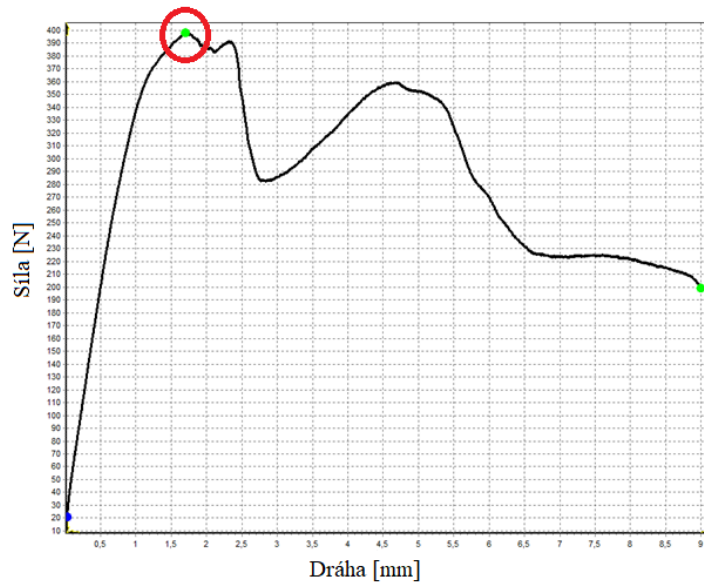


Obrázek 7 Ilustrační uchycení zkoušené brikety ve stroji LabTest 5.50ST - před zkouškou

Průběh zkoušky lze vyjádřit jako funkční závislost síly na dráze a lze ji vyjádřit graficky. Průběh těchto zkoušek je v zásadě typický pro daný zkoušený základní materiál, ze kterého byla briketa vyrobena.

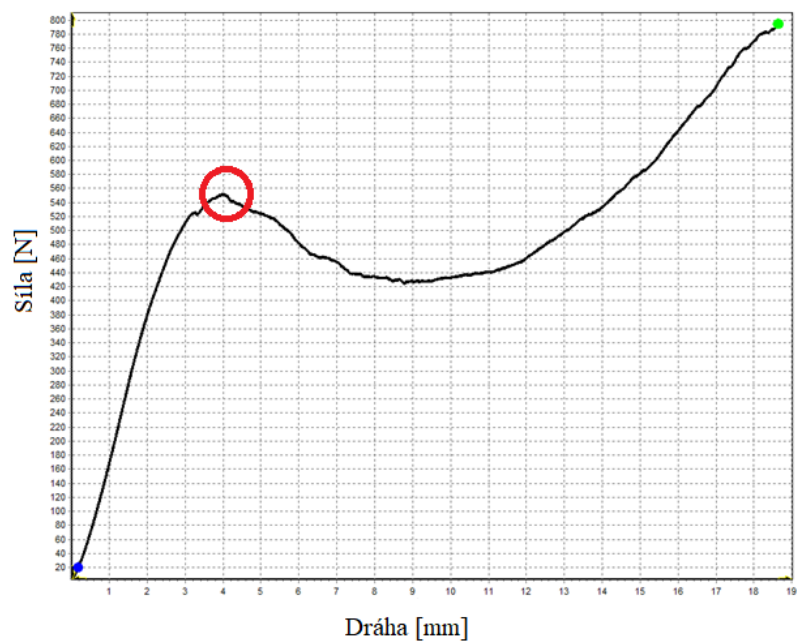
Jako ilustrativní příklad slouží grafický průběh pro brikety z dřevěného prachu (směs dub, buk, smrk), který je vyobrazen na obr. 8. Tento základní vstupní briketovaný materiál byl zkoumán v experimentální části této práce - grafický průběh byl získán provedením zkoušky briket na rozštěp na zmíněném stroji LabTest 5.50ST. Je vidno, že síla F [N], která je vyvíjena na zkoušenou briketu, v tomto případě relativně prudce roste až dosáhne své maximální hodnoty (peak je na obr. 8 zvýrazněn červeným kruhem). Následně dochází k mechanickému porušení brikety, což se projevuje snížením působící síly, která

následně začne opět stoupat. V tomto okamžiku však již zkoušená briketa není homogenní, nadále působící síla F [N] tak působí její další desintegraci.



Obrázek 8 Diagram pevnosti briket na rozštěp – dřevní hmota (prach)

Ilustrativní grafický výstup zkoušky briket na rozštěp dřevěných hoblin (směs dub, buk, smrk) je poté na obr. 9. Tento základní vstupní materiál byl rovněž použit v experimentální části práce. Měření bylo i v tomto případě realizováno na stroji LabTest 5.50ST. Průběh působící síly je zde až do svého peaku (označený červeným kruhem) principiálně totožný s výše popsáním typickým výsledkem zkoušky pevnosti briket na rozštěp dřevěného prachu. Po dosažení tohoto bodu se však průběh křivky dramaticky mění, a to i navzdory faktu, že se jedná o stejnou výchozí surovinu, která byla vyrobena za stejných technologických podmínek na stejném briketovacím lisu. Toto chování lze tedy v zásadě zdůvodnit rozdílnou velikostí frakce vstupního lisovaného materiálu (hobliny vs. prach) tak, jak to bylo popsáno v podkapitole 3.2, která pojednává i o vlivu frakce vstupního lisovaného materiálu na výrobu briket.

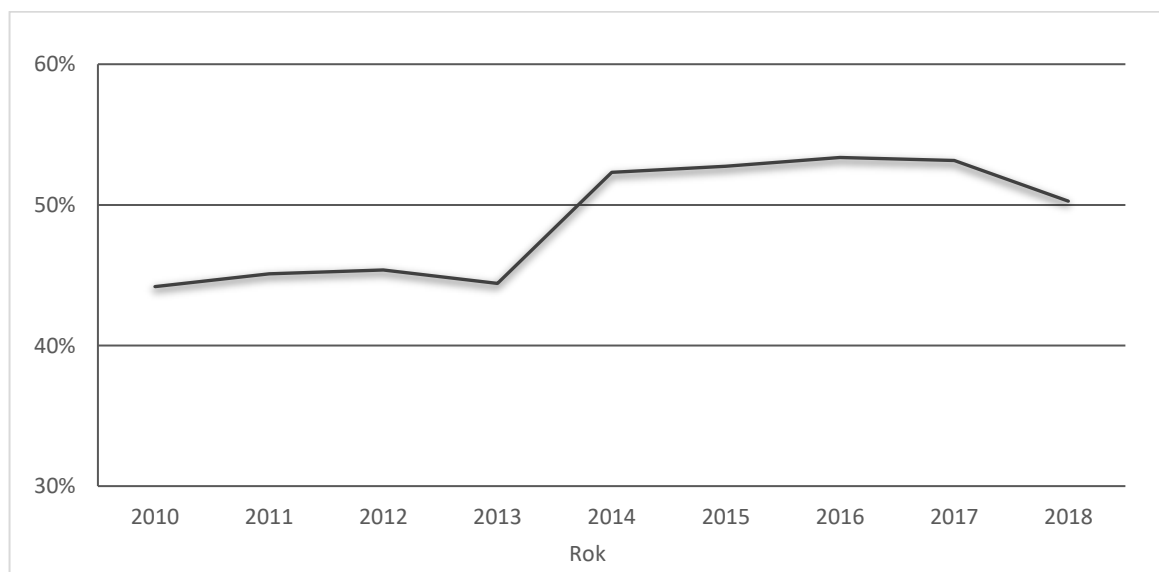


Obrázek 9 Diagram pevnosti briket na rozštěp – dřevní hmota (hoblina)

V praktické, respektive experimentální, části práce byla tato zkouška realizována pouze doplňkově a sloužila čistě k ověření výsledků výše popsaných normovaných zkoušek briket.

4 STAVEBNÍ A DEMOLIČNÍ ODPAD

Stavební a demoliční odpad jako celek vzniká při stavebních nebo demoličních činnostech. Jeho zpracování nebo další sekundární využití je obtížné. Jedná se přitom o problém poměrně palčivý, jelikož jen v roce 2017 se pouze v České republice vyprodukovalo bez mála 18 000 000 tun stavebního a demoličního odpadu, kdežto v roce 2018 (poslední souhrnně uveřejněná data za celou ČR) to bylo již cca 20 800 000 t [70]. I při takto velkém čísle produkce však recyklace představuje „pouze“ cca 20 - 30 % z celkového objemu produkce. 40 až 50 % celkového produkovaného objemu je pak tzv. „ukládáno na terén“ [70, 88]. Procentuální podíl využití stavebního a demoličního odpadu (metodou ukládání na terén - N1) vztažený k celkové produkci stavebního a demoličního odpadu na celém území ČR v daném roce je chycena na obr. 10 [70]. Z uvedeného průběhu je dobře patrné, jaký vliv má ekonomicko-stavební kondice státu. Po roce 2010 ve stavebnictví ještě doznívala ekonomická krize, která se projevovala nižší stavební aktivitou. Trend se v roce 2013 zvrátil a trvá prakticky až do roku 2018 (je zde předpoklad, že tomu tak bude i v roce 2019). V roce 2020 lze, vzhledem nastupující ekonomické recesy způsobené pandemií COVID-19, očekávat nastartování trendu klesající tendence. Je však nutné sledovat relevantní data poskytované např. i Českým statistickým úřadem [29] v delším časovém úseku, jelikož produkce stavebního a demoličního odpadu se může značně měnit v závislosti právě na popsaném ekonomickém cyklu.

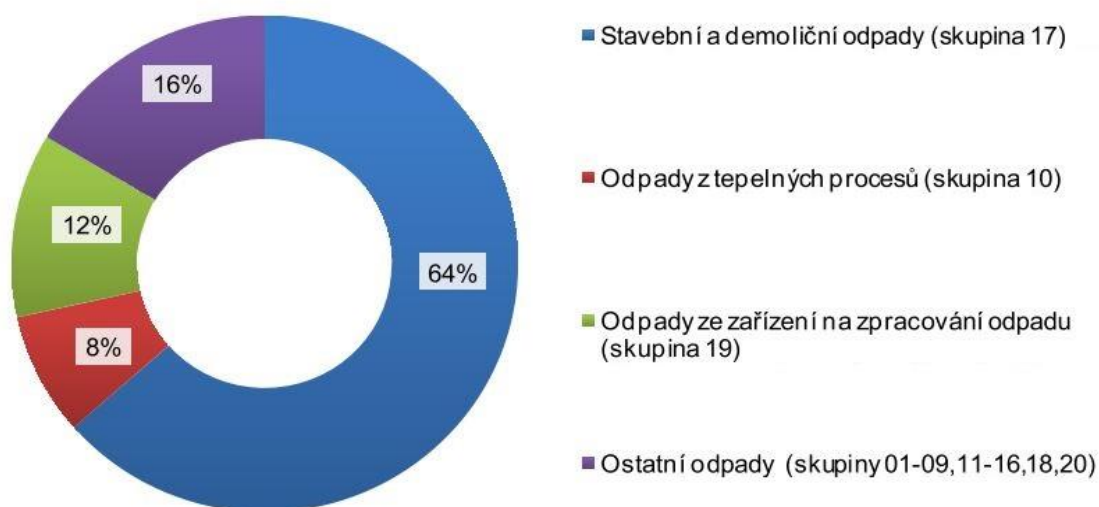


Obrázek 10 Vývoj nakládáním se SDO (2010-2018), využití na terén NI [70]

K dokreslení celého kontextu je nutné si též uvědomit, že stavební a demoliční odpad představoval např. v roce 2016 celých 39 % vyprodukovaného odpadu v České republice [20]. V roce 2018 se tento podíl prakticky nezměnil, jelikož byl na úrovni 41 % [29].

Co se týče právního rámce České republiky, a s tím související klasifikací odpadů, tak platí, že stavební a demoliční odpad (včetně vytěžené zeminy z kontaminovaných míst) je zařazeno do skupiny 17 v katalogu odpadů [71] - vyhlášce Ministerstva životního prostředí České republiky, která je vydána na základě zákona č. 185/2001 Sb. [99].

Poměrné zastoupení produkce jednotlivých katalogizovaných odpadů v rámci podnikové produkce ukazuje obr. 11. Je dobře patrné, že odpady skupiny 17 (stavební a demoliční odpady) jsou zastoupeny celkem 64 % [30].



Obrázek 11 Produkce podnikových odpadů v roce 2016 [30]

Z pohledu stavební praxe je jedním z velmi oblíbených konstrukčních materiálů sádrokarton, respektive sádrokartonové desky v celém širokém spektru tak, jak je definuje ČSN EN 520 (72 3611) [36]. Je to dáno zejména jeho relativně příznivou pořizovací cenou, snadnou a rychlou montáží a též i pro jeho dobré izolační a protipožární vlastností. Proto je tento materiál hojně využíván např. v kancelářských komplexech, kde je vyšší frekvence

rekonstrukčních prací. To je také jeden z důvodů relativně vysoké produkce odpadu na této bázi. Například jen v roce 2016 bylo vyprodukováno 11 837 t odpadu v podkategorii 17 08 (stavební materiály na bázi sádry) [30].

Technologie briketování má při vhodném nasazení potenciál zvýšit podíl recyklovaného stavebního a demoličního odpadu. Briketováním vhodného druhu stavebního a demoličního odpadu by mohlo dojít nejen k úspoře v dopravě (zmenšení objemové hmotnosti) a tím k snížení prašnosti v okolí stavenišť. Nalezením vhodného uplatnění pro výsledné brikety (jako sekundární suroviny) může mít dokonce významný přesah ekonomicko-ekologický.

V současné době jsou běžně používány brikety, vyrobené z odpadů z hutních polotovarů, které vznikají zejména při strojním obrábění kovů. To má v zásadě dva důvody. Za prvé účelnější likvidace těchto odpadů, která může být za určitých okolností jinak problematická. Za druhé zhutnění do kompaktního tvaru může přispět k efektivnějšímu využití prvků v odpadu obsažených [47]. Dále jsou běžně používány brikety z koksového prachu (vhodné pro spalování v domácnostech, teplárnách, případně jako náhrada antracitu v hutnictví) [7].

4.1 Zpracování odpadu z broušení při výrobě cihel

Cihelným obrusem je míněn technologický odpad, který vzniká při výrobě cihel a jiných výrobků systému přesného zdění, v cihelnách při broušení. V současné době je částečně recyklován zpět do výroby cihel nebo je z části využíván jako náhražka portlandského cementu ve vibrolisovaných směsích, které se používají k výrobě betonářských produktů (jako jsou například dlaždice, obrubníky, opěrné stěny, terasy apod.). Důvodem vzniku tohoto odpadu (cihelného obrusu) je potřeba zajistit přesnost rozměrů cihel v rámci příslušných tolerancí ve vazbě k zajištění přesnosti následného zdění a tím výsledné geometrie zděných funkčních ploch. Při broušení cihel a tvárnic na požadované rozměry vzniká cihelný obrus, jehož množství je přímo úměrné odebíranému materiálu, jedná se zpravidla o cca 2 až 4 % z objemu broušeného polotovaru, v závislosti na tvaru výrobku a použitých technologických specifikacích, z čehož plyne, že se nejedná

o množství úplně zanedbatelné. Z principu technologie broušení cihelný obrus není odpadem homogenním. Kromě samotného materiálu broušeného polotovaru se do něj dostávají ještě residua brousícího kotouče nebo odlomené zbytky broušených polotovarů, a to v případě neshodných výrobků. Cihelný obrus je díky svým fyzikálním vlastnostem i povaze obtížně skladovatelný, či transportovatelný. Cihelný obrus je odsávacím zařízením transportován z místa jeho vzniku, tedy z broušené plochy zpravidla z bezpečnostních důvodů uzavřené v samostatném boxu či místnosti. Odkud následně putuje to sil (obr. 12), jedná se o snímek z cihelny v lokalitě Hevlín, kde se nachází provoz společnosti HELUZ cihlářský průmysl, v.o.s. [63]), ze kterých je přesypáván do speciálních k tomu určených přepravních kontejnerů. Se zmíněnou firmou byla v rámci řešení této disertační práce navázána spolupráce v oblasti nalezení technického řešení, které mělo za cíl navrhnout a experimentálně ověřit možnosti aplikace technologie briketování na zpracování cihelného obrusu, který je díky popsaným důvodům ve výrobě problematický. Výstupy této spolupráce jsou shrnuty v prakticko-experimentální části práce.



Obrázek 12 Silo s transportními kontejnery na cihelný obrus

Cihelný obrus, který není výše popsaným způsobem recyklován, je skládkován jako nevyužitý výrobní odpad. Vzhledem k tomu, že se jedná o velice sypký materiál (s velikostí zrna od cca 0,002 mm do cca 0,1 mm) je manipulace a transport poměrně

obtížná a tím ekonomicky nákladná. Díky své vysoké prašnosti je také problematický z hlediska bezpečnosti práce [63].

5 EKONOMICKÉ HLEDISKO PROVOZU BRIKETOVACÍHO LISU

Kromě energetické náročnosti, v podobě zejména spotřeby elektrické energie briketovacího lisu, je nutné se na provoz briketovacího lisu z ekonomického úhlu pohledu dívat jako na celek. Ekonomické otázky spojené s výrobou provozu zařízení na výrobu pelet a briket byly v rámci naší katedry již částečně řešeny v podobě disertační práce [56].

5.1 Vstupní briketovaný materiál

Klíčovou otázkou této technologie z ekonomického hlediska je právě i volba vhodného vstupního materiálu, který je možné využít k briketování. Jako nejehospodárnější, nejekologičtější a ekonomicky nejvýhodnější je možnost instalovat vhodný typ briketovací linky přímo u zdroje vzniku takového materiálu/odpadu. Studie provedené v některých velkých zemích (jako je např. Indie) dokazují, že z energetického úhlu pohledu je nejvýhodnější umístění briketovací linky přímo u zdroje biomasy (či jiných materiálů vhodných pro zpracování technologií briketování). Při vyšších dopravních vzdálenostech se již nemusí technologie briketování jevit jako optimální [83]. Praxe ukazuje, že podobná situace je i v průmyslově rozvinutých zemích.

V podmínkách České republiky se jedná zejména o truhlářské provozy či jiné dřevozpracující závody, případně velké servisní organizace, které řeší údržbu zeleně nebo agrární podniky, které tímto způsobem zpracovávají biomasu nebo jiný zemědělský odpad.

Dále je nutno v tomto kontextu uvážit samotnou přípravu vstupního briketovaného materiálu. Zejména je nutno vzít v úvahu vlhkost vstupního materiálu, která tvoří z ekonomického úhlu pohledu značný náklad. Je-li vlhkost vstupního materiálu nevyhovující je nutno ji upravit sušením (viz podkapitola 2.4), kterýžto proces je v závislosti na použité technologii sušení mimořádně energeticky náročný a tím pádem i nákladný. Z ekonomického pohledu je tedy vhodnější využívat materiály, které mají pro briketování optimální vlhkost a není nutné v tomto smyslu jejich zpracování. Takový

materiály je mimo jiné kovový odpad (třísky) či některé druhy stavebního a demoličního odpadu (např. cihelný obrus či sádrokartonový demoliční odpad).

Z hlediska optimálního využití strojního času briketovací linky (a optimalizaci ekonomiky provozu výrobního stroje) je však vhodné doplňkově využívat i jiných zdrojů k zajištění optimálního množství surovin pro výrobní stroj. Jako k tomuto účelu potenciálně výhodné prostředí se jeví možnost využití komoditních burz. Podle Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky jsou v současnosti na území České republiky funkční čtyři komoditní burzy [69]. Odpady, které by byly potenciálně vhodné ke zpracování technologií briketování, budou patrně součástí portfolia speciální burzy odpadů v rámci Českomoravské komoditní burzy Kladno (ČMKB) [28]. Obchodování na této burze odpadů při ČMKB však dosud není spuštěno. Na základě osobního zjištění v sídle burzy i telefonického kontaktu s odpovědnými pracovníky burzy, není v současném okamžiku stanoven datum otevření této burzy.

Zcela odlišná je situace na světovém trhu. Tam se jako potenciálně nejvhodnější pro tyto účely jeví obchodování na komoditních burzách s kovovým šrotem. Jedna z nejvýznamnějších komoditních burz, která má ve svém portfoliu kovový šrot, je Londýnská burza kovů (London Metal Exchange, LME [65]). Cena šrotu je tvořena jednak celosvětovou úrovní nabídky a poptávky po tomto druhu kovového odpadu/druhotné suroviny, ale do značné míry je ovlivněna i globálními ekonomickými aspekty. V této souvislosti je nutno zmínit v současné době se stupňující „obchodní válku“ mezi Spojenými státy americkými a Čínskou lidovou republikou. Další velmi aktuální otázkou je vliv pandemie viru COVID 19, která v plné síle v prvním pololetí roku 2020 udeřila na nejen na ekonomiku evropskou, ale i světovou. Tyto aspekty ve svém součtu pak mají nemalý podíl na tom, že trh s kovovým šrotem je poměrně volatilní [65].

Co se týče právního rámce nakládání s kovovými odpady v České republice a jeho pohledu na kovové brikety, tam je situace ošetřena v rámci Vyhlášky č. 93/2016 Sb. Ministerstva zemědělství České republiky (katalog odpadů) [71], která je vydána na základě zákona č. 185/2001 Sb. [99]. V této souvislosti je nutné zohlednit, zda-li se na

brikety z kovových odpadů pohlíží v kontextu výrobního programu daného podniku jako na odpad z jeho výroby plynoucí nebo se jedná o čistě zpracovatelsky orientovanou náplň činnosti. V takovém případě je možno brikety z kovových odpadů zařadit v rámci zmíněného katalogu odpadů do skupiny 10 „Odpady z tepelných procesů“ a podskupiny 10 02 „Odpady z průmyslu železa a oceli“. Situaci je však nutno posuzovat z pohledu výrobního programu konkrétního podniku.

5.1.1 Vliv nových technologií

Nástup nových technologií otevřel zcela nové možnosti v této oblasti. Tyto možnosti, na rozdíl od obchodování s odpadem na světových burzách, mohou otevřít nové pole ke zpracování odpadů a s jeho obchodováním jako vstupní surovinou např. pro technologii briketování, i pro menší, a dokonce i malé či komunitní, zpracovatele odpadů. Na českém internetovém trhu se objevují nové platformy (online burzy druhotných surovin), které umožňují obchodování odpadů a druhotných surovin. Tyto burzy mají před sebou jistě bouřlivý vývoj. Cena je zde tvořena na základě nabídky a poptávky dané suroviny nebo „odpadu“. Za všechny je možné jmenovat projekt CYRKL [42], který se slibně rozvíjí a to i přesto, že je relativně mladý. Pro lepší představu lze uvést interní data zmíněné společnosti, která byla autorovi práce laskavě poskytnuta. Online odpadové tržiště CYRKL [42] mělo k 1.3.2020 celkem 600 registrovaných uživatelů (rozuměno právnických osob, které jsou podle platné legislativy ČR oprávněny nakládat či obchodovat s odpady). 131 registrovaných uživatelů projevilo v posledním kalendářním roce zájem o aukce se stavebním a demoličním odpadem. Celkem byl za posledních dvanáct měsíců nabízen stavební a demoliční odpad o celkovém objemu cca 489 000 t, přičemž průměrná výše jedné poptávky se pohybovala kolem zhruba 500 t.

Tento způsob obchodování s odpady v sobě nese prvky cirkulární ekonomiky a je nesporné, že používání nových technologií v obchodování s odpady s sebou přinese celou řadu výhod ekonomických, ekologických ale i provozních.

6 CÍL PRÁCE

Cíle disertační práce byly zvoleny s ohledem na současný stav problematiky, který byl zjištěn jak z dostupné vědecké literatury, tak z kontaktu s technickou praxí. Z těchto zdrojů bylo zejména zjištěno, že

- Měření spotřeby elektrické energie pístového briketovacího lisu jako takového (bez kontextu výrobní linky), nebylo dosud s materiály typickými pro českou průmyslovou praxi řešeno. Dosud provedená měření se týkala šnekového hydraulického lisu či postihovala energetickou náročnost jako celek (tzn. vč. sušení či celý strojní komplex zpracovatelské linky s více briketovacími lisy). Z pohledu zmíněného kontaktu s technickou praxí je však o takové informace zájem.
- Teplota přehřevu elektrického topného tělesa briketovacího lisu má významný vliv na spotřebu elektrické energie. Relevantní informační prameny, které by prokazovaly statisticky významnou závislost teploty přehřevu na kvalitativní vlastnosti briket (tzn. zejména mechanické vlastnosti briket a jejich vlhkost) se v dostupných zdrojích nepodařilo dohledat.
- Briketování kovových třísek (z litiny, oceli a hliníkových slitin) z pohledu energetické náročnosti zjištěné na laboratorním briketovacím lisu s průměrem lisovací komory 40 mm a komparací hustoty vzorků briket s průmyslově vyrobenými briketami z tohoto odpadu se nepodařilo dohledat.
- Zpracování stavebního a demoličního odpadu technologií briketování a návaznost na energetickou náročnost je věcí zcela novou - podobné relevantní experimenty se nepodařilo v dostupných zdrojích dohledat.

Cíle byly vytýčeny tak, aby vhodně doplnily, případně rozšířily, stav poznání v daném vědním oboru a jejich dosažení bylo realizovatelné s ohledem na předepsanou délku doktorského studijního programu, jakožto i na technické, organizační, materiální a finanční možnosti. Obecným cílem disertační práce je provést teoreticko-praktický rozbor a realizovat laboratorní a provozní měření s cílem zhodnotit a optimalizovat energetickou a ekonomickou náročnost technologie briketování biomasy, papírových skartů a kovového

šrotu v ekonomickém pohledu produkce briket, jakožto obnovitelné, ekologicky a ekonomicky udržitelné, technologie zpracování odpadu. Byly stanoveny hlavní a dílčí cíle této disertační práce:

6.1 První cíl

Prvním cílem práce bylo ekonomicky zhodnotit provoz briketovacího lisu s důrazem na spotřebu elektrické energie v závislosti na vstupním briketovaném materiálu.

6.1.1 Dílčí cíl prvního cíle

Experimentálně zhodnotit spotřebu mechanické práce při výrobě briket z kovového odpadu (ocel, litina, slitiny hliníku) v korelaci s průmyslově vyráběnými briketami z tohoto odpadu.

6.2 Druhý cíl

Experimentálně stanovit vliv teploty elektrického přívěvu lisovací komory na kvalitu výsledné brikety (z vytipovaných vstupních lisovaných materiálů) a na základě laboratorních a provozních měření stanovit maximální teplotu elektrického topného tělesa pístového a šnekového briketovacího lisu v korelaci s mechanickými vlastnostmi výsledné vyprodukované brikety (z vytipovaných vstupních lisovaných materiálů).

6.3 Třetí cíl

Identifikovat vhodné materiály stavebního charakteru a navrhnout možnost jejich zpracování technologií briketování s ohledem na jejich možné ekonomicko-technologické uplatnění v praxi. Posoudit technické podmínky pro jejich zpracování, ty potom následně laboratorně či provozně ověřit.

7 MATERIÁL A METODY

Podle stanovených cílů disertační práce (zformulovaných v kapitole 6) byly zvoleny vhodné zkoumané materiály, které se následně podrobily laboratornímu či provoznímu měření. Získaná naměřená data se následně zpracovala pomocí statistických metod tak, aby bylo možno z měření vyvodit statisticky podložené obecné závěry nezbytné k naplnění cílů této disertační práce.

7.1 Použité materiály

Postup výběru a zpracování použitých materiálů lze shrnout do čtyřech fází:

7.1.1 Vytipování a sběr vhodných materiálů

Klíčovou částí, z hlediska laboratorního a provozního měření, byl výběr a vhodná příprava zkoumaných materiálů. Jednalo se o komplexní rozhodovací proces, který bral v úvahu celou škálu vstupních parametrů od informací z vědecké literatury, přes požadavky technické praxe, až po dostupnost a vhodnost daného vybraného materiálu v závislosti na technických možnostech jeho zpracování. Pro rozhodovací proces byla stanovena následující klíčová kritéria:

- Materiál je odpadem v primární výrobě.
- Odpad je jinými technologiemi obtížně či nevýhodně zpracovatelný, nebo je jinak nezpracovatelný.
- Vhodnost uplatnění technologii briketování.
- Následné uplatnění briket (výroba tepelné energie, transformace do podoby nových materiálů, zmenšení objemu apod.).

Po identifikaci vhodných materiálů následovala fáze jejich sběru. Jako zdroje materiálů byly využity jak interní (tzn. areál České zemědělské univerzity v Praze), tak externí (tzn. soukromé podnikatelské subjekty) kanály.

7.1.2 Příprava materiálů

Po vytipování a sběru vhodných vzorků následovala fáze přípravy materiálů pro technologii briketování. Jednalo se o třídění, homogenizaci frakce vybraných materiálů a o následné sušení (bylo-li třeba). Homogenizací frakce je pro účely práce rozuměno drcení, šrotování a skartování. Drcení probíhalo za použití elektrického drtiče AL-KO, typ New Tec 2400 R (Dolpima, Česká republika) a kladívkového šrotovníku Hammer, typ 9FQ-40C (Henan, Čína). Šrotování probíhalo na vertikálním šrotovníku TAURUS VM3 (Chrudim, Česká republika), který disponuje výměnnými integrovanými sítý (na naší katedře jsou k dispozici síta s velikostí oka 4, 8 a 12 mm). Ve specifických případech (zpracování odpadu ze sádkartonových desek) byly externí formou spolupráce využity mlýny. V této souvislosti byla navázána spolupráce s firmou LAVARIS, s.r.o. [61], která se vývojem a výrobou těchto mlýnů zabývá. Spolupráce spočívala jak v konzultační činnosti a poskytnutí „know-how“ společnosti v oblasti mletí a drcení základních vstupních lisovaných materiálů, tak v poskytnutí jejího strojového parku pro přípravu zkušebních vzorků.

Skartování bylo realizováno na skartovače Hama premium X6M (Kunovice, Česká republika) a část zkušebních vzorků (zejména kartónu) bylo zpracováno ve spolupráci se soukromými subjekty, zejména pak firmou Bronislav Skovajsa [89], která se zabývá skartací dokumentů a je pro to vybavena profesionálními skartačními stroji. Tato firma poskytla konzultační činnost v oblasti skartace papírového odpadu. Dále podnik poskytl vzorky papírového skartu a též bylo díky navázané spolupráci možné provést přípravu některých základních lisovaných materiálů na papírové bázi, které by pouze s vybavením naší katedry nebo realizovatelné v dostatečné kvalitě.

Sušení nekovového základního lisovaného materiálu bylo realizováno v letním období na volně ložených sítích působením slunečního záření a též za použití komorové sušárny LAC, typ S100/03 (Rajhrad, Česká republika) [60].

7.2 Měření a stanovení fyzikálních vlastností materiálů

V souladu s příslušnými normami bylo nutné zjistit následující fyzikální veličiny výsledné zkoumané produkce briket, ale i vstupního základního lisovaného materiálu.

7.2.1 Hmotnost

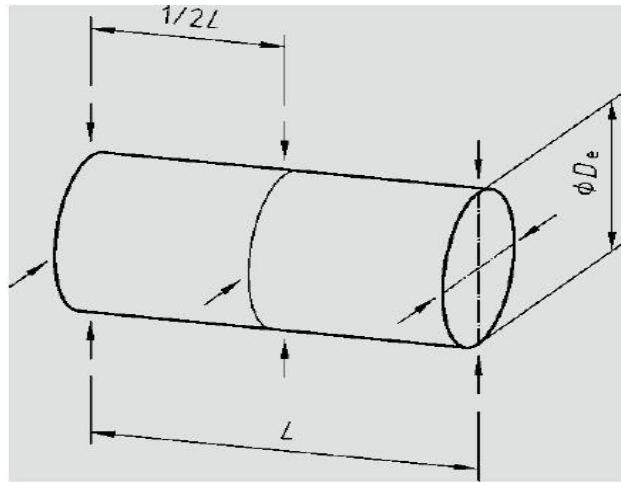
Hmotnost vzorku do 6 kg byla zjišťována na laboratorních vahách KERN GAB 6K0,05N (Balingen, Německo), které výslednou hmotnost zobrazují samočinně na 24 mm segmentovém LCD panelu na 0,05 kg. Hmotnost vzorků nad 6 kg byla poté zjišťována na průmyslových můstkových vahách KPZ-Waagen 206AH s váživostí až 30 kg.

Každý jednotlivý vzorek z dané měřené skupiny (briketa nebo základní vstupní lisovaný materiál) byl zvážen umístěním na kalibrované váhy. Následně byla váha odlehčena po dobu nezbytnou k jejímu ustálení do rovnovážného stavu nebo po vynulování zobrazovaných číslic na display váhy. Poté se daný vzorek zvážil podruhé. Po výpočtu aritmetického průměru všech zvážených vzorků byla určena výsledná hmotnost vzorku m [kg]. Přesnost vážení se pohybovala v rozsahu $\pm 2 \%$.

7.2.2 Měrná hmotnost

Objem briket je možno podle platných českých i mezinárodních norem měřit pomocí vztlaku v kapalině nebo alternativně stereometrickým výpočtem objemu [37]. Z provozních důvodů byla pro provedené laboratorní i provozní měření zvolena metoda stereometrická, která dává (pro účely naplnění cílů disertační práce) dostatečně přesné výsledky.

Postup měření je pak předepsán podle tvaru brikety normou ČSN EN ISO 17225-3 [38], respektive v normě ČSN EN ISO 18847 [37], pro válcové brikety a válcové brikety s centrální dírou [37]. Měření rozměrů bylo realizováno posuvným měřidlem na 0,01 mm. Princip měření je zřejmý z obr. 13.



Obrázek 13 Měřicí body brikety bez díry [37]

Délka brikety (L) byla vždy měřena dvakrát ve dvou navzájem kolmých rovinách. Průměr brikety (D_e) byl poté měřen minimálně 6x (2x na každém z konců a v polovině délky L). Popsaný postup je nutné provést minimálně 5x a hodnoty zprůměrovat [37].

Na základě naměřených dat se poté pomocí matematického vztahu (7.1) [37] získá objem brikety.

$$V_b = \frac{D_{em}^2 \cdot \pi \cdot L_m}{4} \quad (7.1)$$

kde:

V_b objem [m^3]

π Ludolfovo číslo [-]

D_{em} průměr podstavy (aritmetický průměr) [m]

L_m délka brikety (aritmetický průměr) [m]

Poté je možné provést výpočet hustoty, a to podle vztahu (7.2).

$$\rho = \frac{m}{V_b} \quad (7.2)$$

kde:

ρ hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

m hmotnost [kg]

V_b objem [m^3]

Analogicky je normou [37] stanoven postup pro brikety s centrální dírou, které jsou typicky produkovány právě na šnekovém briketovacím lisu. V takovém případě je nutno vzít do úvahy středovou dírou. Výpočty jsou principiální totožné, zohledňuj však středovou díru.

7.2.3 Vlhkost

Vlhkost má na kvalitu výsledné produkce zásadní vliv, proto bylo nezbytně nutné stanovit vlhkost vstupního lisovaného materiálu i výsledné produkce briket.

Orientačně, zejména v průběhu provozního měření, byla vlhkost vzorků zjišťována pomocí přenosného vlhkoměru Wile BIO WODD, který pracuje na principu referenční metody podle standardu DD CEN/TS 14774-1:2004 [91].

V laboratorních podmínkách byla výhradně využívána jednoduchá, spolehlivá a pro tyto účely dostatečně přesná gravimetrická metoda zjišťování objemové vlhkosti (rozuměno podíl objemu vypařené vody a objemu vysušeného materiálu), která byla principiálně založena na normě ČSN EN ISO 12570:200 [39], a to zejména s přihlédnutím k typu a povaze vybraných základních lisovaných materiálů. Tato metoda dává přesnost měření v rozmezí $\pm 3 \%$, kde zdrojem chyb je především manipulace se vzorky a přesnost vážení na vahách. Výsledná vlhkost zkušebních vzorků vstupních briketovaných materiálů či produkce briket, je pak vypočtena podle vztahu (7.3) [39].

$$u = \frac{m-m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (7.3)$$

kde:

u objemová vlhkost [%]

m hmotnost zkušebního vzorku před vysušením [kg]

m₀ hmotnost zkušebního vzorku pro vysušení [kg]

7.3 Měření spotřeby energie při provozu elektrických zařízení

Elektrickou energii lze vyjádřit jako práci elektrického proudu a lze jí měřit elektroměrem, případně podobným přístrojem, který je schopen změřit nezbytné veličiny a následně z nich výpočtem stanovit spotřebu elektrické energie. Měření může být jak přímé, tak nepřímé, a to zpravidla v závislosti na velikosti měřeného elektrického proudu. Pro dílenské a provozní měření spotřeby elektrické energie se v dnešní době v praxi hojně využívají tzv. elektronické statické elektroměry, které se v principu skládají ze snímače proudu (realizovanými proudovými transformátory nebo Hallovými snímači) a snímačů napětí (realizovanými zpravidla odporovými děliči). Z těchto dvou změřených veličin (tedy napětí a proudu) následně mikroprocesor v zařízení vypočte spotřebu elektrické energie a uloží jí do integrované paměti typu EEPROM či FLASH [92]. Komplexní zařízení, kterými je možno popsány metodami měřit napětí i proud a následně výpočty určit další parametry elektrické rozvodné sítě (jako je elektrický výkon, harmonické složky elektrického proudu, účinníku apod.) se nazývají analyzátory sítě. Podle účelu a povahy měření je možné toto zařízení do elektrické rozvodné sítě v zásadě připojit sériově či paralelně, a to vždy v souladu s návodem k obsluze daného konkrétního přístroje [94]. Pro veškerá měření spotřeby elektrické energie strojů a zařízení bylo v této práci použito analyzátoru sítě Chauvin Arnoux C.A 8334B, kterým disponuje katedra elektroniky a automatizace České zemědělské univerzity v Praze, se kterou byla za účelem zapůjčení tohoto přístroje navázána spolupráce.

7.4 Lineární kompresní test



Pro zjištění mechanických vlastností vybraných vstupních lisovaných materiálů byl zvolen osvědčený, a ve vědecké literatuře dobře zdokumentovaný, lineární kompresní test [87]. Veškeré kompresní testy byly pro potřeby naplnění cílů této disertační práce provedeny na univerzálním zkušebním stroji ZDM 50 (výrobce WPM, Německo, obr. 14), který je na fakultě k dispozici. Maximální síla, kterou stroj v axiálním směru vyvine, je $F_{\max} = 500 \text{ kN}$. Společnost TEMPOS, s.r.o. [93] provedla modernizaci tohoto stroje v podobě kompletní digitalizace, která umožnila digitální řízení a zaznamenávání měřených hodnot do speciálního softwaru. Tento software dovede zaznamenat průběh působící síly na aktuální poloze pístu stroje. Proto se pro provedení toho druhu experimentu stroj jevil být jako velice vhodný.



Obrázek 14 Univerzální zkušební stroj Tempos ZDM 50

Kromě závislosti deformace vstupního lisovaného materiálu na působící síle je též možnost na základě matematických vztahů (7.1) a (7.2) vypočítat hustotu v průběhu lisovacího cyklu. Taková závislost pak tvoří nepřímou (hyperbolickou) úměrnost vzrůstající hustoty základního lisovaného materiálu na deformaci.

Na základě teoretických poznatků bylo možné v programu PTC MathCAD [82] naprogramovat potřebný algoritmus (tab. 1) a vytvořit tak program na digitální zpracování výstupních dat z kompresního testu. Výsledkem výpočtu je spotřeba mechanické práce E_d [J], která byla vynaložena na stlačení vzorku. Tento postup byl nutný a pro proces vyhodnocování laboratorních měření naprosto nezbytný (vzhledem k relativně velkému počtu provedených kompresních testů, které bylo nutné vyhodnotit). Vytvořený algoritmus byl prakticky uplatněn v kapitole 9 a též v kapitole 11, kde byl použit ke zpracování výsledků měření.

Příkaz	Komentář
$vx :=$  Worksheet	Načtení naměřených dat [mm] z formátu .xls (dráha pístu) a uložení do proměnné vx.
$vy :=$  Worksheet	Načtení naměřených dat [N] z formátu .xls a uložení do proměnné vy.
$vx := vx \cdot 0.001$	Převod jednotek do soustavy SI.
$vg := \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$	Vektor počátečního odhadu parametrů a_1, a_2, a_3 .
$F(x, a) := \begin{bmatrix} a_1 \cdot (\tan(a_2 \cdot x))^{a_3} \\ (\tan(a_2 \cdot x))^{a_3} \\ a_1 \cdot a_3 \cdot (\tan(a_2 \cdot x))^{a_3 - 1} \cdot \frac{1}{(\cos(a_2 \cdot x))^2} \cdot x \\ a_1 \cdot (\tan(a_2 \cdot x))^{a_3} \cdot \ln(\tan(a_2 \cdot x)) \end{bmatrix}$	Definice parametru pro funkci genfit.
$d := \text{genfit}(vx, vy, vg, F)$	Funkce genfit k nalezení parametrů a_1, a_2, a_3 regresní funkce $f(x)$.
$d := \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix}$	Nalezené parametry regresní funkce $f(x)$ d_1, d_2, d_3 .
$f := d_1 \cdot (\tan(d_2 \cdot vx))^{d_3}$	Dosazení nalezených parametrů do regresní funkce $f(x)$.
$RI := (\text{corr}(vy, f))^2$	Výpočet koeficientu determinace RI.
$Ed := \int_0^{\max(vx)} d_1 \cdot \tan(d_2 \cdot x)^{d_3} dx$	Výpočet spotřebované práce E_d [J] za pomoci integrálního počtu.

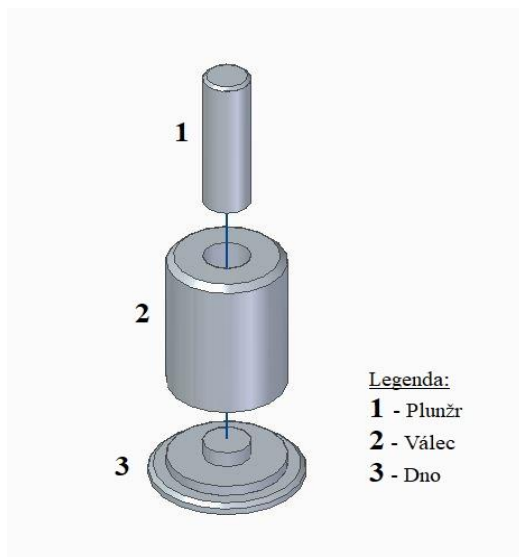
Tabulka 1 Algoritmus - spotřeba mechanické práce, PTC MathCAD

K provedení kompresních testů bylo dále nutné zkonstruovat a vyrobit laboratorní lis (viz kapitola 7.5). Tento postup byl kritický, jelikož naplnění cílů práce si vyžadovalo značný inovativní a experimentální přístup z hlediska aplikace technologie briketování na zcela nové a dosud neprobádané základní lisované materiály, jakož i provedení celé série kompresních testů.

7.5 Laboratorní briketovací lis

Pro praktickou realizaci kompresních testů bylo nutné zkonstruovat a vyrobit vhodné zkušební zařízení (laboratorní briketovací lis). To nebyl úkol snadný, jelikož z poznatků, které byly zjištěny z odborné literatury vyplynulo, že pro optimální kompresi zvolených vstupních briketovaných materiálů bude zapotřebí vyvinout značnou axiální sílu a tomu i odpovídající tlak. Z důvodu omezeného času doktorského studijního programu a i z důvodu dodržení principů bezpečnosti práce, bylo přistoupeno ke konstrukci a výrobě patentovaného laboratorního briketovacího lisu [17]. Jedná se jednoduchou, ale empiricky osvědčenou, konstrukci, jejíž výhodou je též poměrně malé nároky na výrobní technologie. Konstrukční návrh byl vytvořen pomocí počítačem podporovaného projektování (CAD). Konkrétně byl využit program Solid Edge od společnosti Siemens PLM Software [86]. 3D model experimentálního laboratorního briketovacího lisu je na obr. 15.

Na obr. 16 je poté vyfotografován výsledný plně funkční prototyp popisovaného laboratorního briketovacího lisu. Výrobní technická dokumentace je přiložena v příloze č. 2.



Obrázek 15

Sestava laboratorního briketovacího lisu



Obrázek 16

Realizovaný laboratorní briketovací lis

Konstrukce samotná je, jak již bylo avizováno, poměrně jednoduchá. V principu se skládá ze tří částí: píst (zde v podobě pístní tyče - plunžru) -1-, válce -2-, dna -3-. Funkčně pak zařízení pracuje následovně: připravené a navážené vzorky zkušebního vstupního materiálu se umístí do válce. Následně se vloží plunžr do válce. Poté se v axiálním směru požadovanou silou působí na plunžr oproti dnu. Tím je obsah válce komprimován. Při praktickém provádění kompresních testů bylo zjištěno, že je vhodné na plunžr položit ocelovou desku kruhového průřezu (vhodné tloušťky) minimálně o průměru plunžru tak, aby se zabránilo deformaci plunžru beranem lisu.

Jako materiál byla zvolena nástrojová chromová ocel 19 436, podle ČSN EN 41 9436 [40]. Tato volba měla několik důvodů. Hlavním důvodem bylo doporučené použití této oceli a její mechanické vlastnosti. Dalším důvodem byl fakt, že odpad z této oceli podléhá klasifikaci odpadu podle ČSN 42 0030 [34], a tudíž ocelové třísky, které vznikly při třískovém obrábění hutního polotovaru, bylo možné využít k dalšímu experimentálnímu měření, jelikož v rámci experimentálního měření prakticky odpadla fáze shromažďování vzorků.

Technologický postup výroby spočíval v obrobení všech tří hutních polotovarů na předepsaný rozměr (viz příloha č. 2) na univerzálním hrotovém soustruhu TOS S28/750, kterým disponuje naše katdra. Obrobky byly následně tepelně zpracovány, vakuově

zakaleny na výslednou tvrdost 62 HRC. Za účelem tepelného zpracování byla navázána spolupráce s podnikem NAREX VRŠOVICE, s.r.o. [72], která spočívala v tepelném opracování popsaného laboratorního lisu ve vakuové kalici peci a též poskytnutí konzultační činnosti v oblasti přípravy polotovarů pro tento druh tepelného opracování z hlediska specifik použité kalici pece.

7.6 Použitý statistický aparát

Všechny statistické výpočty byly spočítány ve 25. verzi programu SPSS od společnosti IBM [53]. Interpretace zjištěných statistických výpočtů byla provedena v souladu s odbornou literaturou [50].

K provedení testu stanovených statistických hypotéz o vzájemné závislosti či nezávislosti testovaných souborů dat (například analýzou rozptylu - ANOVA), je nutno v první řadě otestovat její předpoklady. Prvním předpokladem je normalita testovaného souboru dat, kterou je možno otestovat tzv. t - testem (7.4) [50, 74].

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{S} \cdot \sqrt{n} \quad (7.4)$$

kde:

\bar{x}aritmetický průměr [-]

S směrodatná odchylka [-]

μ_0parametr nulové hypotézy [-]

npočet pozorování [-]

Ve všech případech aplikace t-testů na vzorky dat v této práci se prokázalo, že data nejsou normální povahy, a proto není možné použít analýzu rozptylu - ANOVA, protože by tím byly porušeny předpoklady pro spolehlivost jejího použití. Pro tyto případy je vhodné použít tzv. neparametrické testy, jako je například Friedmannův test (7.6) [85] nebo test Kruskal-Wallisův (7.5) [50, 58].

$$H = \frac{12}{N \cdot (N + 1)} \cdot \sum_{i=1}^c \frac{R_i^2}{n_i} - 3 \cdot (N + 1) \quad (7.5)$$

kde:

C.....počet tříd [-]

n_i.....počet pozorování v i-té třídě [-]

N.....počet pozorování [-]

R_i.....součet pořadí i-té třídy [-]

$$x_r^2 = \frac{12}{m \cdot k \cdot (k + 1)} \cdot \sum_{i=1}^k S_i^2 - 3 \cdot m \cdot (k + 1) \quad (7.6)$$

kde:

k.....počet stupňů volnosti

mpočet řad

S_i.....součet pořadí

S Friedmanovým testem (7.6) se úzce pojí i tzv. koeficient Kendellova W, nebo též koeficient konkordance. Při určitém zjednodušení je možné říci, že zatímco Friedmanův a Kruskal-Wallisův test vystihují existence statistické závislosti mezi proměnnými, koeficient Kendellova W (7.7) popisuje samotnou sílu závislosti [50].

$$W = 12 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{(k^2 \cdot (n^3 - n)) - (k \cdot T)} \quad (7.7)$$

kde:

k.....počet stupňů volnosti [-]

N.....počet pozorování [-]

n_i.....počet pozorování v i-té třídě [-]

R_i.....součet pořadí [-]

Pro statistický popis vzorků dat bylo, kromě výše popsaných statistických metod, použito mediánu, jenž je obvykle značen „Me“. Medián je ze statistického hlediska možno zařadit mezi míry tzv. centrální tendence, což znamená, že nejméně 50 % procent ze sledovaného vzorku je menších nebo rovno mediánu Me a zároveň nejméně 50 % ze sledovaného vzorku je větších nebo rovno mediánu Me [50].

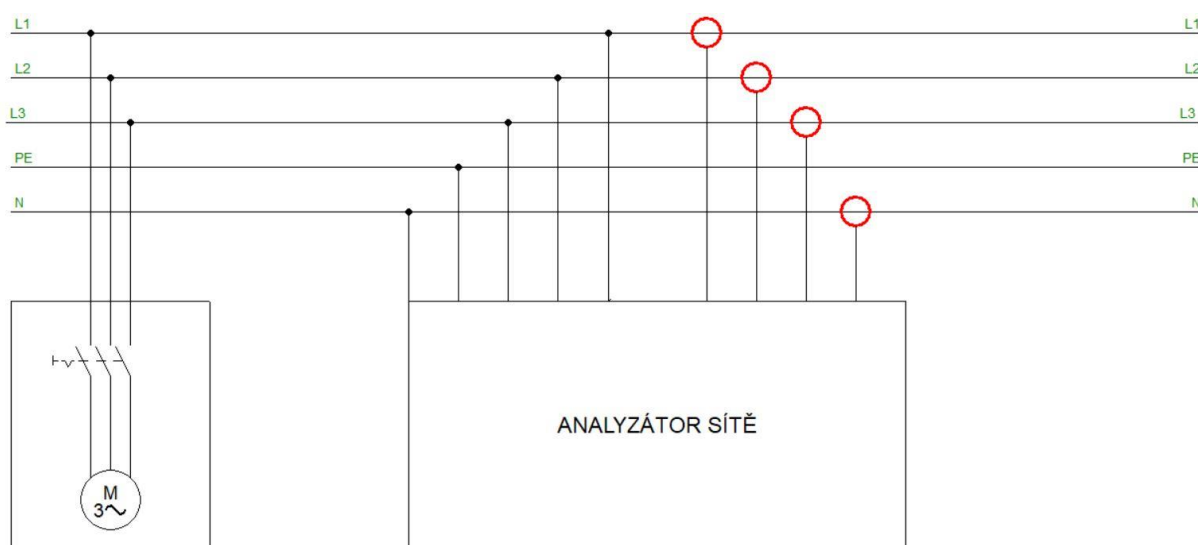
Dále bylo využito směrodatné odchylky, která se obvykle značí „σ“. Směrodatnou odchylku je možno vyjádřit jako druhou odmocninu z rozptylu [50].

8 ENERGETICKÁ NÁROČNOST VÝROBY BRIKET

Tato kapitola představuje popis a výsledky provozních a experimentálních měření, které se týkají energetické náročnosti procesu briketování, a to jak z pohledu spotřeby elektrické energie briketovacího lisu, tak z pohledu spotřeby mechanické práci konkrétní zvolených vstupních lisovaných materiálů.

8.1 Spotřeba elektrické energie briketovacího zařízení

Spotřeba elektrické energie briketovacího lisu se odvíjí od celé řady faktorů, přičemž některé z nich (jako např. napětí v elektrické rozvodné síti) lze v praxi jen velmi těžko predikovat a ovlivnit. Stěžejní úlohu tak v tomto smyslu hraje zvolený vstupní briketovaný materiál a jeho vstupní vlhkosti. Veškeré použité vzorky měly vlhkost 10 % (± 2 %). Briketovací lis je pro účely tohoto laboratorního měření chápán jako ucelené strojní zařízení, které je využíváno za účelem lisování vstupního materiálu a produkci briket. Laboratorní měření bylo realizováno za využití hydraulického briketovacího lisu BrikStar 30, typ 12. V souladu s metodikou této (shrnutou v podkapitole 7.3) a návodem k obsluze uvedeného přístroje, byl analyzátor sítě připojen paralelně do třífázové rozvodné sítě TN-S (blokové schéma připojení je na obr. 17, kde červené kruhy představují kleště přístroje pro měření průchodu proudu vodičem).



Obrázek 17 Blokové schéma připojení analyzátoru sítě do rozvodné sítě

Přístroj byl naprogramován tak, aby každou 1 sekundu ukládal do své paměti typu FLASH sledované parametry, kterými byly: výkon [Wh], čas měření [s], napětí [V], proud [A] a dále byl sledován $\cos \varphi$ (účinnost). Výsledná data byla matematicky zpracována za pomoci využití vztahu (8.1) [64].

$$P_i = \frac{E_{ki} - E_{pi}}{k_i - p_i} \cdot 3,6 \quad (8.1)$$

kde:

P_i spotřeba elektrické energie i-tého vzorku [kWh]

I rozsah souboru údajů [-]

k_i konec měření i-tého vzorku [s]

p_i začátek měření i-tého vzorku [s]

E_{ki} nominální konečná hodnota práce elektrického proudu i-tého vzorku [kWh]

E_{pi} nominální počáteční hodnota práce elektrického proudu i-tého vzorku [kWh]

Po zvážení výsledné produkce briket, byla v daném čase od každého vzorku stanovena skutečná výkonnost briketovacího lisu v závislosti na briketovaném materiálu, podle vztahu (8.2) [64].

$$A_i = \frac{W_{pi}}{m_i} \quad (8.2)$$

kde:

A_i výkonnost stroje [kWh·kg⁻¹]

W_{pi} spotřeba elektrické energie i-tého vzorku [kWh]

M hmotnost i-tého vzorku [kg]

Účinník se v průběhu celého měření prakticky neměnil, respektive osciloval na hladině $\pm 0,52$ %. Takové malé odchylky jsou zcela zanedbatelné a z praktického i teoretického hlediska nemají reálný doba na chod stroje.

Vzorky základních briketovaných materiálů byly vybrány s ohledem již publikované experimentální měření (podkapitola 2.3.1). V tomto smyslu byly vybrány zemědělské zbytky v podobě chmelu a cukrové třtiny. Papírové skarty (standardní frakce 4x18 mm) a dřevní hmota v podobě hoblin byly zvoleny pro to, že z pohledu české technicky praxe se jedná o odpadní materiály nejdostupnější a tím pádem i nejvíce vhodné právě pro zpracování technologií briketování. Všechny vybrané materiály též splňovaly kritéria v souladu se stanoveným metodickým postupem (podkapitola 7.1). Na všechny vzorky bylo pohlíženo jako na homogenní základní vstupní materiál a nebyla v rámci tohoto experimentálního měření řešena jejich frakce. Označení vzorků je v tab. 2, směrodatná odchylka σ se vztahuje k měření spotřeby elektrické energie briketovacího lisu. Zdrojem veškerého materiálu byly zdroje interní.

Číslo vzorku	Materiál	Směrodatná odchylka (σ)
1	Novinový papír - matný	0,15
2	Novinový papír - lesklý	0,02
3	Kartonový papír	0,11
4	Sešity studentů	0,16
5	Chmel & bříza (50:50)	0,05
6	Cukrová třtina	0,07
7	Chmel	0,02
8	Bříza	0,13
9	Habr	0,09
10	Dub	0,17

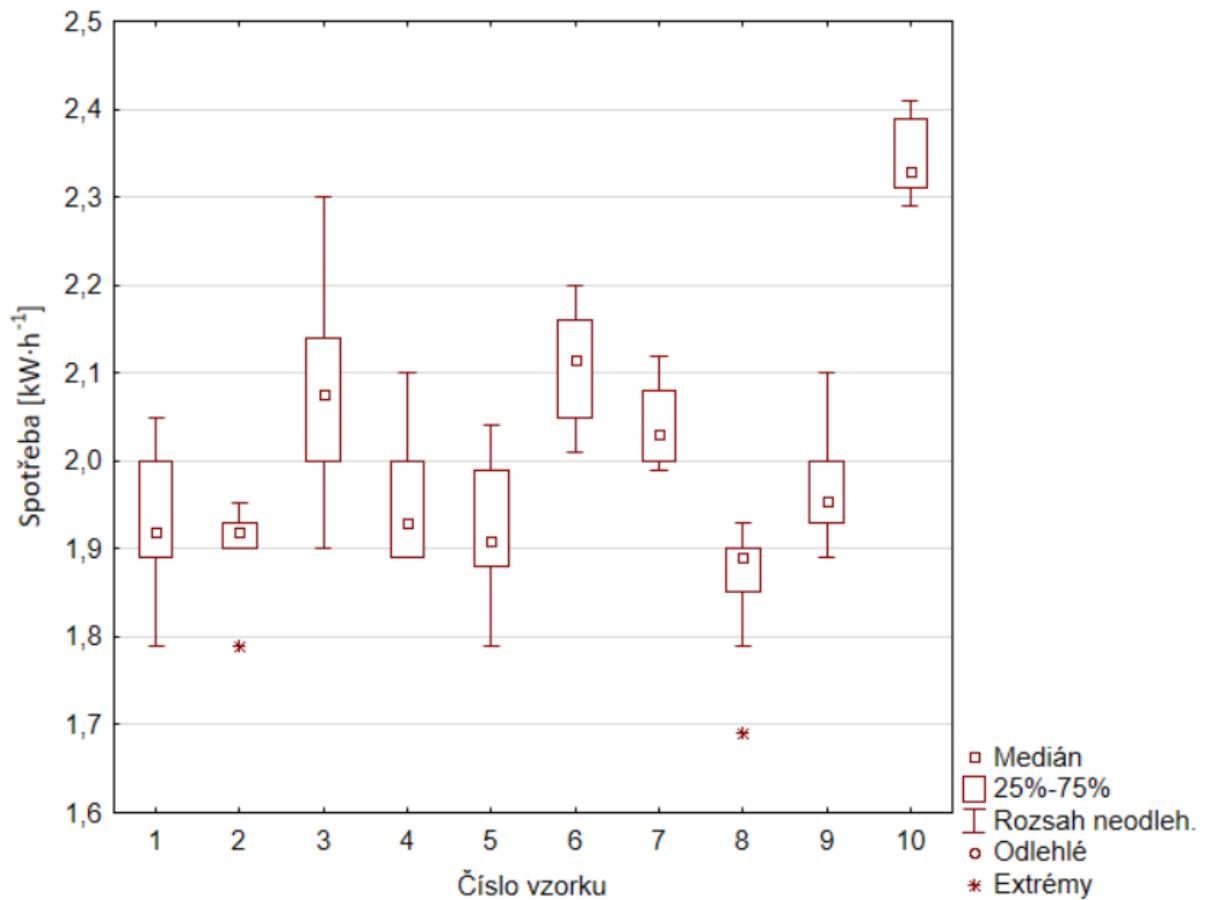
Tabulka 2 Zkoumané vzorky - spotřeba elektrické energie briketovacího lisu

Každý z uvedených materiálů byl následně briketován v hydraulickém pístovém lisu po celkovou dobu 48 hodin, tedy 6 x 8 hod. (čistého pracovního času stroje bez

technologický prodlev). Tento časový úsek byl zvolen jako reprezentativní, jelikož podle platné pracovně-právní legislativy ČR odpovídá šesti pracovním směnám, z hlediska čtyřiceti hodinového pracovního týdne [100]. V tomto čase bylo provedeno deset měření od každého ze zkoumaných materiálů, z čehož vyplývá, že každé z měření probíhalo po dobu cca 30 min. Změřená a matematicky upravená data byla následně statisticky zpracována (viz podkapitola 7.6). Získané výsledky jsou přehledně uspořádány v tab. 2, obr. 18 a obr. 19. Tato data dobře reprezentují měření. Zejména směrodatná odchylka u jednotlivých vzorků jasně ukazuje, že data jsou konzistentní a mají značnou vypovídající hodnotu, a to i na vzdory faktu, že měření probíhalo několik dní, a tudíž mohlo být zatíženo některými dalšími faktory, jako je například vliv počasí (atmosférického tlaku, či vlhkosti vzduchu apod.).

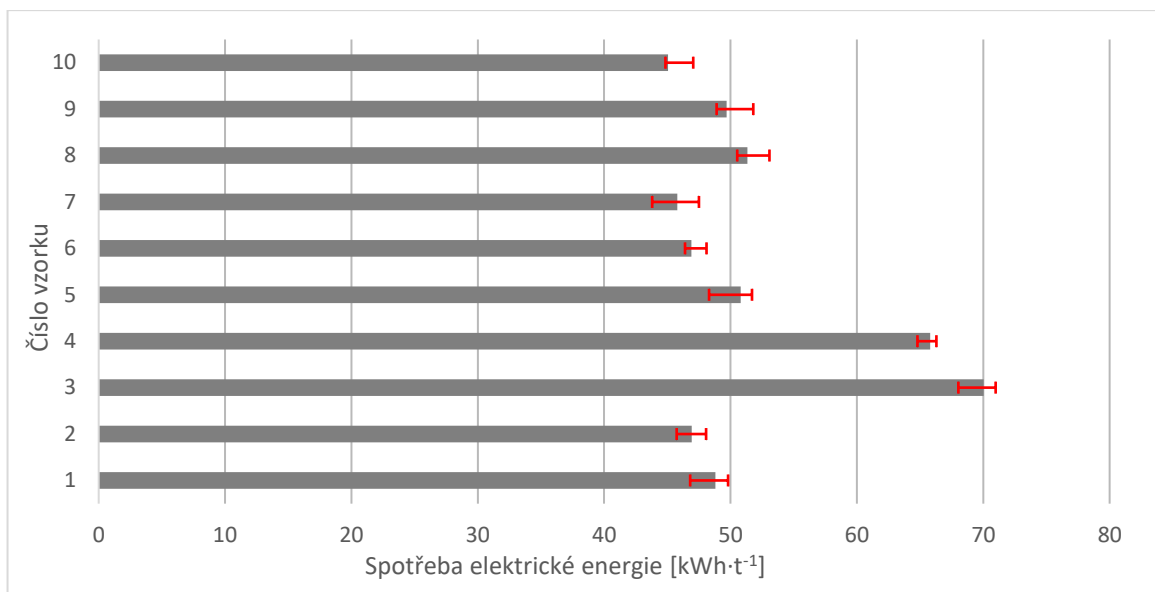
Výsledek měření byl graficky znázorněn na obr. 18 je porovnání hodinové spotřeby elektrické energie briketovacího lisu při briketování vybraných briketovaných materiálů. Z hodnot je jasně patrné, že spotřeba elektrické energie se v závislosti na konkrétním lisovaném materiálu prakticky nemění. Největší energetickou náročnost (s průměrnou hodnotou 2,35 kWh) vykázal vzorek č. 10 (dubové hobliny). Z papírových skartů je největší energetická potřeba na lisování kartonového skartu, tedy vzorku č. 3 (2,07 kWh). Z grafického srovnání je dobře patrné, že rozdíly v energetické náročnosti lisovaných papírových skartů jsou prakticky zanedbatelné, konkrétně tedy 0,13 kWh. Rozdíl mezi energeticky nejnáročnějším materiálem, který představuje vzor č. 10 (s průměrnou hodnotou 2,35 kWh), a nejméně energeticky náročným vzorkem č. 8 (s průměrnou hodnotou 1,86 kWh), je pouhých 0,49 kWh. Vzhledem k celkovému příkonu použitého stroje 4,4 kW, je možné takový rozdíl považovat za nevýznamný. Pro průmyslovou i domácí výrobu briket jsou takto malé rozdíly prakticky ekonomicky i technicky bezvýznamné. Na základně provedeného měření se ukázalo, že podobně nízké rozdíly nemá smysl statisticky testovat, jelikož by hodnoty mohly spadat do kritického intervalu 5 % pozorování a mohlo by tak dojít k statistické chybě prvního nebo druhého druhu [50]. Na základě provedeného experimentu, lze tedy prohlásit, že druh lisovaného materiálu

nehraje z hlediska energetické náročnosti spotřeby průmyslového briketovacího lisu zásadní roli.



Obrázek 18 Spotřeba elektrické energie v závislosti na lisovaném materiálu

Pro účely ekonomického vyhodnocení bylo též nutné výsledné brikety z jednotlivých zkoušek zvážit a výpočtem stanovit faktickou energetickou spotřebu stroje v závislosti na jednotce produkce (1 tunu) briketovaného materiálu. Výsledky experimentálního měření jsou přehledně graficky uspořádány do obr. 19, ze kterého je dobře patrné, že nejvíce elektrické energie je spotřebováno na výrobu briket ze vzorku č. 3 (kartonový papír), naopak nejméně je potřeba na vzorek č. 7. (chmel). V tomto případě, už jsou rozdíly výraznější, což může být způsobeno samotným výkonem briketovacího lisu nebo stupněm komprese konkrétního lisovaného materiálu (danou jeho fyzikálními vlastnostmi), či měrnou hmotností konkrétního lisovaného materiálu.



Obrázek 19 Spotřeba elektrické energie na jednotku produkce

Výsledek provedeného experimentálního měření ukázal, že rozdíly ve spotřebě elektrické energie jednotlivých materiálů nemusí být velké. Avšak i při malých rozdílech lze dosáhnout poměrně velkých ekonomických úspor, a to za předpokladu, že bude dostatečný objem produkce. Rozdíly ve spotřebě elektrické energie na jednotku produkce jsou již významnější. Ukazuje se, že vliv vstupního materiálu je v tomto směru nezanedbatelný. Celkové zhodnocení spotřeby elektrické energie v závislosti na daném vstupním materiálu v koleraci se vstupní investicí na pořízení briketovací linky jako takové, pak dají komplexní pohled na celkovou problematiku spotřeby elektrické energie briketovacího lisu v ekonomickém kontextu, která dosud nebyla provedena.

8.1.1 Ekonomické zhodnocení

Náklady spojené s provozem briketovacího lisu je možné v zásadě shrnout do následujících položek:

- Investiční náklady na pořízení a instalaci briketovacího zařízení

Jedná se o náklady spojené s nákupem a uvedením do provozu samotného briketovacího lisu. V České republice jsou briketovací lisy nabízené několika výrobci, mezi tradiční a v oboru respektované výrobce, patří mimo jiné i firma Briklis, s.r.o. [10],

kteřá exportuje do více jak třiceti zemí světa. Pořizovací cena briketovacího lisu je závislá na konkrétním požadavku zákazníka a též na výrobním sestavení a zpracovávaném materiálu. Dá se říci, že pořizovací cena průmyslového briketovacího lisu střední kategorie se pohybuje v řádu statisíců korun. Ustavení stroje a jeho uvedení do provozu je zpravidla součástí dodávky, pokud není smluvně ošetřeno jinak.

- Energetické náklady

Jedná se především o náklady vynaložené na elektrickou energii, která je potřebná k provozu briketovacího zařízení, a to bez přidružených technologických operací, jako je například třídění nebo sušení. Uvážíme-li, že průměrná cena dodavatelů elektrické energie pro podniky se v roce 2019 pohybovala na úrovni $3,97 \text{ Kč} \cdot \text{kWh}^{-1}$ [29], pak je možné (při znalosti skutečné výkonnosti briketovacího lisu) prostým vynásobením stanovit náklady na elektrickou energii na jednotku produkce. Laboratorní měření bylo provedeno na briketovacím lisu BrikStar 30, typ 12, který má výrobcem deklarovanou výkonnost $0,02 - 0,04 \text{ t} \cdot \text{hod}^{-1}$. Při započítání průměrné ceny elektrické energie to znamená, že náklady z pohledu spotřeby elektrické energie na jednu tunu produkce vzorku č. 3, by činily 278 Kč a na jednu tunu produkce vzorku č. 7. by činily 182 Kč. To představuje rozdíl 96 Kč na jednu tunu produkce. Při provozu briketovacího lisu po dobu jedné pracovní směny o délce 8 hod (viz laboratorní měření výše), to představuje objem produkce na úrovni $0,16 - 0,32$ tuny za směnu. V takovém případě se jedná o náklady na elektrickou energii za jednu pracovní směnu briketovacího lisu v případě vzorku č. 3 na úrovni 45 - 29 Kč za směnu, respektive 85 - 89 Kč za směnu v případě vzorku č. 7. Rozdíl nákladů na elektrickou energii v porovnání v laboratorním měření zjištěných dvou mezních vzorků, je tak v kontextu ostatních uváděných nákladů spojených s provozem briketovacího zařízení zanedbatelný, jelikož se pohybuje v řádu jednotek až desítek korun za pracovní směnu.

- Mzdové náklady

Moderní briketovací lisy pracují samočinně, tzn. jejich pracovní cyklus je plně automatický a zásahy obsluhy nejsou nutné. Je však potřebné zajistit kontrolu chodu stroje, případně podpůrné práce jako je například doplňování materiálu do násypky stroje apod.

Praxe ukazuje, že zpravidla tuto obsluhu je schopen zvládnout jeden pracovník (operátor). Podle Českého statistického úřadu [29] činila průměrná měsíční hrubá mzda pracovníka na pozici „Obsluha strojů a zařízení“ (klasifikace zaměstnání CZ-ISCO [29]) v roce 2019 28 261 Kč. K této částce je však nutno ještě připočítat odvody (sociální a zdravotní pojištění), sazbu daně příjmu fyzických osob, případně další daně a poplatky [29].

- Servisní náklady a režijní náklady

Briketovací lis moderní konstrukce je značně spolehlivé zařízení. Preventivní údržba se v zásadě sestává z výměny provozních kapalin a amortizovaných částí. Do servisních nákladů je však nutné započítat kromě běžné údržby též odstraňování následků poruch - tzv. servis po poruše. Režijními náklady jsou obvykle rozuměny daně, poplatky a další náklady spojené přímo s provozem daného briketovacího zařízení. Zpravidla se pohybují kolem 10 % z celkových výrobních nákladů.

9 KOVOVÝ ODPAD – ENERGETICKÁ NÁROČNOST

Technologie briketování je v českém průmyslu v drtivé většině používána pro zpracování kovového odpadu, kovových třísek z kovoobráběcích operací. Za účelem zjištění stavu v české technické praxi byla (formou konzultační činnosti) navázána spolupráce s českými podniky, které se zabývají kovovýrobou či zpracováním kovových odpadů. Jednalo se o podniky JIHOKOV, v.d. [54] a EKOPRON METAL, s.r.o. [46]. Na základě těchto odborných konzultací bylo zjištěno, že v tuzemsku jsou pro technologii briketování využívány výhradně ocelové, litinové a třísky z hliníkových slitin. Toto zjištění potvrdil i nejvýznamnější český výrobce briketovacích lisů a zařízení (firma Briklis, s.r.o. [10]), se kterou byl stav věcí v této oblasti zpracování kovového odpadu též odborně konzultován. Jelikož tyto tři materiály splnily i kritéria stanovená metodikou (viz podkapitola 7.1.1), byly pro laboratorní měření zvoleny právě materiály na této bázi. Kovovým odpadem jsou myšleny třísky pocházející ze soustružnických, frézařských, vrtacích, vyvrtávacích a řezacích operacích na konvenčních a CNC obráběcích strojích, které vznikají v průběhu výrobního procesu nebo v rámci servisu strojů a zařízení. Veškeré použité třísky byly utvořeny řeznými nástroji vyrobenými ze slinutých karbidů. Zdrojem třísek byly z části interní zdroje fakulty a části zdroje externí (jednalo se zejména o firmy EKOPRON METAL, s.r.o. [46] a podnik METAL TRADE COMAX, a.s. [68], které pro účely této práce laskavě poskytly vzorky litinových třísek a třísek ze slitin hliníku). Při průmyslové výrobě se při obrábění využívají procesní kapaliny na bázi olejů a vody, které je nutno vhodným způsobem z třísek odstranit, jinak totiž není z bezpečnostních důvodů možno provést kompresní test. Dále může být nutné třísky homogenizovat za pomoci drtičů kovových třísek v případě, že pocházejí z kovoobráběcích operací, kde není možné (nebo výhodné či hospodárné) lamačem třísek na řezném nástroji zaručit pro briketování vhodný tvar a průřez třísky. Všechny použité vzorky z interních zdrojů pocházely z drobných obráběcích operacích, kde nebylo nutno používat procesní kapaliny a měly též optimálním průřez i velikost. Vzorky třísek z externích zdrojů již byly pro vědecké účely dodány vhodně zpracovány. Jednalo se zejména o jejich odstředění na odstředivkách s ruční výměnou bubnu nebo s automatickým provozem.

Vzorky třísek byly podle tab. 3 rozděleny a očíslovány do třech kategorií, a to podle jejich složení.

Vzorek Číslo	Navážka [kg]	Složení ¹
1	0,14 (± 5 %)	Směs ocelových třísek z ocelí jakosti ČSN 11 343, 11 373, 19 436.
2	0,16 (± 5 %)	Směs třísek z tvárné a šedé litiny (<i>bez bližší specifikace</i>).
3	0,12 (± 5%)	Směs třísek hliníkových slitin EN AW 7075, 6060, 6063.

Tabulka 3 Zkoumané kovové materiály - kompresní test

Následně byl vykonán kompresní test. Od každého ze tří vzorků bylo provedeno deset měření (hmotnost vzorků před započítáním komprese je uvedena tab. 3 ve sloupci „Navážka“). U každé vyprodukované brikety byla v souladu s metodickým postupem (podkapitola 7.2.1 a 7.2.2) stanovena její měrná hmotnost. Získaná data byla následně matematicky zpracována podle metodiky práce (podkapitola 7.4). Aritmetický průměr vypočítané práce E_d [J] k výrobě briket s předepsanou minimální hustotou, která byla vynaložena ke kompresi vzorků, je spolu s ostatními základními mírami popisné statistiky přehledně shrnuta do tab. 4. Data jasně ukazují, že z hlediska spotřebované práce je nejnáročnější vzorek č. 1. Naopak vzorek č. 3 je hodnocen jako nejméně energeticky náročný.

Číslo vzorku	Práce E_d [J]	σ	Me (kWh)	Min. (kWh)	Max. (kWh)
1	3752	21,13	3750	3700	3780
2	2126	16,95	2128	2100	2162
3	1152	32,49	1140	1100	1190

Tabulka 4 Výsledek kompresního testu - kovové materiály

Firmy EKOPRON METAL, s.r.o.[46] a METAL TRADE COMAX, a.s. [68] dále laskavě poskytly pro vědecké účely vzorky kovových briket, které svým složením

¹ Velikost a průřez třísek nebyla brána v potaz, jelikož ve výrobní praxi tento parametr z hlediska nakládání s odpady není sledován. Všechny třísky měly maximální průřez 1 mm² a délka maximálně 25 mm. Všechny vzorky byly zbaveny procesních kapalin.

odpovídaly vzorkům laboratorně zpracovaným, podle tab. 4. Tyto vzorky vznikly na průmyslových hydraulických pístových briketovacích lisech firmy Briklis, s.r.o. [10], které produkují brikety o průměru 90 mm. Bylo tedy možno po stanovení jejich hustoty porovnat produkci briket průmyslových s laboratorními vzorky (parametr hustoty byl zvolen s ohledem na jeho normovaný charakter). Brikety, které měly složení vzorku č. 1, bylo dodáno 10 ks. Briket se složením vzorku č. 2, bylo dodáno celkem 10 ks a briket o obsahu vzorku č. 3 celkem 7 ks. Pro stanovení hustoty bylo vybudováno pracoviště (obr. 20), kde probíhalo měření v souladu s metodickým postupem (podkapitola 7.2.1 a 7.2.2).

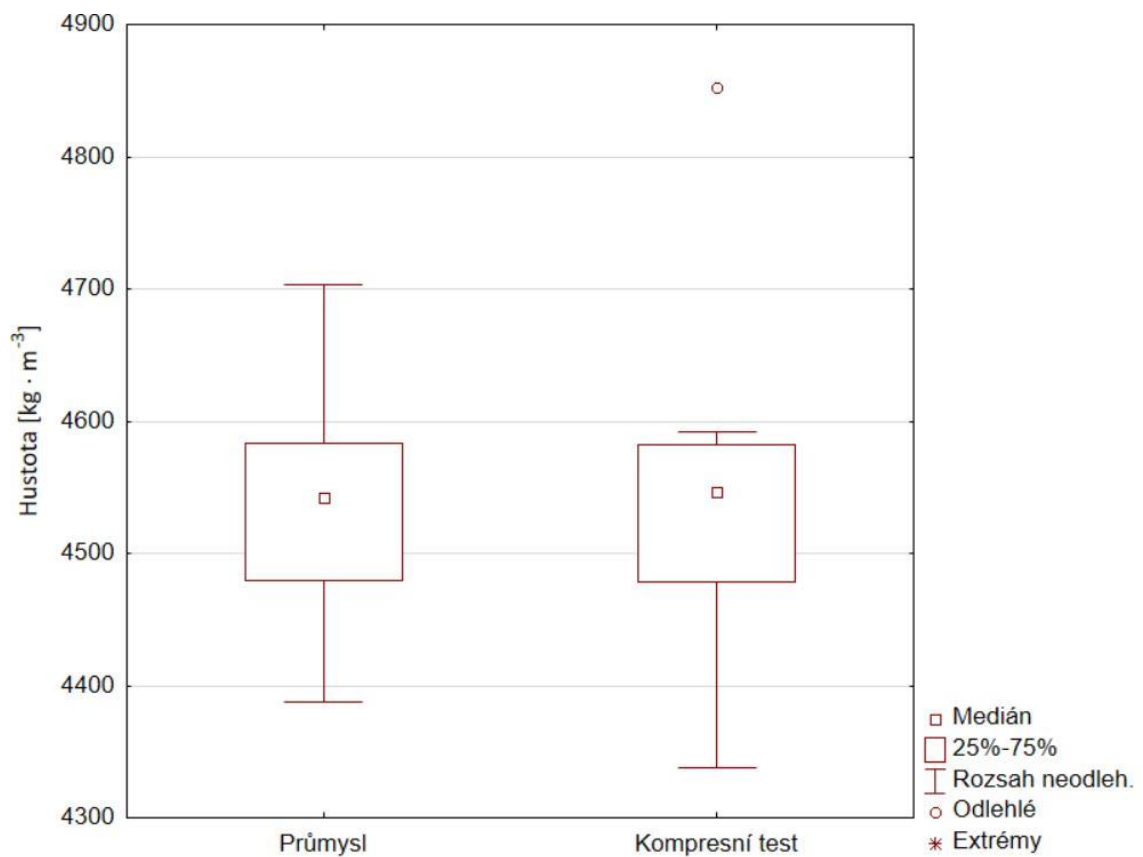


Obrázek 20 Pracoviště pro měření kovových briket

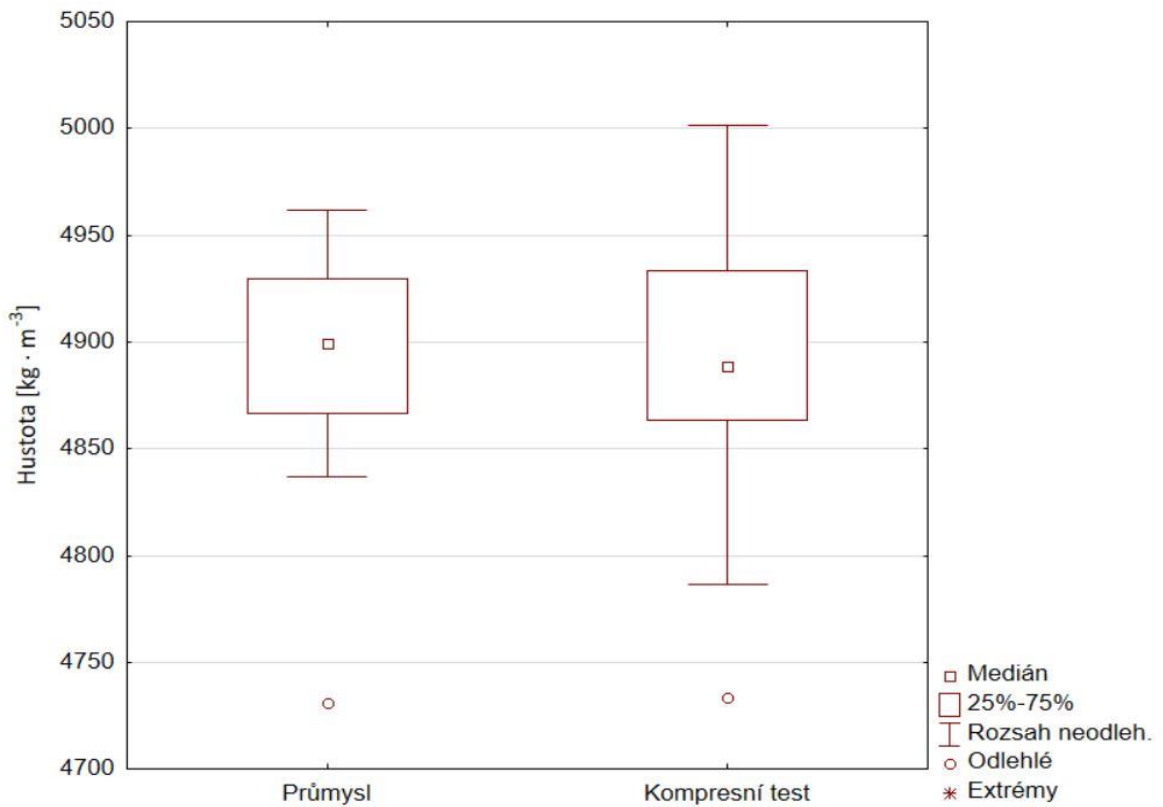
Po statistickém srovnání nástroji popisné statistiky a vyhodnocení obou naměřených vzorků, tedy vzorků briket průmyslových a laboratorních (podkapitola 7.6), bylo možno graficky vyobrazit shodnost obou skupin briket (laboratorní vs. průmyslové vzorky). Takto získané statistické míry popisné statistiky byly u všech třech provedených srovnání prakticky totožné a průměrné hodnoty se lišily v řádu desetin procenta. Tento závěr potvrzovala i vizuální komparace vzorků. Podobně nízké rozdíly nemá smysl statisticky testovat, jelikož by hodnoty mohly spadat do kritického intervalu 5 % pozorování a mohlo by tak dojít k statistické chybě prvního nebo druhého druhu [50].

Na obr. 21 a na obr. 22 je patrné, že obě skupiny briket jsou dobře srovnatelné. Na obr. 23, který představuje grafické porovnání hustoty briket vzorku č. 3 s průmyslově vyrobenými briketami o stejném složení, vykazuje jen nepatrně horší shodu, což může být

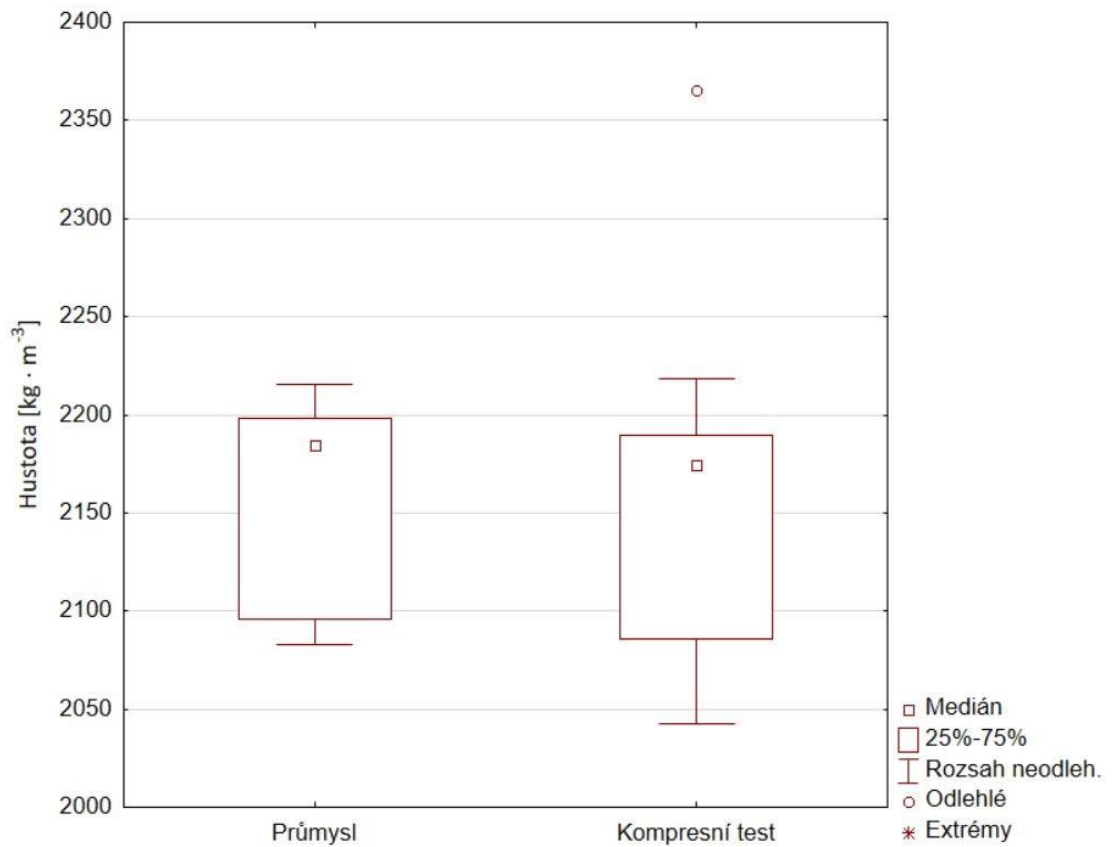
způsobeno menším počtem dodaných průmyslově vyrobených briket, konkrétně 7 ks namísto 10 ks.



Obrázek 21 Porovnání vzorků - ocel (kompresní test vs. průmysl)



Obrázek 22 Porovnání vzorků - litina (kompresní test vs. průmysl)



Obrázek 23 Porovnání vzorků - hliník (kompresní test vs. průmysl)

Lze tedy konstatovat, že kvalita briket z laboratorního testu je srovnatelná s produkcí průmyslovou. Z grafického porovnání hodnot je též zřejmé, že zvolené silové a tlakové poměry byly v rámci laboratorního měření vhodně zvoleny (pro každý ze zkoušených materiálů) tak, že hustota výsledné produkce briket vyrobených laboratorně je srovnatelná z průmyslově vyráběnými briketami příslušných zkoušených materiálů. Hodnocení a závěry lze proto aplikovat i pro průmyslovou produkci, respektive na tři zkoumané zvolené vstupní lisované materiály (tzn. i jejich frakci).

10 Vliv teploty lisovací komory na kvalitu briket

Teplota lisovací komory má potenciální vliv na kvalitu výsledné produkce briket i na energetickou náročnost procesu briketování. Je však nutno zdůraznit, že některé typy briketovacích lisů díky své konstrukci (kapitola 2.2) neumožňují kvalitativně vyhovující produkci briket bez provozu elektrického topného tělesa. To je způsobeno zejména nižšími provozními tlaky v lisovací komoře. Z hlediska energetické náročnosti v podobě spotřeby elektrické energie, bylo (v návaznosti na použitých typech briketovacích lisů) realizováno laboratorní a provozní měření za účelem prokázání statisticky významného rozdíly závislosti elektrického přehřevu lisovací komory právě na mechanickou kvalitu produkce briket a na s tím související vlhkost briket.

Samotné provozní měření bylo provedeno na již představeném briketovacím lisu Profilis HOME, který je na naší katedře k dispozici. Tento stroj má integrované elektrické topné těleso lisovací komory, který je plně regulovatelný v rozsahu 0 - 400 °C s hysterezí ± 10 °C. Šnekovým briketovacím lisem Česká zemědělská univerzita v Praze není vybavena, a proto bylo nutné navázat spolupráci se soukromým sektorem. Ukázalo se, že briketovací lisy šnekové nejsou v průmyslových podmínkách České republiky stroji masově rozšířenými. Nakonec byla navázána spolupráce s firmou Dřevo-prodej.cz [44], která má k dispozici tento typ šnekového lisu (zakázkově vyrobeným strojem od společnosti Briklis, s.r.o. [10]) . Společnost laskavě svolila k provedení provozního měření. Dalším výstupem spolupráce s tímto podnikem bylo poskytnutí cenných informací z provozu stroje. V neposlední řadě výsledky a závěry realizovaných provozních měření též pomohly technickému oddělení zmiňované firmy k optimalizaci nastavení stroje v různých provozních podmínkách s ohledem na kvalitu produkce briket.

Vliv teploty na lisovací komoru není měření standardizované, proto bylo přistoupeno k následujícímu popisu metodiky měření, jak pro pístový, tak pro šnekový briketovací lis.

Zvolený vstupní základní lisovaný materiál byl zvolen jak s ohledem na metodický postup (podkapitola 7.1.1.), tak i provedené experimentální měření spotřeby elektrické energie pístového briketovacího lisu provedeného v kapitole 8.

10.1 Vliv teploty lisovací komory - pístová konstrukce briketovacího lisu

Jako inicializační materiál byla zvolena dřevní hmota (před zahájením měření je totiž nutná jistá doba, která dovoluje lisu dosáhnout jeho provozní teploty). Jednalo se konkrétně o směs hoblin a odpadního dřevěného prachu z truhlářského provozu. Směs obsahovala dubové, bukové a smrkové dřeviny v přibližně stejném poměru. Před započítáním měření byly odebrány vzorky vstupního briketovaného materiálu a v souladu s metodickým postupem (podkapitola 7.2.3) byla stanovena jejich vlhkost, která je uvedena v tab. 5).

Samotné experimentální měření pak probíhalo následovně. Násypka stroje byla naplněna nejprve inicializačním materiálem. Stroj byl spuštěn po dobu jedné hodiny s nastavenou teplotou elektrického přívěvu na výrobcem doporučenou teplotu pro tento druh materiálu, podle tab. 6 byla zvolena teplota 200 °C. Následně byl stroj vypnut a násypka stroje byla důkladně vyčištěna a znovu byla naplněna vzorkem „A“ (tab. 5). Tímto postupem se zajistilo vyrovnaní provozních teplot ve stroji a tím se minimalizovaly případné vlivy z toho plynoucí. Stroj byl spuštěn (s nastavenou doporučenou teplotou podle výrobce 230 °C, tab. 6) a po 22 minutách provozu (tzn. po čase nutném k úplné výměně briket v tlumiči vibrací stroje) se začala oddělovat produkce briket. Tímto způsobem bylo provedeno deset měření, přičemž při každém z nich bylo produkováno 20 kg briket vzorku „A“. Následně došlo k zastavení stroje a důkladnému vyčištění násypky stroje od vzorku „A“. Násypka stroje se zaplnila vzorkem „B“ (tab. 5) teplota elektrického přívěvu byla nastavena na 300 °C a bylo provedeno deset měření, přičemž při každém z nich bylo rovněž vyprodukováno 20 kg briket vzorku „B“. Pro optimální výsledky produkce briket bylo nutné nastavit vyšší než doporučenou teplotu elektrického topného tělesa.

Vzorek	Materiál	Teplota topného tělesa [°C]	Hustota výsledných briket [kg·m ⁻³]	Vlhkost [%]		Mechanická odolnost briket [%]
				Vstupního materiálu	Briket	
A	Dřevní hmota (hoblíny: směs dub, buk, smrk)	230	385 (± 26,50)	8,30 (± 0,30)	5,94 (± 0,48)	7,90 (± 0,12)
		300	435 (± 26,01)		3,93 (± 0,58)	29,06 (± 0,15)
B	Dřevní hmota (prach: směs dub, buk, smrk)	270	650 (± 74,1)	6,10 (± 0,29)	5,36 (± 0,78)	5,23 (± 0,14)
		340	728 (± 46,8)		3,19 (± 0,22)	5,74 (± 0,06)

Tabulka 5 Vliv teploty lisovací komory na vlastnosti brikety - pístový lis

Jak ukazuje tab. 6, teplotní rozsah nastavení lisovací komory je značný v závislosti na použitém materiálu. Podle konzultací přímo s výrobcem použitého briketovacího lisu firmou NET4TRADE, s.r.o. [73], která zajišťuje vývoj a výrobu tohoto briketovacího lisu pro společnost DOBRÉ STROJE, s.r.o. [43], která tyto stroje pod stejnojmennou obchodní značkou prodává, byly hodnoty v tab. 6 zjištěny empiricky.

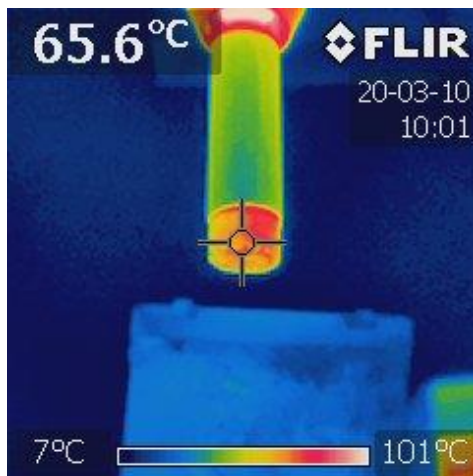
Lisovaný materiál	Doporučená teplota (od - do) [°C]	
Smolná borovice směs	140	160
Měkké dřevo	140	160
Tvrdé dřevo	190	230
Dřevní prach	200	230
Prach z lamina	210	240

Tabulka 6 Doporučené teploty lisovací komory pro jednotlivé materiály²

V průběhu chodu stroje a produkce briket, byla termokamerou FLIR I7 průběžně sledována teplota na povrchu brikety, když opouštěla tlumič vibrační stroje. Na obr. 24, respektive obr. 25, je jasně patrné, že teplota povrchu brikety je podstatně nižší než nastavená teplota topení elektrického topného tělesa. V obou případech vzorků „A“ i „B“ byl rozdíl teplot velmi zhruba o více jak 2/3 nižší (oproti nastavené nominální teplotě).

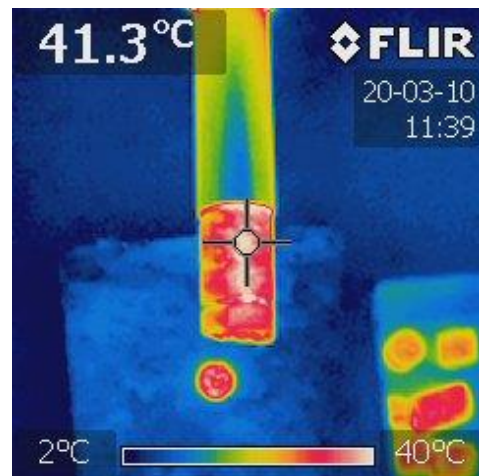
² Uvedené teploty jsou orientační a mohou být operátorem stroje upravovány podle produkce briket.

Skutečná teplota uvnitř a na povrchu brikety v lisovací komoře nebyla měřena, protože to neumožňovalo konstrukční řešení použitého briketovacího lisu.



Obrázek 24

Snímek z termo kamery - vzorek A, 230 °C



Obrázek 25

Snímek z termo kamery- vzorek B, 270 °C

Získané vzorky briket byly (v souladu s metodickým postupem) podrobeny zkouškám k zjištění jejich vlhkosti a mechanických vlastností (DU). Aritmetické průměry všech získaných výsledků jsou shrnuty do tab. 5.

V tab. 7 jsou vypočítány základní statistické míry z naměřených dat vztahujících se k vlhkosti výsledné produkce briket, které lépe statisticky popisují naměřená data. V tabulce uvedené teploty představují nastavené teploty topného tělesa lisovací komory. Hodnoty průměrů a mediánů nejsou totožné. To znamená, že data nemají normální rozdělení a jsou vychýlená od normálního rozdělení. Nicméně směrodatné odchylky vypovídají o tom, že jsou data konzistentní [50].

Vlhkost výsledné produkce briket [%] - pístový lis				
Parametr	Vzorek A		Vzorek B	
	230 °C	300 °C	270 °C	340 °C
Průměr (aritmetický)	5,95	3,92	5,36	3,19
Medián (Me)	5,88	3,90	5,40	3,20
Směrodatná odchylka (σ)	0,17	0,11	0,15	0,27
Maximum	6,30	4,10	5,50	3,50
Minimum	5,80	3,78	5,10	2,80

Tabulka 7 Statistika vlhkosti produkce briket - pístový lis

V tab. 8 jsou vypočítány základní statistické míry z naměřených dat vztahujících se k mechanickým vlastnostem výsledné produkce briket, které lépe statisticky popisují naměřená data. V tabulce uvedené teploty představují nastavené teploty topného tělesa lisovací komory. I v případě tohoto vzorku dat jsou hodnoty průměrů a mediánů odlišné. Jak už bylo řečeno, znamená to, že data nejsou normální povahy a jsou vychýlená. Směrodatné odchylky u vzorku „B“ jsou velmi nízké, data jsou tedy velmi konzistentní. U druhého materiálu (vzorku „A“) jsou sice vyšší, ale pořád vypovídají o vcelku dobré konzistenci dat [50].

DU výsledné produkce briket [%]				
Parametr	Vzorek A		Vzorek B	
	230 °C	300 °C	270 °C	340 °C
Průměr (aritmetický)	7,90	29,06	5,25	5,74
Medián (Me)	7,85	29,80	5,21	5,72
Směrodatná odchylka (σ)	0,68	1,23	0,08	0,10
Maximum	9,20	30,20	5,40	5,89
Minimum	7,68	26,90	5,19	5,60

Tabulka 8 Statistika DU produkce briket - pístový lis

Statistickými metodami lze pomocí nulových statistických hypotéz spolehlivě ověřit závislost (i její míru) mezi sledovanými soubory dat na teplotě lisovací komory pístového briketovacího lisu. Ověřovalo se to pomocí nulových hypotéz, které znamenají, že mezi proměnnými není vztah [50].

Statistická hypotéza 1: Vlhkost výsledné produkce briket briketovacího lisu Profilis HOME je závislá na teplotě jeho lisovací komory.

Vzhledem k povaze dat byla použita neparametrická varianta analýzy rozptylu, tedy Kruskal-Wallisův test, výsledek testu výstupu z programu SPSS je v tab. 9.

Hypothesis Test Summary				
	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Vlhkost (%) - pístový lis is the same across categories of Teplota (°C) - pístový lis.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	,001	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is ,05.

Tabulka 9 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 1

Výsledek Kruskal-Wallisova test je vysoce signifikantní (na hladině 1%) lze tedy zamítnout nulovou hypotézu nezávislosti a je tak prokázáno, že mezi proměnnými daty je vztah. Síla vztahu byla nadále ověřena Friedmanovým testem a koeficientem Kendallova W (tab. 10). Test Kendallova W vyžaduje pro své provedení vlastní ověřování platnosti

nulové hypotézy, když tedy vyjde Friedmanův test signifikantní, znamená to, že statistická spolehlivost testu je velmi vysoká. V tomto případě je dokonce signifikance nižší než 1 %, test lze tedy považovat za velmi spolehlivý a je tak prokázáno, že mezi proměnnými je vztah [50].

Friedmanův test		Kendallův koeficient konkordance	
N	19	N	19
Chi-Kvadrát	19,000	Kendalovo W	1,000
Stupně volnosti	1	Chi-Kvadrát	19,000
Asymptotická signifikance	0,003	Stupně volnosti	1
		Asymptotická signifikance	0,004

Tabulka 10 Testové statistiky - statistická hypotéza 1

Signifikance testu pod 1% ukazuje na vysokou spolehlivost koeficientu. Test nabývá v tomto případě své nejvyšší hodnoty. To znamená, že **vlhkost výsledné produkce briket briketovacího lisu Profilis HOME je závislá na teplotě jeho lisovací komory** [50]. Z výsledků laboratorního měření lze usuzovat, že s rostoucí teplotou lisovací komory, se snižuje vlhkost výsledné produkce briket pístového briketovacího lisu.

Statistická hypotéza 2: Mechanické vlastnosti (DU) výsledné produkce briket briketovacího lisu Profilis HOME jsou závislé na teplotě jeho lisovací komory

Vzhledem k povaze naměřených dat byla použita neparametrická varianta analýzy rozptylu (Kruskal-Wallisův test), výsledek testu v podobě výstupu z programu SPSS je v tab. 11.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of DU (%) - pístový lis is the same across categories of Teplota (°C) - pístový lis.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	,001	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is ,05.

Tabulka 11 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 2

Výsledek Kruskal-Wallisova testu je vysoce signifikantní, tedy na hladině 1 %, lze tedy zamítnout nulovou hypotézu nezávislosti a je tak prokázáno, že mezi proměnnými daty je vztah. Síla vztahu byla nadále ověřena Friedmanovým testem a koeficientem Kendallova W (tab. 12). Test Kendallova W vyžaduje pro své provedení vlastní ověřování platnosti nulové hypotézy, když tedy vyjde Friedmanův test signifikantní, znamená to, že statistická spolehlivost testu je velmi vysoká. I v tomto případě je signifikance nižší než 1 %, test lze považovat za velmi spolehlivý a je tak prokázáno, že mezi proměnnými je vztah [50].

Friedmanův test		Kendallův koeficient konkordance	
N	21	N	21
Chi-Kvadrát	9,800	Kendalovo W	1,000
Stupně volnosti	1	Chi-Kvadrát	9,800
Asymptotická signifikance	0,002	Stupně volnosti	1
		Asymptotická signifikance	0,002

Tabulka 12 Testové statistiky - statistická hypotéza 2

Signifikance testu pod 1 % ukazuje na vysokou spolehlivost koeficientu. Test nabývá i v tomto případě své nejvyšší hodnoty, lze tedy přijmout závěr, že **mechanické vlastnosti (DU) výsledné produkce briket briketovacího lisu Profilis HOME jsou závislé na teplotě jeho lisovací komory** [50]. Z laboratorního měření vyplývá, že DU produkce briket se při zvyšující se teplotě zlepšují.

10.2 Vliv teploty lisovací komory - šneková konstrukce briketovacího lisu

Z důvodů popsaných v úvodu této kapitoly, provozní měření probíhalo ve výrobním areálu firmy Dřevo-prodej.cz [44], který se nachází v obci Sovadina, nedaleko Bystřice pod Hostýnem. Samotné měření probíhalo na stroji, který je součástí technologické linky, která zahrnuje dopravu materiálu do násypky stroje, automatické dělení briket kotoučovou pilou a též poloautomatickou balicí linku. Z těchto důvodů mělo provozní měření některá technologická omezení, se kterými bylo nutno se vypořádat.

Měření probíhalo při částečné technologické odstávce výrobní linky. Hlavním omezením byla nemožnost změny vstupního briketovaného materiálu, a to právě díky šnekovému dopravníkovému systému, který plní násypku stroje, což je dobře patrné z obr. 26. To je důvod, proč byl jako vstupní briketovaný materiál zvolen materiál, který svým složením odpovídal vzorku „A“ (tab. 5) - dřevní hmota (hoblina dubové, bukové a smrkové). Dalším důvodem byla návaznost na principiálně podobné měření provedené v podkapitole 10.1. Před započítáním měření byly odebrány vzorky vstupního briketovaného materiálu a v souladu s metodickým postupem (podkapitola 7.2.3) byla stanovena jejich vlhkost, která je uvedena v tab. 13.



Obrázek 26 Šnekový briketovací lis v provozu

Samotné provozní měření pak probíhalo následovně. Násypka stroje byla pomocí šnekového dopravníku naplněna vstupním briketovaným materiálem. Následně byl stroj spuštěn s nastavenou teplotou topného tělesa lisovací komory (tzv. egalizací) na 240 °C. V tomto režimu byl spuštěn po dobu 25 minut. To je doba dostatečná k provozní inicializaci a produkci kvalitativně dostatečných briket. Po uplynutí této doby se teplota egalizace snížila na 215 °C (jedná se o obsluhu empiricky zjištěnou teplotu pro tento druh materiálu). Stroj dále v tomto režimu nastavení pracoval dalších 10 min. Poté se začala oddělovat produkce briket. Tímto způsobem bylo provedeno deset měření, přičemž při každém z nich bylo vyprodukováno 20 kg briket. Následně bylo přistoupeno ke zvýšení teploty egalizace o 9 °C na 224 °C. Tato teplota byla zvolena jako maximálně provozně

možná, jelikož při nastavení vyšší teploty lisovací komory začal povrch silně karbonovat, tím se zvýšilo tření a teplota nadále rostla a hrozilo nebezpečí vznícení a následného požáru. V tomto provozním nastavení stroje byl stroj v provozu 10 min (kvůli stabilizaci a vyrovnaní teplot). Následně bylo při tomto nastavení provedeno deset měření. Při každém z nich bylo vyprodukováno rovněž 20 kg briket.

Jelikož z principu práce šnekového briketovacího lisu se jedná o výrobu kontinuální, nebylo možno termokamerou FLIR I7 průběžně měřit teplotu na povrchu brikety, když opouštěly matrici stroje. Úst'ová rychlost může totiž dosahovat až $5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zmíněná termokamera nedisponuje dostatečnou snímkovací frekvencí k pořízení ostrého obrazu s naměřeným teplotním údajem.

Získané vzorky briket byly (v souladu s metodickým postupem) podrobeny zkouškám k zjištění jejich vlhkosti a mechanických vlastností produkce briket (DU). Aritmetické průměry všech získaných výsledků jsou shrnuty do tab. 13.

Materiál	Teplota egalizace	Hustota výsledných briket [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Vlhkost [%]		Mechanická odolnost briket [%]
			Vstupního materiálu	Briket	
Dřevní hmota (hoblíny; směs dub, buk, smrk)	215 °C	1017,6 (± 25,1)	9,29 (± 0,47)	7.18 (± 0,67)	97.47 (± 0,32)
	224 °C	1021,1 (± 24,3)		6.64 (± 0,77)	98,34 (± 0,27)

Tabulka 13 Vliv teploty lisovací komory na vlastnosti brikety - šnekový lis

V tab. 14 jsou vypočítány základní statistické míry z naměřených dat vztahujících se k vlhkosti výsledné produkce briket, které lépe statisticky popisují naměřená data. V tabulce uvedené teploty představují nastavené teploty topného tělesa lisovací komory (egalizace). Hodnoty průměrů a mediánů nejsou totožné. To znamená, že data nejsou normální a jsou vychýlená. Nicméně směrodatné odchylky vypovídají o tom, že jsou data konzistentní [50].

Vlhkost výsledné produkce briket [%] - šnekový lis		
Parametr	215 °C	224 °C
Průměr (aritmetický)	7,18	6,64
Medián (Me)	7,21	6,84
Směrodatná odchylka (σ)	0,09	0,39
Maximum	7,28	6,00
Minimum	7,00	7,00

Tabulka 14 Statistika vlhkosti produkce briket - šnekový lis

V tab. 15 jsou vypočítány základní statistické míry z naměřených dat vztahujících se k mechanickým vlastnostem výsledné produkce briket, které lépe statisticky popisují naměřená data. V tabulce uvedené teploty představují nastavené teploty topného tělesa lisovací komory (egalizace). Hodnoty průměrů a mediánů nejsou totožné. To znamená, že data nejsou normální povahy a jsou vychýlená. Nicméně směrodatné odchylky vypovídají o tom, že jsou data velmi konzistentní [50].

DU výsledné briкеты [%]		
Parametr	215 °C	224 °C
Průměr (aritmetický)	97,47	98,34
Medián (Me)	97,53	98,35
Směrodatná odchylka (σ)	0,52	0,44
Maximum	98,00	99,00
Minimum	96,40	97,66

Tabulka 15 Statistika DU produkce briket - šnekový lis

I v tomto případě bylo použito statistických metod, které pomocí nulových statistických hypotéz mohou spolehlivě prokázat závislost (její míru) mezi sledovanými soubory dat (teplotou lisovací komory šnekového briketovacího lisu a vlhkostí, respektive

mechanickými vlastnostmi výsledné produkce briket). Toto ověřování bylo realizováno pomocí nulových hypotéz, které znamenají, že mezi proměnnými není vztah [50].

Statistická hypotéza 3: Vlhkost výsledné produkce briket šnekového briketovacího lisu je závislá na teplotě jeho lisovací komory.

Vzhledem ke zjištěné povaze naměřených dat byla použita neparametrická varianta analýzy rozptylu (Kruskal-Wallisův test) výsledek testu, respektive výstupu z programu SPSS je tab. 16.

Hypothesis Test Summary				
	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of Vlhkost (%) - šnekový lis is the same across categories of Teplota (°C) - šnekový lis.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	,006	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is ,05.

Tabulka 16 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 3

Výsledek Kruskal-Wallisova testu je vysoce signifikantní (na hladině 1 %), je proto možné zamítnout nulovou hypotézu nezávislosti a je tak prokázáno, že mezi proměnnými daty je vztah. Síla vztahu byla nadále ověřena Friedmanovým testem a koeficientem Kendallova W (tab. 17). Test Kendallova W vyžaduje pro své provedení vlastní ověřování platnosti nulové hypotézy, když tedy vyjde Friedmanův test signifikantní, znamená to, že statistická spolehlivost testu je velmi vysoká. I v tomto případě je signifikance nižší než 1 %, test lze považovat za velmi spolehlivý a je tak prokázáno, že mezi proměnnými je vztah [50].

Friedmanův test		Kendallův koeficient konkordance	
N	17	N	21
Chi-Kvadrát	17,000	Kendalovo W	1,000
Stupně volnosti	1	Chi-Kvadrát	17,000
Asymptotická signifikance	0,001	Stupně volnosti	1
		Asymptotická signifikance	0,002

Tabulka 17 Testové statistiky - statistická hypotéza 3

Signifikance testu je opět pod 1 %, což ukazuje na vysokou spolehlivost koeficientu. Test nabývá i v tomto případě své nejvyšší hodnoty, lze tedy přijmout závěr, že **vlhkost výsledné produkce briket šnekového briketovacího lisu je závislá na teplotě jeho lisovací komory** [50]. Z výsledků provozního měření lze usuzovat, že s rostoucí teplotou lisovací komory šnekového briketovacího lisu se snižuje vlhkost výsledné produkce briket.

Statistická hypotéza 4: Mechanické vlastnosti (DU) výsledné produkce briket šnekového briketovacího lisu jsou závislé na teplotě jeho lisovací komory

I v tomto případě si povaha dat vyžádala použití neparametrické varianty analýzy rozptylu (Kruskal-Wallisův test), výsledek testu v podobě výstupu z programu SPSS je v tab. 18.

	Null Hypothesis	Test	Sig.	Decision
1	The distribution of DU (%) - šnekový lis is the same across categories of Teplota (°C) - šnekový lis.	Independent-Samples Kruskal-Wallis Test	.001	Reject the null hypothesis.

Asymptotic significances are displayed. The significance level is .05.

Tabulka 18 Kruskal-Wallisův test, statistická hypotéza 4

Výsledek Kruskal-Wallisova testu je i v tomto případě vysoce signifikantní, tedy na hladině 1 %, lze tedy zamítnout nulovou hypotézu nezávislosti a je tak prokázáno, že mezi proměnnými daty je vztah. Síla vztahu byla též, jako u předešlých výpočtů, ověřena Friedmanovým testem a koeficientem Kendallova W (tab. 19). Test Kendallova W vyžaduje pro své provedení vlastní ověřování platnosti nulové hypotézy, když tedy vyjde Friedmanův test signifikantní, znamená to, že statistická spolehlivost testu je velmi vysoká. I v tomto případě je signifikance nižší než 1 %, test lze považovat za velmi spolehlivý a je tak prokázáno, že mezi proměnnými je vztah [50].

Friedmanův test		Kendallův koeficient konkordance	
N	17	N	17
Chi-Kvadrát	18,000	Kendalovo W	1,000
Stupně volnosti	1	Chi-Kvadrát	18,000
Asymptotická signifikance	0,001	Stupně volnosti	1
		Asymptotická signifikance	0,005

Tabulka 19 Testové statistiky - statistická hypotéza 4

Signifikance testu pod 1 % ukazuje na vysokou spolehlivost koeficientu. Test nabývá i v tomto případě své nejvyšší hodnoty, lze tedy přijmout závěr, že **mechanické vlastnosti (DU) výsledné produkce briket šnekového briketovacího lisu jsou závislé na teplotě jeho lisovací komory** [50]. Ze získaných dat je jasné, že mechanické vlastnosti produkce briket se zlepšují se stoupající teplotou lisovací komory šnekového briketovacího lisu.

11 STAVEBNÍ ODPAD

Po vyhodnocení poznatků z vědecké literatury a požadavků praxe, byly v souladu s metodikou (podkapitola 7.1.1) zvoleny dva materiály:

- Cihelný obrus
- Odpad ze sádkartonu

V souladu s metodikou práce (viz podkapitoly 7.4 a 7.5) byla u každého ze dvou zvolených materiálů provedena série kompresních testů, které měly za úkol zjistit závislost mezi dráhou plunžru laboratorního briketovacího lisu a působící silou, na tom základě byla následně vypočítána potřebná práce E_d [J]. Dále toto laboratorní měření mělo prokázat schopnost a vhodnost materiálu pro zpracování technologií briketování.

11.1 Cihelný obrus - kompresní test

Vzorky cihelného obrusu se zrnitostí 0,002 mm až 0,1 mm, byly očíslovány a objemově smíchány s vybranými přidanými materiály (přísadami), a to podle tab. 20. Přidané materiály (přísady) splňovaly touto prací stanovená kritéria (podkapitola 7.1.1), přičemž bylo reflektováno, aby přidané materiály potencionálně nezhoršily nebo negativně neovlivnily vlastnosti výsledné brikety s ohledem na její potenciální využití jako sekundárního materiálu. Celkem bylo provedeno deset měření od každého z připravených vzorků č. 1 až 5 (směrodatné odchylna z těchto měření jsou uvedené v tab. 21).

Číslo vzorku	Cihelného obrus [%]	Přísada	Obsah přísad [%]	σ
1	100 %	XXX	0	0,12
2	30,5	Odpadní papír	69,5	0,13
3	85,5	Dřevěný prach (velikost zrna 0,002 - 0,1 mm)	14,5	0,04
4	85,5	Papírový skart (frakce 4x10 mm)	14,5	0,14
5	94,5	Melasa + odpadní a technologické nečistoty	5,5	0,29

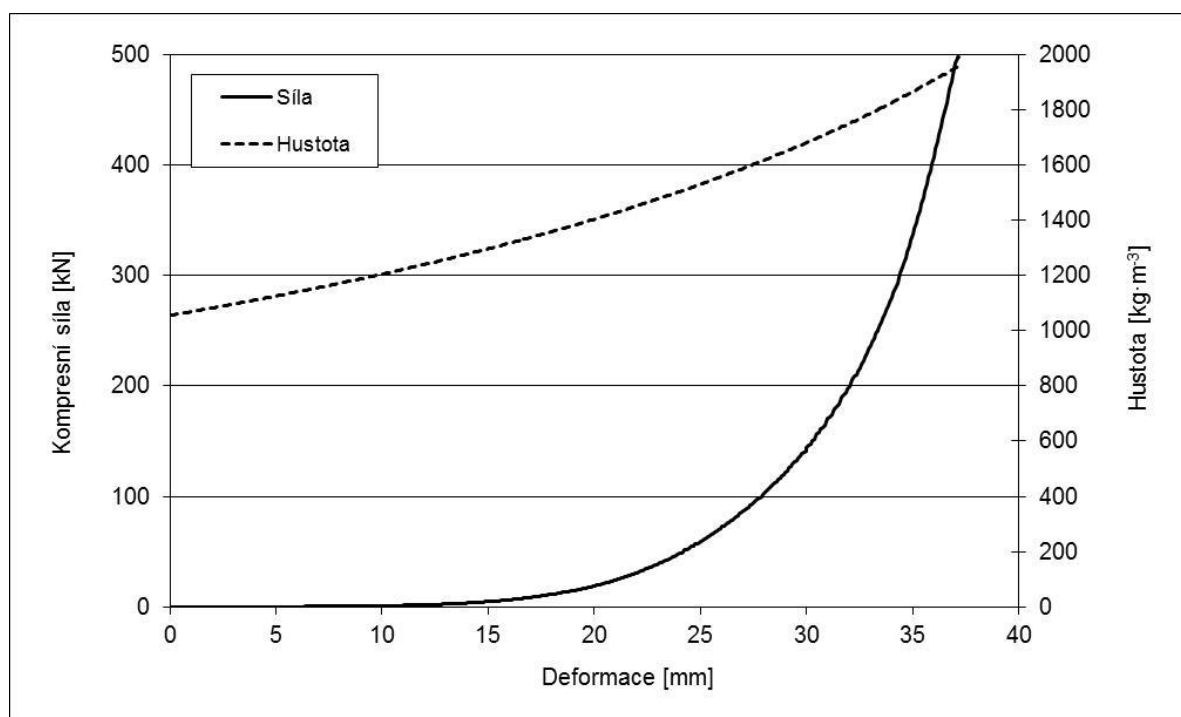
Tabulka 20 Směs a označení zkoumaných vzorků - cihelný obrus

Výsledkem měření byla ve všech případech vizuálně homogenní briketa (obr. 27) a zjištěná závislost síly, hustoty a energie na dráze pístu, respektive plunžru laboratorního lisu, jak ukazuje obr. 28 (jedná se o aritmetický průměr deseti provedených měření vzorku č. 1).

Jedním z podstatných výsledků laboratorního měření je fakt, že hodnoty získané kompresním testem se v zásadě nelišily a je tedy možné prohlásit, že vliv druhu a objemový poměr přidaného materiálu měly na výsledky zanedbatelný vliv.



Obrázek 27 Briketa - cihelný obrus, vzorek č.1



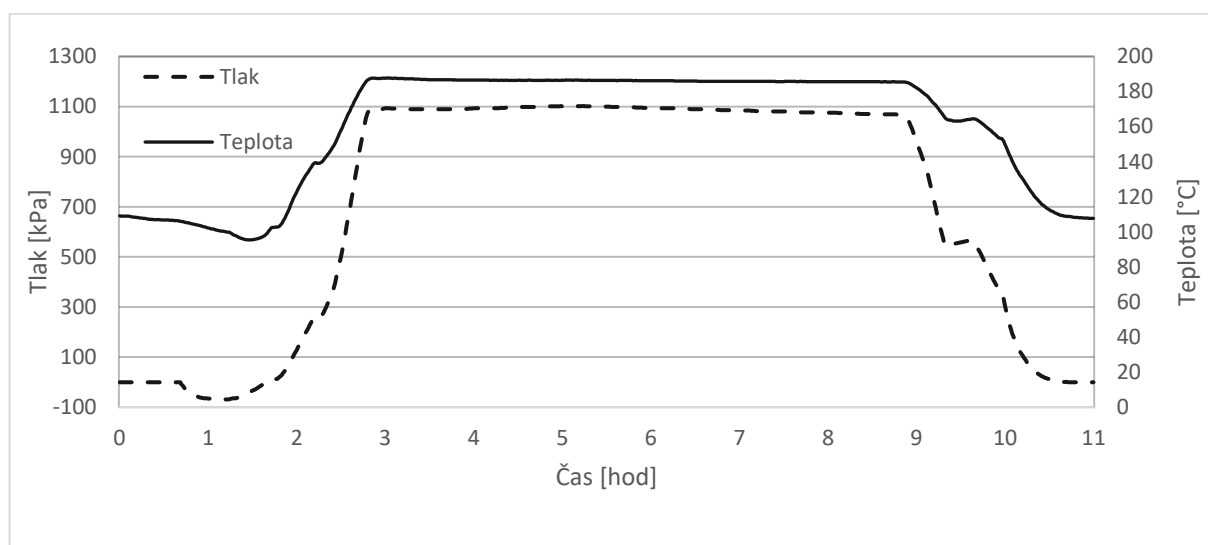
Obrázek 28 Závislost síly a hustoty na kompresní síle, cihelný obrus, vzorek. č.1

Aplikací technologie briketování na cihelný obrus dojde k efektivnímu stlačení cihelného obrusu. To má za následek zkompaktnění jinak prašného materiálu, což s sebou přináší zásadní technologické, ekologické i zdravotní benefity, jako např. výrazné snížení prašnosti při přepravě do skládkového úložiště nebo v rámci cihlářského provozu jako takového.

Dále se otevírají možnosti sekundárního využití této brikety v jiných odvětvích, a to i v zemědělství. Po vytvoření vhodné směsi s odpadním papírem, nebo jinou odpadní hmotou, je možné uvažovat o aplikaci briket jako doplňku podestýlky domácích zvířat nebo jako vylehčení substrátů kaktusů apod. Zpracování cihelného obrusu briketováním představuje zcela nový přístup, a to tak není vyloučeno, že se na tomto základě v budoucnu objeví další aplikace, které nyní nelze předvídat. Ve stavebnictví pak lze uvažovat o využití briket jako doplňku podloží málo zatěžovaných pochozích komunikací a chodníků [63].

Zajímavým podnětem vzešlým z akademické sféry bylo, po dalším zpracování technologií autoklávování, položit základ úplně nového stavebně konstrukčního materiálu na bázi porobetonových pískových tvárníc. Jelikož výroba porobetonu není v rámci České republiky věc rozšířená, byla navázána spolupráce s firmou Xella CZ, s.r.o. [97], která v tuzemsku vyrábí porobetonové tvárnice obchodní značky YTONG a XELLA. Firemní výrobní závod v lokalitě Horní Počaply disponuje několika autoklávovacími jednotkami. Podnik poskytl kromě své technologie pro provedení provozního experimentu, také „know-how“, na základě kterého byly připraveny zkušební vzorky. Celkem bylo připraveno deset briket (hmotnosti 120 g, $\pm 10\%$) z cihelného obrusu křemičitého písku a nehašeného (tzv. „vzdušného“) vápna CL90 Q s obsahem CaO 93 %, podle ČSN EN 459-1 [41] v poměru 4:1:2. Poměr a složení bylo zvoleno ze zřetelem k předpokladu, že tobermorit (minerál, který poskytuje porobetonovým výrobkům jejich mechanické vlastnosti, a který vzniká zejména právě rozpustností křemičitého písku při hydrotermálním působení teplot kolem 180 °C) v kombinaci se vzdušným vápnem by mohl zaručit zlepšené mechanické vlastnosti briket. Takto připravené vzorky briket byly autoklávovány.

Průběh teploty a tlaku po dobu autoklávování zkušebních vzorků je graficky vyjádřen na obr. 29. Jelikož se jednalo první provozní zkoušku svého druhu, která byla založená pouze na teoretickém předpokladu, byly pro proces autoklávování zvoleny standardní podmínky [45], které se využívají pro výrobu porobetonových tvárníc, např. i značky YTONG. To v tomto případě znamená dobu autoklávování 11 hodin, při izotermní výdrži na stanoveném tlaku a teplotě po dobu 6 hodin. Tlak při výdrži se pohyboval na úrovni 1 100 kPa a teplota na úrovni 190 °C.



Obrázek 29 Proces autoklávování - cihelný obrus³

Výsledek tohoto experimentu však nebyl přesvědčivý. Mechanické vlastnosti nebylo možné posoudit, jelikož došlo k částečné desintegraci zkušebních vzorků, což znemožňovalo provedení potřebných měření k určení mechanických či fyzikálních vlastností briket. K tomu mohlo dojít vlivem neoptimálně zvoleného poměru vstupních surovin, nebo absenci některých dalších surovin, které jsou do výrobků na pórobetonovém základě přidávány (např. hliníkového prášku či cementu). V této oblasti by bylo zapotřebí podniknout rozsáhlé výpočty, simulace a testování, které je ovšem nad časové, finanční, technické i organizační možnosti.

Prezentované výsledky laboratorního měření (i provozní zkoušky) slibují přes to natolik zajímavé a perspektivní uplatnění v praxi, že bylo rozhodnuto o jejich duševní

³ Tato data jsou technologickým vlastnictvím firmy Xella CZ, s.r.o. [97]

ochraně v podobě zaregistrování užitého vzoru u příslušné autority v rámci České republiky.

Užitný vzor pod číslem 33 356 byl u Úřadu pro průmyslové vlastnictví zapsán dne 5.11.2019. Plné změny tohoto užitého vzoru je v příloze č. 3 tohoto dokumentu.

11.1.1 Cihelný obrus - energetická náročnost

Na základě provedených kompresních testů a jejich výsledků, kdy se naměřená data lišila zanedbatelně, bylo přistoupeno k provedení kompresního testu pouze cihelného obrusu o dvou frakcích. Vzorek č. 1.1 obsahoval cihelný obrus s frakcí 0,002 - 0,1 mm a vzorek č. 2.1 obsahoval cihelný obrus se stejnou frakcí, ovšem dále byl jeho objem z cca 10 % tvořen úlomky z broušených polotovarů. O každého ze vzorků bylo provedeno deset měření. Výsledky každého ze dvou zkoumaných vzorků (č. 1.1 a 2.1) byly následně matematicky zpracovány podle počítačového algoritmu uvedeného v podkapitole 7.4 a byl vypočítán aritmetický průměr. Hodnoty vynaložené práce E_d [J] jsou uvedeny v tab. 21.

Vzorek číslo	Složení	Frakce	Vynaložená práce E_d [J]
1.1	Cihelný obrus	0,002 - 0,1 mm	3959
2.1	Cihelný obrus	0,002 - 0,1 mm + 10% úlomky cihel 1 - 7 mm.	4138

Tabulka 21 Výsledek kompresního testu - cihelný obrus

Z výsledků je jasně patrné, že došlo k navýšení potřeby vynaložené práce o 179 J v neprospěch vzorku č. 2.1. Tento fakt může být vysvětlen tím, že rozdíl ve spotřebované práci byl spotřebován na rozmělnění úlomků cihel, které vzorek obsahoval. Zároveň však je možné konstatovat, že takto malý rozdíl má z hlediska spotřebované práce prakticky nulový význam.

11.2 Odpad ze sádrokartonu - kompresní test

Pro laboratorní měření byl získán demoliční odpad ze sádrokartonových desek, který pocházel z rekonstrukce rodinného domu. Pro účely laboratorního měření bylo

nejprve nutné důsledně roztřídit a homogenizovat jeho frakci, a to podle metodiky popsané v podkapitole 7.1.2. Této fázi bylo nutno věnovat zvýšenou pozornost, jelikož získaný demoliční odpad byl v tzv. „surovém stavu přímo ze staveniště“ a tudíž neprošel žádným předchozím zpracováním. Následně byly vytvořeny dvě sady vzorků o různém poměrovém složení papírové a sádrové složky (tab. 22). Celkem bylo provedeno deset měření od každého ze vzorků č. 1 a č. 2. (směrodatné odchylky jsou uvedeny v tab. 22).

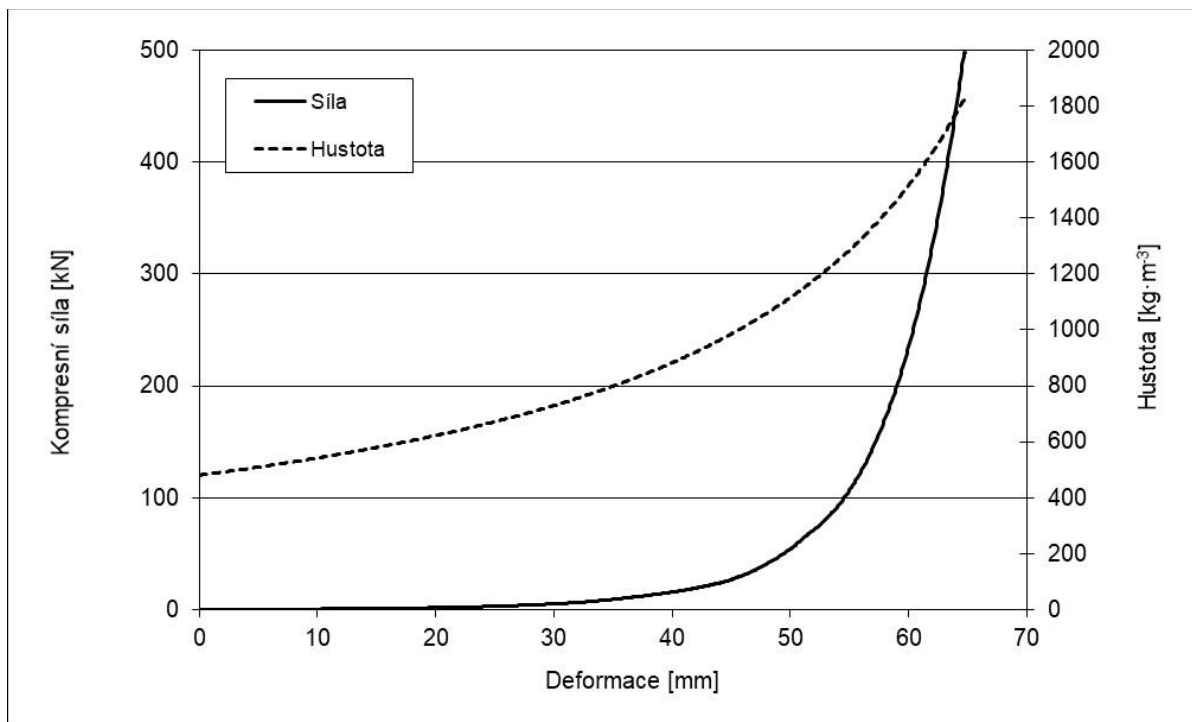
Vzorek číslo	Složení	Frakce [mm]	σ
1	Nejméně 50 % papírové složky	0,2 - 5,0	0,15
2	Nejméně 70 % papírové složky	0,2 - 5,0	0,25

Tabulka 22 Složení vzorků, sádrokartonový odpad

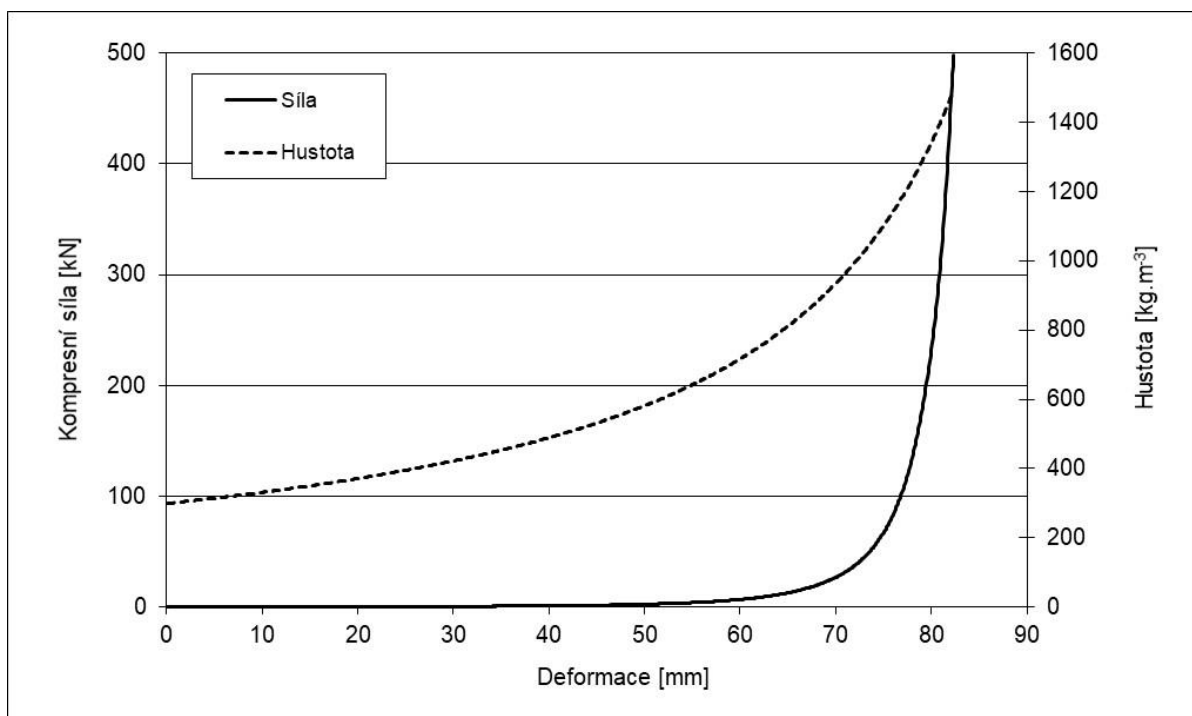
Výsledkem měření byla, jako v případě cihelného obrusu v podkapitole 11.1, ve všech případech vizuálně homogenní briketa (obr. 30). Na obr. 31 je graficky znázorněna zjištěná závislost síly na dráze plunžru laboratorního lisu (hodnoty představují aritmetický průměr všech provedených deseti měření vzorku č. 1). Na obr. 32 je poté grafické znázorněn výsledek kompresního testu u vzorku č. 2 (hodnoty představují aritmetický průměr všech provedených deseti měření).



Obrázek 30 Briketa - sádrokartonový odpad, vzorek č. 1



Obrázek 31 Závislost síly a hustoty na kompresní síle, sádrokartonový odpad, vzorek. č.1



Obrázek 32 Závislost síly a hustoty na kompresní síle, sádrokartonový odpad, vzorek. č.2

V rámci výše popsané nutné precizní přípravy získaného demoličního odpadu pro účely tohoto laboratorního měření, byla navázána spolupráce s podnikem Lavaris, s.r.o. [61] Tato firma se kromě projekční a konzultační činnosti, zabývá vývojem a výrobou recyklačních linek a vysokorychlostních mlýnů. Firma má značný inovační přístup a hodlá se v rámci svého rozvoje zaměřit i na technologii briketování a peletování netradičních materiálů za účelem vývoje nových ekologicky přívětivých výrobků. V současné době jsou finišovány práce spojené s testy nasákavosti briket vzorku č. 1 vzorku a č. 2 (typického složení) za účelem využití briket ze sádrokartonového odpadu k retenci vody u rostlin v písčítých půdách. V této souvislosti je ve spolupráci s firmou Lavaris, s.r.o. [61] plánována účast v prestižní soutěži, která je vyhlášována Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR s názvem „Turning waste into resources“. Cílem této soutěže je zvýšit povědomí o zpracování odpad u odborné i široké laické veřejnosti, tak navrhnout inovativní řešení, které přemění odpad v surovinu. Proto je tato soutěž rozdělena do pěti kategorií. Jsou hodnoceny inovativní projekty z této oblasti v rámci řešení bakalářských, diplomových a disertačních prací [69].

11.2.1 Sádrokartonový odpad - energetická náročnost

Na základě provedených kompresních testů a jejich výsledků bylo v souvislosti s briketováním cihelného obrusu popsaného v podkapitole 11.1.1 přistoupeno k provedení kompresních testů a následných výpočtů za účelem zjištění vynaložené práce E_d [J]. K tomu účelu byl využit sestavený počítačový algoritmus uvedeného v podkapitole 7.4, ze získaných hodnot byl vypočítán aritmetický průměr.

Výsledná hodnota vynaložené práce k výrobě brikety požadované hustoty E_1 pro soubor vzorků odpovídajícím svým složením vzorku č. 1 (tab. 22) byla zjištěna $E_1 = 3\,459$ J a vynaložená práce E_2 pro soubor vzorků odpovídajícím svým složením vzorku č. 2 (tab. 22) pak $E_2 = 3\,423$ J. Z výsledků je patrné vzorek č. 1 vykázal o 36 J větší spotřebovanou práci než vzorek č. 2. To lze vysvětlit menším zastoupením papírové složky obsažené v tomto vzorku.

12 ZÁVĚR A DISKUZE

Výsledky provozních a laboratorních měření prokázaly, že technologie briketování je energeticky náročná. Na základě všech v práci představených výsledků lze konstatovat, že v případě zkoumaných vstupních briketovaných materiálů hraje, z hlediska energetické náročnosti celého briketovacího strojního zařízení, jen nepatrnou roli a je tedy možné jeho volbu z hlediska energetické náročnosti považovat za nepodstatnou. Z hlediska nastavení použitých briketovacích lisů obecně, však naopak hrají použité vstupní briketované materiály poměrně zásadní roli. Optimální nastavení teploty elektrického přehřevu briketovací komory, a tím zvýšení kvality produkce briket, v kombinaci s materiálem, který vykazuje menší nároky na spotřebu elektrické energie, pak může dojít k optimalizaci výroby z hlediska vstupního materiálu a tím i k jistým ekonomickým úsporám, které lze ovšem jen velmi obtížně obecně vyčíslit, jelikož jsou závislé na celé řadě konkrétních faktorů (od použitého briketovacího lisu až po mzdové náklady).

12.1 První cíl

V rámci splnění tohoto vytyčeného cíle přinesla práce zajímavé poznatky, jelikož v dostupné vědecké literatuře dosud nebylo na spotřebu elektrické energie briketovacího lisu nahlíženo tímto způsobem a nebyly z tohoto hlediska posouzeny vybrané materiály. Některé studie zkoumají dřevní odpad [95] v kontextu procesu celé výrobní linky, tedy včetně např. sušení či dalšího zpracování. Jiné studie prováděly podobné měření s použitím hydraulického šnekového lisu [75]. V podmínkách zpracování odpadu technologií briketování v České republice se ukazuje účelnější zpracovávat odpad přímo v místě jeho vzniku, kde má již často přijatelnou vlhkost i frakci, proto další technologické operace zcela odpadají. Navíc pístové hydraulické lisy jsou z hlediska strojového parku v průmyslové praxi České republiky zastoupeny výrazně více. Přínos provedeného měření je tak nejenom hlediska teoretického, ale i praktického. Provedený ekonomický rozbor ukázal, že rozdíly v nákladech na elektrickou energii potřebnou k briketování vybraných materiálů na použitém briketovacím lisu jsou z hlediska celkových nákladů na provoz briketovacího lisu ne příliš významné. Dalším významným faktorem, kterému se odborná

literatura věnuje, je možnost substituce zdrojů standardních fosilních paliv za biomasu zpracovanou technologií briketování z pohledu energetické náročnosti v návaznosti na dostupnost zdrojů a náklady na dopravu v celém kontextu [83]. Takovéto relativně komplexní výzkumy představují trend v moderním komplexně pojatém energetickém mixu a ukazují, že je nutno se na složité vědecké problémy dívat v celém jejich komplexu.

Na základě výsledků shrnutých v podkapitole 8.1 lze tedy konstatovat, že spotřeba elektrické energie briketovacího zařízení je závislá na vstupním briketovaném materiálu (z hlediska vybraných vstupních lisovaných materiálů). Je však nutné poznamenat, že rozdíly ve spotřebě elektrické energie mezi jednotlivými zkoumanými materiály se ukázaly být z ekonomického hlediska jako nepříliš významné.

12.1.1 Dílčí cíl prvního cíle

Ve vědecké literatuře je často diskutován vztah mezi objemovou hustotou brikety [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] a vynaloženou prací E_d [J] [23]. Je však nutné ho z hlediska optimalizace energetické náročnosti technologie briketování zasadit do kontextu. Provedené laboratorní měření a srovnání výsledných vzorků s průmyslově vyráběnými briketami ukázalo, energetickou náročnost třech kovových odpadních materiálů (definovaného zpracování a průřezu), které jsou v podmínkách České republiky nejčastěji zpracovávány do podoby briket. Výsledky potvrdily, že energeticky nejnáročnější je briketování ocelových třísek. Ocelové třísky (a kovový odpad obecně) je zároveň jedinou komoditou, kterou je de facto možno získat jako vstupní briketovaný materiál burzovním způsobem, a tím i spekulovat na její cenu a získat tak ekonomický profit, který převyší zvýšené náklady energetické, které je nutno vynaložit na jeho zpracování technologií briketování.

12.2 Druhý cíl

Stanovení optimální teploty elektrického topného tělesa použitých briketovacích lisů se v průběhu realizovaných měření ukázalo být jako úkol náročný, který vychází velmi často jen ze zkušenosti výrobce či operátora stroje. Přesto je z průběhu provedených laboratorních a provozních experimentů a z následného vyhodnocení naměřených dat možné stanovit závěry z hlediska návrhu teploty lisovací komory. Byly provedeny

laboratorní experimenty s modelem briketovacího lisu pro výrobu briket se čtvercovým průřezem, které disponovaly vyhřívanou maticí [32]. Tyto vědecké experimenty prokázaly jistý vztah mezi teplotou lisovací komory a výslednou kvalitou briket. Nepostihovaly však průmyslově vyráběné briketovací lisy a technické a technologické faktory průmyslové výroby briket. Dále je nutno zmínit experimenty s předeheřevem vstupního lisovaného materiálu, které ukázaly, že kvalita výsledné produkce briket s předeheřevem vstupního lisovaného materiálu i bez něj byla více méně podobná [62]. Proto lze, i vzhledem k závěru experimentů v této práci představeným, říci, že technologie elektrického ohřevu lisovací komory briketovacího lisu se jeví být jako technicky i ekonomicky výhodná.

Z hlediska pístového briketovacího lisu, se ukazuje, že vyšší teplota lisovací komory dává velmi významné zlepšení kvality produkce briket jako celku. Jako hraniční se ukázala být teplota 360 °C, kdy již docházelo ke značné karbonizaci briket a nebezpečí jejich vznícení a následného požáru. U šnekových briketovacích lisů se jako hraniční ukázala (v rámci provedených experimentů) být teplota 230 °C, nad ni již docházelo k podobným jevům jako v případě pístového lisu (tzn. silná karbonizace, dým a možnost vzplanutí).

Výsledky provedeného laboratorního a provozního měření zkoumaných materiálů a jejich následné statistické zpracování prokázaly, že existuje závislost mezi teplotou lisovací komory a výslednými mechanickými vlastnostmi briket a též že existuje závislost mezi teplotou lisovací komory a výslednou vlhkostí produkce briket.

Je nutno poznamenat, že laboratorní briketovací lis Profilis HOME není zařízení optimálních technických charakteristik a jeho výkonnost i produkce briket tomu odpovídá a není z hlediska kvality produkovaných briket úplně optimálním řešením ani pro domácí použití. Získané výsledky jsou však natolik přesvědčivé a průkazné, že lze tomuto faktu přisoudit nepříliš velký význam.

12.3 Třetí cíl

Aplikace technologie briketování na netradiční materiály (pro energetické i neenergetické využití) není ničím novým. V současné době jsou relativně běžně pro briketování používány hutní odpady či odpady z koksového prachu [7]. Z pohledu uplatnění technologie briketování ve stavebním odvětví je možné konstatovat, že se jedná o zcela nový způsob technického řešení zpracování stavebního a demoličního odpadu, který snese ve svých základních rysech srovnání snad jen s briketováním zmíněných hutních odpadů [47]. Přesto se v rámci naplnění toho dílčího cíle práce podařilo identifikovat dva úplně nové materiály pro briketování (cihelný obrus a sádrokartonový odpad), navrhnout a částečně experimentálně ověřit možnosti jejich dalšího uplatnění. Společným zjištěným znakem obou materiálů je fakt, že k jejich zbriketování je potřeba vyvinout potřebný tlak, aby výsledné brikety byly dostatečně homogenní.

V případě cihelného obrusu jsou klíčové zejména finanční úspory spojené se zmenšením objemu. Zmenšení objemu umožní transport většího množství cihelného obrusu bez nutnosti jeho skladování ve speciálních k tomu určených kontejnerech. Další uplatnění by takové brikety mohly nalézt ve stavebnictví (např. v podobě zcela nového materiálu na bázi porobetonu) a v dalších oborech (vč. zemědělství).

12.4 Přínos práce a uplatnění briket

Práce jako celek poskytuje relativně komplexní a aktuální pohled na problematiku technologie briketování v celém kontextu zkoušených a hodnocených briket s ohledem na energetickou náročnost celého technologického procesu. V práci představené technicko-ekonomické zhodnocení získávání surovin vhodných pro tuto technologii nabízí pro výrobní a zpracovatelské podniky vhodnou platformu pro ekonomické rozvahy nasazení technologie briketování v konkrétním podniku. Práce též poskytuje vědeckými experimenty podložené informace o spotřebě elektrické energie briketovacího lisu v závislosti na zvoleném vstupním briketovaném materiálu. Tato data jsou pro výrobní praxi z technicko-ekonomického hlediska nezbytná pro zajištění hospodárnosti a též ekologické výroby.

V neposlední řadě práce představuje technické řešení (vč. stanovení silových poměrů a návrhů vhodných briketovacích směsí) zpracování technologií briketování stavebního a demoličního odpadu (konkrétně cihelného obrusu a odpadu ze sádrokartonových desek). Uplatnění briket z cihelného obrusu lze hledat v samotné výrobě cihel v podobě zkompaktnění jinak obtížně zpracovatelného sypkého materiálu a z toho plynoucí benefity ekonomické (úspora v dopravě či skladování a snížení prašnosti). Dále je možno takové brikety využít jako sekundární materiál, např. ve stavebnictví jako podloží málo zatěžovaných komunikací či chodníků a dokonce v zemědělství jako doplnění podestýlky domácích zvířat. Brikety vyrobené ze sádrokartonového odpadu lze po úpravě použít k retenci vody u rostlin v písčítých půdách. Další uplatnění mohou najít též ve zmenšení objemu a z toho plynoucí úspory na transport a skladování.

13 SEZNAM LITERATURY

- [1] ABAKR, Y. A. a ABASAEED, A.. Experimental evaluation of a conical-screw briquetting machine for the briquetting of carbonized cotton stalks in Sudan. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2006, vydání 1, strana 212–220.
- [2] ABC Machinery [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <http://www.gcmecc.com>.
- [3] ACAN Machine [online]. 2019 [cit. 2020-04-01]. Dostupné z: www.acanmachine.com.
- [4] AMER, E. A. a ELSISI. S. Quality characteristics for agricultural residues to produce briquettes. Sborník 5. mezinárodní konference TAE. Česká zemědělská univerzita v Praze, Česká republika. 2019.
- [5] ARANSIOLA, E.F., OYEWUSI, T.F., OSUNBITAN, J.A. a OGUNJIMI, L.A.O. Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. *Energy Reports* [online]. 2019, vydání: 5, strana: 909–918. ISSN: 23524847. DOI:10.1016/j.egy.2019.07.011.
- [6] BALL Brno, v. o. s. [online]. 2019 [cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <http://www.ballbrno.cz/>.
- [7] BARAN, O., SLOWIK, A. a BRZOSK, E. Směs pro výrobu briket z koksového prachu, Česká republika. Užiténý vzor. Číslo zápisu: 1994-1878. Datum zápisu: 14.2.1996.
- [8] BHATTARAI, P., SAPKOTA, R. a GHIMIRE, R.M. Effects of Binder and Charcoal Particle Size on the Physical and Thermal Properties of Beehive Briquettes. IOE Graduate Conference. 2016, strana 57–63.
- [9] BOŽEK, F., URBAN, R. a ZEMÁNEK, Z. Recyklace. 1. vydání. Vyškov: Vysoká vojenská škola pozemního vojska. 2003. ISBN 80-238-9919-8.

- [10] Briketovací lisy BRIKLIS, spol. s r.o [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <http://www.briklis.cz>.
- [11] BRITANNICA. Encyklopedie Britannica [online]. 2020 [vid. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.britannica.com>.
- [12] BROŽEK, M. Briquetting of chips resulted from cutting operations of metals. Manufacturing Technology. Ústí nad Labem: Institute of Production Technology and Management. University of J. E. Purkyně [online]. 2005, vydání: 5, strana: 9–14. ISSN: 1213-2489.
- [13] BROŽEK, M. Briketování třísek z obrábění kovů. Strojírenská technologie. 2004, vydání: 2, strana: 4–9.
- [14] BROŽEK, M. Briketování nekovového odpadu. Sborník mezinárodní konference XIV Diamatech 2001. Univerzita Radom, 2001. ISBN 83-7204-221-7.
- [15] BROŽEK, M. The Effect of Moisture of the Raw Material on the Properties Briquettes for Energy Use. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis [online]. 2016, vydání: 64, strana: 1453–1458. DOI:10.11118/actaun201664051453.
- [16] BROŽEK, M. Zařízení pro stanovení mechanické odolnosti palivových briket. Česká republika. Užité vzor. Číslo zápisu: 35 742. Datum zápisu: 2013-09-09. 2013.
- [17] BROŽEK, M. a NOVÁKOVÁ, A. Laboratorní briketovací lis. Česká republika. Patent. Číslo zápisu: 302 577. Registrováno dne: 20.7.2011. 302 577. Česká republika.
- [18] BROŽEK, M. Influence of Moisture Content of Feedstock Materials on Briquettes Properties. Manufacturing Technology [online]. 2017, vydání: 17, strana: 680–685. DOI:10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/5/680.

- [19] BROŽEK, M. Briquettes Properties after Four Years Storage. *Manufacturing technologie*. 2018, vydání: 18. DOI:10.21062/ujep/45.2018/a/1213-2489/MT/18/1/11.
- [20] BROŽOVÁ, L. a KUNTOVÁ, K. Recyklace stavebního a demoličního odpadu a jeho využití u pozemních staveb. *Business & IT* [online]. 2016, vydání: 6, strana: 32–50. ISSN 25707434. DOI:10.14311/bit.2016.02.05.
- [21] BRUNEROVÁ, A. Briquetting of Materials Suitable for the Energy production. Praha, 2018. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Technická fakulta. Katedra materiálu a strojírenské technologie.
- [22] BRUNEROVÁ, A. a BROŽEK, M. Optimal feedstock particle size and its influence on final briquette quality. Sborník 6. mezinárodní konference TAE. Česká zemědělská univerzita v Praze, Česká republika. 2016, strana: 98–101. ISBN: 978-802132683-5.
- [23] BRUNEROVÁ, A., BROŽEK, M., ŠLEGER, V. a NOVÁKOVÁ, A. Energy Balance of Briquette Production from Various Waste Biomass. *Scientia Agriculturae Bohemica*. 2018, vydání: 49, strana: 236–243. ISSN 1805-9430. DOI:10.2478/sab-2018-0030.
- [24] BRUNEROVÁ, A., PECEN, J., BROŽEK, M. a IVANOVA, T. Mechanical durability of briquettes from digestate in different storage conditions. *Agronomy Research*. 2016, vydání: 14, strana: 327–336.
- [25] CARDOZO, E., ERLICH, C., ALEJO, L. a FRANSSON, T. Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications. *Fuel*. 2014, vydání: 115, strana: 778–787. DOI:10.1016/j.fuel.2013.07.054
- [26] CELJAK, I. Mechanizace pro zpracování zbytků po lesních těžbách. *Mechanizace zemědělství*. 2019, vydání: 11, strana: 40–46.

- [27] Česká peleta. Energetická náročnost výroby pelet z biomasy [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.ceska-peleta.cz/zpravy-z-tisku/energeticka-narocnost-vyroby-pelet-z-biomasy/>.
- [28] Českomoravská komoditní burza Kladno [online]. 2020 [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://www.cmkbk.cz>.
- [29] Český statistický úřad [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/>.
- [30] Český statistický úřad [online]. Produkce, využití a odstranění odpadů - 2016. 2019 [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/61546956/28002018.pdf/36b79716-4bee-4e66-96b8-0298993b2276?version=1.3>
- [31] CHALOUPKOVÁ, V., IVANOVA, T., EKRT, O., KABUTEY, A. a HERÁK, D. Determination of Particle Size and Distribution through Image-Based Macroscopic Analysis of the Structure of Biomass Briquettes. *Energies* [online]. 2018, vydání: 11, strana: 331. ISSN 1996-1073. DOI:10.3390/en11020331.
- [32] CHOU, C., LIN, S., PENG, C. a LU, W. The optimum conditions for preparing solid fuel briquette of rice straw by a piston-mold process using the Taguchi method. *Fuel Processing Technology*. 2009, vydání: 90. DOI:10.1016/j.fuproc.2009.04.007.
- [33] ČSN EN ISO 17831-2. Tuhá biopaliva. Stanovení mechanické odolnosti pelet a briket – Část 2: Brikety. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2016.
- [34] ČSN 42 0030. Ocelový a litinový odpad. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1994.
- [35] ČSN 42 1331. Odpady neželezných kovů a jejich slitin. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2004.

- [36] ČSN EN 520 (72 3611). Sádrokartonové desky – Definice, požadavky a zkušební metody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2010.
- [37] ČSN EN ISO 18847. Tuhá biopaliva. Stanovení hustoty částic pelet a briket. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2016.
- [38] ČSN EN ISO 17225-3. Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 3: Tříděné dřevní brikety. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2015.
- [39] ČSN EN ISO 12570 (730573). Tepelně vlhkostní chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení vlhkosti sušením při zvýšené teplotě. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2001.
- [40] ČSN 41 9436. Ocel 19 436 chromová. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 1969.
- [41] ČSN EN 459-1 ED.3 (722201). Stavební vápno - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2015.
- [42] CYRKL [online]. 2020 [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://www.cyrkl.cz>.
- [43] Dobré stroje, s.r.o. [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.dobrestroje.cz/>.
- [44] Dřevo prodej [online]. 2020 [vid. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.drevo-prodej.cz/>.
- [45] DROCHYTKA, R. Pórobeton. Brno: VUTiUM, 1999. ISBN 80-214-1476-6.
- [46] Ekopron Metal, s.r.o. [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://ekopron-metal.cz/kontakt/>.

- [47] GAJDZICA, K. Přísadová briketa a způsob její výroby, Česká republika. Patent. Číslo zápisu: 2005-629. Datum zápisu:25.1.2007.
- [48] GOLDEMBERG, J. a COELH, S. Renewable energy - Traditional biomass vs. modern biomass. Energy Policy. 2004, vydání: 32, strana: 711–714. DOI:10.1016/S0301-4215(02)00340-3.
- [49] GONG, Ch., LU, D., WANG, G., TABIL, L. a WANG, D. Compression Characteristics and Energy Requirement of Briquettes Made from a Mixture of Corn Stover and Peanut Shells. BioResources [online]. 2015, vydání: 10. ISSN 1930-2126. DOI:10.15376/biores.10.3.5515-5531.
- [50] HENDL, J. Přehled statistických metod zpracování dat analýza a metaanalýza dat. Praha: Portál. 2006. ISBN 80-7367-123-9.
- [51] HERAK, D., KABUTEY, A., DIVISOVA, M. a SIMANJUNTAK, S. Mathematical model of mechanical behaviour of *Jatropha curcas* L. seeds under compression loading. Biosystems Engineering [online]. 2013, vydání: 114, stran: 279–288. ISSN: 15375110. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2012.12.007.
- [52] HERAK, D., KABUTEY, A., DIVISOVA, M. a SVATONOVA, T. Comparison of the Mechanical Behaviour of Selected Oilseeds under Compression Loading. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca [online]. 2012, vydání: 40, strana: 227. ISSN: 1842-4309. DOI:10.15835/nbha4027444.
- [53] IBM SPSS software [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/analytics/spss-statistics-software>.
- [54] Jihokov, v.d. [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.jihokov.cz/o-spolecnosti>.
- [55] Kartres, spol. s r.o. [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.katres.cz/>.

- [56] KOLÁŘOVÁ, M. Vlastnosti pelet a briket pro energetické využití. Praha, 2011. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Technická fakulta. Katedra materiálu a strojírenské technologie.
- [57] KOVÁČOVÁ, M., MATUŠ, M., KRIŽAN, P. a BENIAK, J. Design theory for the pressign chamber in the solid biofuel production process. *Acta Polytechnica*. 2014, vydání: 54, strana: 28–34. ISSN: 1805-2363. DOI:10.14311/AP.2014.54.0028.
- [58] KRUSKAL, W. H. a WALLIS, A. W. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*. 1952, vydání: 47, strana: 583–621.
- [59] Labortech s.r.o. [online]. 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/>.
- [60] LAC, s.r.o. [online]. 2020 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://www.lac.cz/cs/>.
- [61] Lavaris, s.r.o. [online]. 2019 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <http://www.lavaris.cz>.
- [62] LEON, M., RAHMAN, M. a BHATTACHARYA, S. A Study on Improved Biomass Briquetting. *Energy for Sustainable Development*. 2002, vydání: 6, strana: 67–71. DOI:10.1016/S0973-0826(08)60317-8.
- [63] LIŠKA, V. Směs pro výrobu briket z odpadu v cihelnách. Česká republika. Užité vzor. Číslo zápisu: 33 356. Datum zápisu: 5.11.2019. 2019.
- [64] LIŠKA, V. The energy intensity of the briquetting process in terms of profitability of waste treatment. *Agronomy Research* [online]. 2019, vydání: 17, strana: 186–193. ISSN: 1406894X. DOI:10.15159/AR.19.021.
- [65] London metal Exchange [online]. 2020 [cit. 2020-0-01]. Dostupné z: <http://www.lme.com>.

- [66] LOZANO, F. a LOZANO, R. Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production. *Journal of Cleaner Production*. 2017. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.01.037.
- [67] Maxton Industrial engineering [online]. 2019 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://briquettesolution.com>.
- [68] Metal trade comax, a.s. [online]. 2019 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.mtcomax.cz/?q=cs>.
- [69] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky [online]. 2019 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz>.
- [70] Ministerstvo životního prostředí České republiky [online]. Informační systém odpadového hospodářství. 2019 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://isoh.mzp.cz/>.
- [71] Ministerstvo životního prostředí České republiky. Vyhláška č. 93/2016 Sb., katalog odpadů.
- [72] Narex Vršovice, s.r.o. [online]. 2019 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.narexpha.cz>.
- [73] NET4TRADE, s.r.o. [online]. 2019 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <http://www.net4trade.cz/>.
- [74] NEUBAUER, J., SEDLAČÍK, M. a KŘÍŽ, O. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. Praha: Grada, 2016, 2. rozšířené vydání. ISBN: 978-80-247-5786-5.
- [75] NIEDZIÓŁKA, I. a SZPRYNGIEL, M. Assessment of energy consumption of pellets and briquettes production in compressing devices. *Agricultural Engineering*. 2014, vydání: 2, stran: 145–154. DOI:10.14654/ir.2014.150.040.

- [76] NIGAY, N. A., KUZNETSOV, G. V., SYRODOY , S. V. a GUTAREVA, N. Y. Estimation of energy consumption for drying of forest combustible materials during their preparation for incineration in the furnaces of steam and hot water boilers. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. 2020, vydání: 42, strana: 1997–2005. ISSN: 15567230. DOI:10.1080/15567036.2019.1604910.
- [77] NOVÁKOVA, A. a BROŽEK, M. Briquette properties after three years storage. *Engineering for Rural Development*. 2016, strana: 80–85. ISSN: 16915976.
- [78] OWUSU, P. A. a ASUMADU-SARKODIE, S. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*. 2016, vydání: 3, strana: 1–14. ISSN: 23311916. DOI:10.1080/23311916.2016.1167990.
- [79] PITCHARD, P.J. *Mathcad: a tool for engineering problem solving*. Boston: USA. 1998. ISBN: 0070121893.
- [80] PLÍŠTIL, D. Briketování biomasy. Sborník přednášek z odborného semináře *Zemědělská technika a biomasa VÚZT*. 2003, strana: 80. ISBN: 80-903271-1-7.
- [81] PTC MathCAD support [online]. 2019 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://support.ptc.com>.
- [82] PTC MATHCAD [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.mathcad.com>.
- [83] PUROHIT, P., TRIPATHI, A.K. a KANDPAL, T. C. Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues. *Energy*. 2006, vydání: 31, strana: 1321–1331. ISSN: 03605442. DOI:10.1016/j.energy.2005.06.004.
- [84] SAPTOADI, H. The Best Biobriquette Dimension and its Particle Size. *Asian journal of Energy and Environment*. 2008, vydání: 9, strana: 161-175. ISSN: 1513-4121.

- [85] SCHUCANY, W. R. a FRAWLEY, W. H. A rank test for two group concordance. *Psychometrika*. 1973, vydání: 38, strana: 249–258. ISSN: 0033-3123. DOI:10.1007/BF02291117.
- [86] Siemens Industry Software Inc. [online]. 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/>.
- [87] SIGALINGGING, R., HERÁK, D., KABUTEY, A., MIZERA, Č. a DIVIŠOVÁ, M. Tangent Curve Function Description of Mechanical Behaviour of Bulk Oilseeds: A Review. *Scientia Agriculturae Bohemica*. 2015, vydání: 45, strana: 259–264. ISSN: 1805-9430. DOI:10.1515/sab-2015-0007.
- [88] ŠKOPÁN, M. Sborník přednášek 21. konference RECYCLING 2016. Vysoké učetní technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2016, strana: 10–16. ISBN: 9788021453319.
- [89] Skovajsa [online]. 2020 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.skovajsa.cz/>.
- [90] SOUČEK, J., KROULÍK, M. a POLÁK, M. Parametry sušení energetických dřevin v experimentální sušárně. Výzkumný ústav zemědělské techniky. Strana: 1–5. Dostupné z: www.vuzt.cz.
- [91] STANDART. DD CEN/TS 14774-1:2004. Solid biofuels. Methods for the determination of moisture content. Oven dry method. Total moisture. Reference method. 2004.
- [92] ŠTASTNÝ, J. Měření spotřeby energie při provozu elektrických zařízení. Vytápění, větrání, instalace. 2011, vydání: 5, strana: 236–241.
- [93] TEMPOS – technická měřidla a počítačové systémy [online]. 2020 [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <http://www.tempos.cz>.
- [94] UHLÍŘ, I., aj. Elektrické obvody a elektronika. Praha: Česká technika. Nakladatelství ČVUT. 2008, vydání 2. rozšířené. ISBN: 978-80-01-03932-8.

- [95] VALE, A. T. a GENTIL, L. V. Energy balance and efficiency in wood sawdust briquettes production. *FLORESTA*. 2014, vydání: 45, strana: 281. ISSN: 1982-4688. DOI:10.5380/rf.v45i2.36954.
- [96] WERTHER, J, SAENGER, M., HARTGE, E., OGADA, T. a OTARA, S. Combustion of agricultural residues. *Prog Energy Combust Sci. Progress in Energy and Combustion Science*. 2006, vydání: 26, strana: 1–27. DOI: 10.1016/S0360-1285(99)00005-2.
- [97] Xella CZ, s.r.o. [online]. 2020 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://www.ytong.cz/spolecnost.php>.
- [98] YANK, A., NGADI, M. a KOK, R. Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. *Biomass and Bioenergy*. 2016, vydání: 84, strana: 22–30. ISSN: 09619534. DOI:10.1016/j.biombioe.2015.09.015.
- [99] Zákon č. 185/2001 Sb., Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů.
- [100] Zákoník práce 262/2006 Sb. ve znění pozdějších předpisů.
- [101] ZENG, X., MA, Y. a MA, L. Utilization of straw in biomass energy in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, vydání: 11, strana: 976–987. DOI:10.1016/j.rser.2005.10.003.
- [102] ZHANG, J., ZHENG, D., WU, K. a ZHANG, X. The optimum conditions for preparing briquette made from millet bran using Generalized Distance Function. *Renewable Energy*. 2019, vydání: 140, strana: 692–703. ISSN:09601481. DOI:10.1016/j.renene.2019.03.079.

14 PŘÍLOHY

PŘÍLOHA Č. 1 - Technická specifikace briketovacích lisů Profilis Home a BrikStar 30,
typ 12.

PŘÍLOHA Č. 2 - Technická dokumentace laboratorního briketovacího lisu.

PŘÍLOHA Č. 3 - Užité vzor: Směs pro výrobu briket z odpadu v cihelnách.