

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA
Ústav lesnické a dřevařské techniky**

Příprava, vlastnosti a využití tuhých biopaliv – vybrané aspekty

Autor: Ing. et Ing. Jan Klepárník

Školitel: Prof. Ing. Vladimír Šimanov, CSc.

DISERTAČNÍ PRÁCE

OBOR STUDIA: TECHNIKA A MECHANIZACE
LESNICKÉ VÝROBY

Brno 2013

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: „Příprava, vlastnosti a využití tuhých biopaliv – vybrané aspekty“ zpracoval sám a uvedl jsem všechny použité prameny. Souhlasím, aby moje disertační práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a uložena v knihovně Mendelovy zemědělské a lesnické univerzity v Brně, zpřístupněna ke studijním účelům ve shodě s Vyhláškou rektora MZLU o archivaci elektronické podoby závěrečných prací.

V Brně, dne 27.12.2013

Jan Klepárník

Poděkování

Děkuji mému školiteli, Prof. Ing. Vladimíru Simanovi, CSc., za vedení práce. Dále děkuji všem lidem, kteří mi byli oporou v průběhu zpracování této práce, zejména pak Evičce, Janičce, Daně a Máji.

Abstrakt

Klepárník, J. Příprava, vlastnosti a využití tuhých biopaliv – vybrané aspekty. Disertační práce. Mendelova univerzita v Brně, 2013.

Disertační práce se zabývá problematikou výroby pelet a krátkého kusového dříví za použití malých, farmářských technologií. Je řešena problematika zabudované energie v palivu a návratnosti investice. Dále jsou diskutovány vlastnosti tuhých biopaliv a je provedena studie využití tuhých biopaliv v malých zdrojích tepla v podmínkách ČR. Zvláštní pozornost je věnována problematice automatického zapalování pelet. V poslední části jsou prezentovány dílčí výsledky aktuálně řešeného prototypu lesní vyvážecí soupravy.

Klíčová slova:

tuhá biopaliva, pelety, krátké kusové dříví, kotle na biomasu malých výkonů, automatické zapalování, lesní vyvážecí souprava

Abstract

Klepárník, J. Production, properties and use of solid biofuels – chosen aspects. Dissertation Thesis. Mendel university in Brno, 2013.

This PhD thesis deals with problems covering production of pellets and chunky wood, using small-scale technologies. There are particularly solved issues focused on fuel embedded energy and return on investment. Further, solid biofuels properties are discussed, and then the study of solid biofuels use in small hear sources was made being focused on the Czech Republic conditions. Particular attention is paid to problems with automatic pellet ignition. The last part is devoted to presenting partial results of a forwarder prototype, which is being solved currently.

Key words:

solid biofuels, pellets, chunky wood, small scale biomass boilers, automatic ignition, forwarder

Obsah:

1 Úvod	1
2 Cíl	4
3 Výroba pelet	5
3.1 Popis technologie	5
3.1.1 Sušení	5
3.1.2 Dezintegrace	9
3.1.3 Kondicionování	12
3.1.4 Lisování	13
3.1.5 Chlazení	14
3.1.6 Třídění	14
3.1.7 Skladování	14
3.2 Rozdělení peletáren dle velikosti	14
3.2.1 Peletárna velkého výkonu	14
3.2.2 Peletárna středního výkonu	16
3.2.3 Malá granulační linka	17
3.3 Energetické nároky peletování	20
4 Výroba krátkého kusového dříví	21
5 Vlastnosti tuhých biopaliv	24
5.1 Obsah vody	28
5.1.1 Stanovení obsahu vody	30
5.1.1.1 Referenční gravimetrická metoda	33
5.1.1.2 Zjednodušená gravimetrická metoda	34
5.1.1.3 Stanovení obsahu vody v analytickém vzorku	34
5.1.2 Vlastní vývoj laboratorního přístroje	34
5.2 Spalné teplo a výhřevnost	35
5.2.1 Stanovení spalného tepla a výhřevnosti	38
5.3 Sypná hmotnost	41
5.3.1 Stanovení sypné hmotnosti	42
5.4 Hustota	43
5.4.1 Metody měření hustoty	43
5.4.1.1 Metody měření hustoty pomocí výtlačku kapaliny	43
5.4.1.1.1 Hydrostatická metoda	43
5.4.1.1.2 Vztlková metoda	44
5.4.1.2 Stereometrická metoda	45

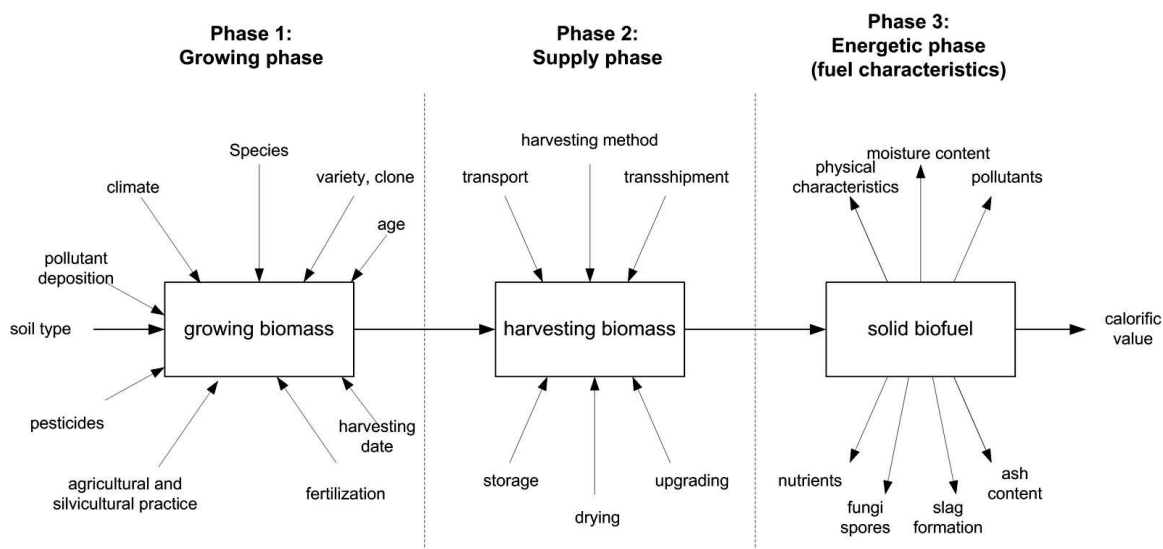
5.4.1.3	Metoda měření hustoty pomocí výtlaku pevné látky	45
5.4.1.3.1	Metoda s pyknometrem	45
5.4.2	Porovnání metod měření hustoty	46
5.4.3	Stanovení hustoty částic	48
5.4.3.1	Stanovení hustoty částic pelet	48
5.4.3.2	Stanovení hustoty částic briket	48
5.5	Mechanická odolnost	49
5.5.1	Stanovení mechanické odolnosti	49
5.5.2	Metody měření mechanické odolnosti pelet	49
5.5.2.1	Přístroj dle ASAE S269.4	49
5.5.2.2	Přístroj Lignotester	50
5.5.3	Metody měření mechanické odolnosti briket	50
5.5.4	Porovnání metod měření mechanické odolnosti pelet	51
5.5.5	Vliv fyzikálních vlastností pelet na mechanickou odolnost	52
5.5.6	Poruchy automatických kotlů vlivem nízké mechanické odolnosti	52
5.5.7	Vlastní vývoj laboratorního přístroje	53
5.6	Obsah popela	54
5.6.1	Stanovení obsahu popela	56
5.6.2	Stanovení charakteristických teplot popela	56
5.6.3	Vlastní vývoj laboratorního přístroje	57
6	Využití tuhých biopaliv	58
6.1	Přehled vhodných technologií a dostupných paliv	58
6.1.1	Technologie zdrojů tepla	58
6.1.1.1	Kotle na kusová tuhá biopaliva o výkonu do 60 kW	59
6.1.1.1.1	Kotle s prohoříváním paliva	59
6.1.1.1.2	Kotle s odhoříváním paliva	60
6.1.1.1.3	Pyrolytické kotle	61
6.1.1.2	Kotle na sypká tuhá biopaliva o výkonu do 60 kW	63
6.1.1.2.1	Automatický kotel na pelety	63
6.1.1.2.2	Automatický kotel na štěpku	68
6.1.1.2.3	Pomocné technologie automatických kotlů	69
6.1.1.3	Ostatní zdroje tepla spalující tuhá biopaliva	70
6.1.1.4	Zapojení kotlů do okruhu otopné soustavy	70
6.1.1.4.1	Základní zapojení kotle	70
6.1.1.4.2	Zapojení kotle s přípravou teplé vody	71

6.1.1.4.3 Zapojení kotle s akumulacním zásobníkem.....	72
6.1.1.5 Emisní limity pro kotle spalující tuhá paliva.....	73
6.1.2 Paliva a energie	74
6.2 Materiál a metodika	77
6.2.1 Návrh zdroje tepla s akumulacním zásobníkem.....	77
6.2.2 Investiční náklady na vytápění se zásobníkem	84
6.2.3 Modelový objekt	86
6.2.3.1 Základní technologie zdrojů tepla	87
6.2.3.1.1 Vytápění kusovým dřívím levným kotlem	88
6.2.3.1.2 Pyrolytické kotle.....	88
6.2.3.1.3 Automatické kotle s retortovým hořákem	88
6.2.3.1.4 Automatické kotle Guntamatic	88
6.2.3.2 Alternativní technologie zdrojů tepla	89
6.2.3.2.1 Vytápění zemním plynem.....	89
6.2.3.2.2 Vytápění elektrickou energií.....	90
6.2.3.2.3 Vytápění tepelným čerpadlem	90
6.3 Výsledky a diskuse	91
6.3.1 Návrh akumulacního zásobníku.....	91
6.3.2 Investiční náklady na vytápění se zásobníkem	97
6.3.3 Celkové náklady na vytápění	99
7 Automatické zapalování paliva	107
7.1 Současný stav oboru	107
7.2 Materiál a metodika experimentů	109
7.3 Výsledky a diskuse	112
7.3.1 Měření vývoje teplotního pole	112
7.3.2 Měření spotřeby energie.....	121
8 Doprava tuhých biopaliv	125
8.1 Návrh a realizace měřicího systému pro LVS710	126
8.1.1 Měřicí ústředna.....	128
8.1.2 Snímače tlaku	130
8.1.3 Snímače teploty	131
8.1.4 Snímač točivého momentu.....	134
8.1.5 Snímač otáček	137
8.1.6 Snímače sklonu	137
8.1.7 Snímače průtoku paliva.....	138

8.2 Výsledky a diskuse	142
8.2.1 Testování LVS710 na terénním polygonu.	142
8.2.1.1 Jízda prázdné vyvážecí soupravy	145
8.2.1.2 Jízda polovičně naložené vyvážecí soupravy	147
8.2.1.3 Jízda plně naložené vyvážecí soupravy	150
8.2.1.4 Jízda přeložené vyvážecí soupravy	152
8.2.2 Testování LVS710 na asfaltové komunikaci	155
9 Závěr	158
9.1 Výroba pelet.....	158
9.2 Výroba krátkého kusového dříví.....	158
9.3 Vlastnosti tuhých biopaliv	159
9.4 Využití tuhých biopaliv	159
9.5 Automatické zapalování paliva.....	160
9.6 Vyhodnocení jízd lesní vyvážecí soupravy LVS710.....	161
9.7 Přínos práce.....	162
10 Summary	163
10.1 Výroba pelet.....	163
10.2 Výroba krátkého kusového dříví.....	163
10.3 Vlastnosti tuhých biopaliv	163
10.4 Využití tuhých biopaliv	163
10.5 Automatické zapalování paliva.....	164
10.6 Vyhodnocení jízd lesní vyvážecí soupravy LVS710.....	164
11 Literatura	165
11.1 Vědecká a odborná literatura	165
11.2 Normy a zákony.....	169
11.3 Firemní literatura	170
11.4 Web	171
12 Seznam zkratk.....	173

1 Úvod

Tuhá biopaliva jsou paliva připravená z energeticky využitelné biomasy, jejich výsledné skupenství je pevné. Původ biomasy ovlivňuje jejich chemické složení, způsob přípravy pak především fyzikální vlastnosti. V celém řetězci energetického využití tuhých biopaliv lze rozlišit tři základní fáze. Fází růstu biomasy, fází sklizně a přípravy paliva a fází energetického využití paliva (obr. 1).

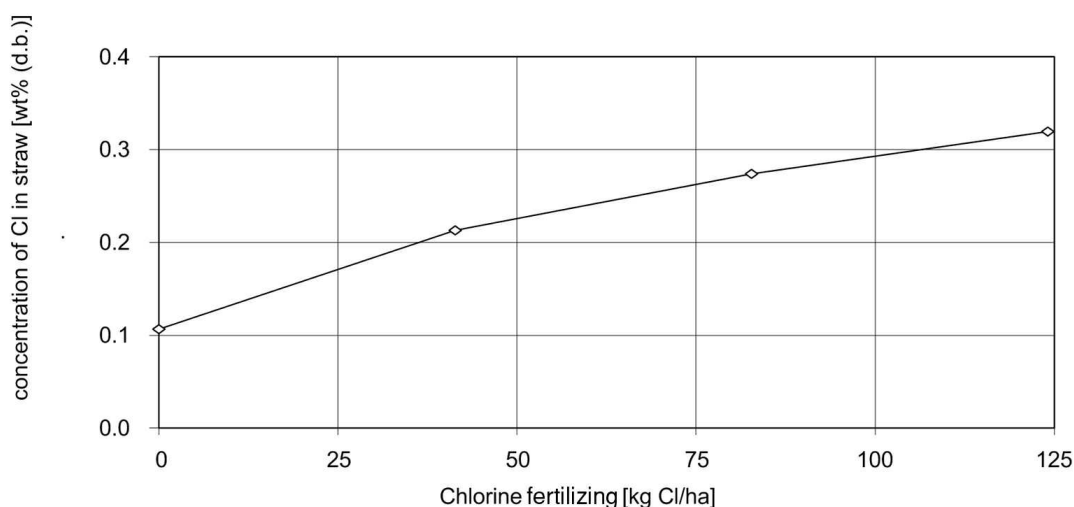


Obr. 1. Faktory ovlivňující kvalitu tuhých biopaliv z biomasy, [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

V každé fázi je kvalita budoucího paliva ovlivněna řadou faktorů. Fáze růstu ovlivňuje především složení biomasy. Podstatnými faktory, které mají vliv na chemické složení je druh, varieta, klon a věk pěstované biomasy, typ půdy a depozice škodlivin v půdě, klimatické poměry, datum sklizně, aplikace ochranných látek (pesticidy) a hnojiv. Například budeme – li chtít využít obilnou slámu pro výrobu pelet, zcela zásadní bude vliv použitých hnojiv. Draslík v levných umělých hnojivech je do půdy dodáván ve formě KCl namísto dražší formy K_2SO_4 . Tak se dostává do půdy a posléze do vlastní hmoty biomasy pěstované na poli velké množství chlóru (obr. 2).

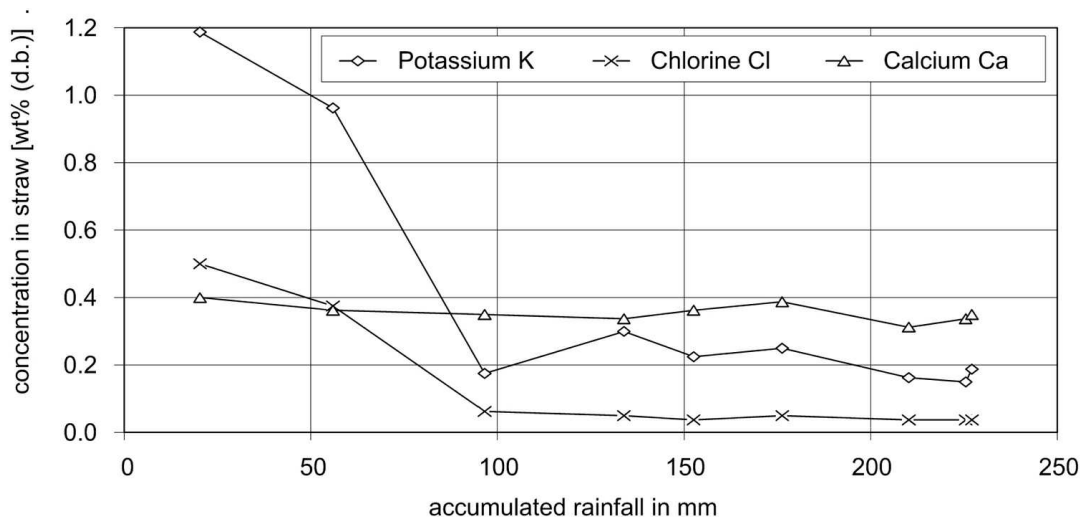
Tab. 1. Základní složení tuhých biopaliv

palívo			
voda (M)	hořlavina		popel (A)
	pevný uhlík (FC)	prchavá hořlavina (VM)	
H ₂ O	C, H, O		
	N, S, Cl		
	Si, Ca, Mg, K, Na, P		
	Fe, Al, Mn, Cu, Zn, Co, Mo, As, Ni, Cr, Pb, Cd, V, Hg		



Obr. 2. Vliv intenzity hnojení na koncentraci chlóru ve slámě, [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

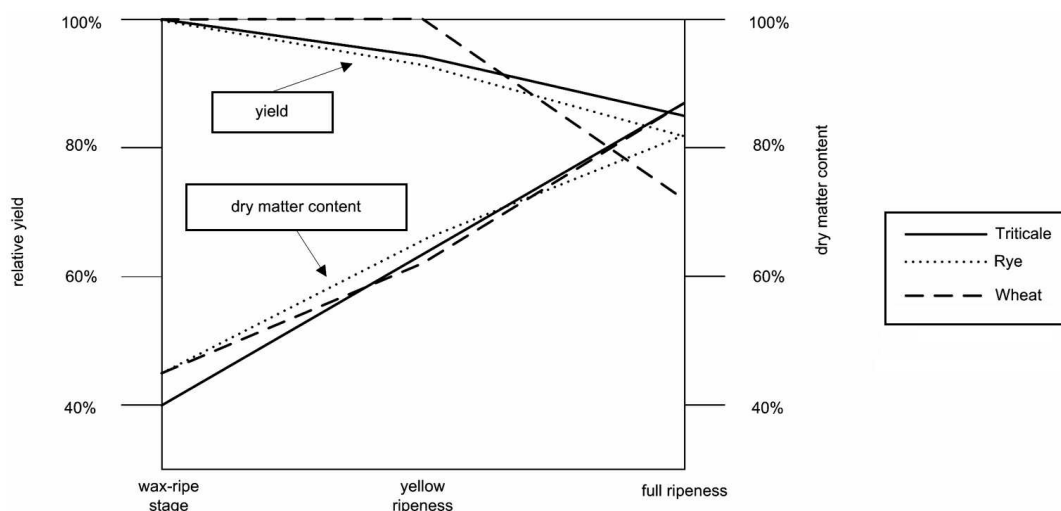
Pokud však v době před sklizní přijdou deště, sloučeniny chlóru jsou z biomasy vymyty (obr. 3). Pro vlastní sklizeň je však třeba slunečné počasí, aby energeticky využitelná sláma mohla být bez rizika výskytu plísní skladována přirozeně vysušená na vlhkost kolem 15 % bez vynaložení energie na umělé sušení. Vedle chlóru jsou snadno vymyvatelné soli draslíku. Snížení koncentrace draslíku má za následek snížení tavení popela na roštu kotle při spalování. Dešťové srážky ve správnou dobu tak mohou významným způsobem zlepšit vlastnosti energeticky využitelné slámy. Na klimatické podmínky se však nelze spoléhat, proto v mnoha studiích bylo ověřováno umělé vyluhování již sklizené biomasy [BAKKER & JENKINS, 1996], [SANDER, 1997] a [NIKOLAISEN et al, 1998].



Obr. 3. Vliv deště na vymývání draslíku a chlóru, [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

Optimální doba sklizně by měla rovněž odpovídat době nejnižší vlhkosti sklizené biomasy. Tím lze eliminovat náklady spojené s umělým sušením. Pro obilí lze optimální dobu sklizně poznat podle stupně zralosti zrna. Pokud však budeme obilí sklízet v plné zralosti, kdy je předpoklad nejnižší vlhkosti, bude klesat výnos díky ztrátám odrolováním při sklizni (obr. 4). Podobné závislosti platí pro veškeré energeticky pěstované rostliny. Jarní či zimní sklizeň

obvykle přináší biomasu o vyšší kvalitě než sklizeň podzimní, zato však sklídíme ze stejné plochy menší množství sušiny. I v tomto případě je nutno nalézt vhodný kompromis.



Obr. 4. Výnos a vlhkost biomasy při sklizni v různou dobu zralosti, [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

Na těchto příkladech jsem demonstroval vztah několika vzájemně souvisejících faktorů, které ovlivňují kvalitu biomasy ve fázi růstu. Fází růstu se již v této práci zabývat nebudu. Následující fáze – fáze přípravy paliva a fáze energetického využití paliva bude předmětem zájmu disertační práce.

Ve fázi přípravy biopaliva je jeho kvalita ovlivněna především zvolenou technologií sklizně, způsobem dopravy, skladováním, sušením a způsobem vlastní úpravy paliva. Ve fázi energetického využití je kvalita hotového paliva dána především jeho vlastnostmi, mezi které patří vlhkost, výhřevnost, hustota, sytná hmotnost, mechanická odolnost, obsah popela, charakteristické teploty popela, obsah příměsí, obsah spor hub a plísní.

Faktory ovlivňující kvalitu biopaliva ve fázi přípravy a spotřeba energie jsou hodnoceny v kapitolách 3 „Výroba pelet“ a 4 „Výroba krátkého kusového dříví“. Vlastnosti již připraveného paliva, včetně popisu vyrobených funkčních vzorků zkušebních strojů, jsou diskutovány v kapitole 5 „Vlastnosti tuhých biopaliv“. Technologie umožňující využití tuhých biopaliv v malých zdrojích tepla včetně ekonomického vyhodnocení a porovnání s konkurenčními palivy a energiemi je popsáno v kapitole 6 „Využití tuhých biopaliv“. Zvláštní pozornost je pak věnována problematice automatického zapálení paliva v kapitole 7 „Automatické zapalování paliva“. Množství zabudované šedé energie, stejně tak jako výsledná cena pro koncového zákazníka je významně ovlivněna dopravou nativní biomasy i výsledného biopaliva. Proto je kapitola 8 „Doprava biomasy“ věnována na našem pracovišti aktuálně řešenému problému měření provozních parametrů prototypu lesní vyvážecí soupravy.

V práci je brán zvláštní zřetel na palivovou peletu jako nejušlechtlejší obchodní formu tuhých biopaliv.

2 Cíl

V disertační práci je stanoveno pět základních cílů, kterým odpovídá pět samostatných kapitol. Jednotlivé kapitoly mají samostatné členění odpovídající popisu současného stavu řešeného problému, zvolené metodice řešení a zveřejnění výsledků včetně diskuse. Dohromady pak tvoří synergický celek.

Dílčím cílem kapitoly 3 „Výroba pelet“ a kapitoly 4 „Výroba krátkého kusového dříví“ je popsat a na základě vlastních zkušeností zdokumentovat možnosti přípravy méně běžných obchodních forem tuhých biopaliv než je palivové dříví pomocí malých, farmářských technologií. Základní vlastností biomasy je její přítomnost po celé ČR, ovšem v relativně malé koncentraci. Tato skutečnost předurčuje efektivní využití biomasy na lokální úrovni, kde lze s výhodou použít právě farmářských technologií. Hlavním cílem kapitoly je ukázat možnost získání na jedné straně velmi levného a na straně druhé vysoce komfortního (co do použití) biopaliva z vlastní produkce farmáře nebo drobného vlastníka lesa.

Dílčím cílem kapitoly 5 „Vlastnosti tuhých biopaliv“ je popsat zejména podstatné fyzikální a mechanické vlastnosti tuhých biopaliv, včetně metod jejich stanovení. V této oblasti byla v posledních deseti letech prováděna řada výzkumů předních evropských institucí zabývajících se danou problematikou. Výsledkem jejich snažení bylo zavedení evropských norem popisujících kvalitu tuhých biopaliv určených zejména pro využití v malých zdrojích tepla. Na základě takto zpracované rešerše jsem sestavil několik funkčních vzorků pro vlastní testování připravovaných tuhých biopaliv.

Dílčím cílem kapitoly 6 „Využití tuhých biopaliv“ je rozbor současného stavu techniky v oblasti malých zdrojů tepla využívajících tuhá biopaliva. V návaznosti na to je pak pro modelový případ zpracováno několik technických řešení vytápění rodinných domů biomasou. Výsledkem této kapitoly je porovnání celkových nákladů na vytápění jednotlivých řešení z hlediska technologií i biopaliv. Pro doplnění je biomasa porovnávána s konkurenčními palivy (zemní plyn, hnědé uhlí) a energiemi (elektrická energie ve formě přímotopů, akumulárního vytápění i tepelných čerpadel).

Dílčím cílem kapitoly 7 „Automatické zapalování paliv“ je rozbor současného stavu používaných technologií automatického zapalování a zveřejnění výsledků proběhlých testů spotřeby energie a doby trvání jednotlivých cyklů automatického zapalování. Hlavním cílem je odpověď na otázku, zda je automatické zapalování ekonomicky přijatelné.

Dílčím cílem kapitoly 8 „Doprava tuhých biopaliv“ je návrh měřicího systému pro testování prototypu lesní vyvážecí soupravy LVS710 firmy Strojírna Novotný a prezentace prvních dosažených výsledků.

3 Výroba pelet

Peleta je lisovaná biomasa o nízkém obsahu vlhkosti (typicky 6 až 10 %) do tvaru drobných válečků nejčastěji o průměru šest nebo osm milimetrů a délce pěti až čtyřiceti milimetrů. Vyznačuje se homogenními a stabilními rozměry, což předurčuje její velmi dobré využití v automatických kotlích malých výkonů, ale i ve velkých kotlích výtopen, tepláren a elektráren. Navíc díky vysoké hustotě dosahuje i vysokou sypnou hmotnost, nízká vlhkost způsobuje vyšší výhřevnost. Tyto vlastnosti jsou příznivé pro vysokou koncentraci energie v jednotce objemu, což je výhodné při skladování a dopravě. Peleta se tak v posledních deseti letech stala konkurenceschopnou alternativou komfortnímu vytápění zemním plynem.

Podle druhu biomasy, ze které je peleta vyrobena, rozlišujeme peletu bílou, hnědou a agropeletu. Bílá peleta je vyrobena pouze z čistého dřeva bez příměsí kůry, dosahuje nejlepších vlastností především při spalování v kotlích malých výkonů, je však z důvodu ceny této suroviny nejdražší. Hnědá peleta je vyrobena také ze dřeva, zde je však určitý podíl kůry. Agropeleta je na rozdíl od předešlých druhů pelet pojmem velice vágním. Vstupní surovinou pro výrobu agropelety může být jakákoliv biomasa ze zemědělské produkce či zbytky při zpracování potravin. Častými agropeletami jsou pelety z obilné slámy, slunečnicových slupek, sena, olivových pecek.

Třením v matici se uvolňuje velké množství tepla a v lisovaném materiálu plastifikuje lignin, který tvoří základní pojivo pelety. V některých případech se přidávají cizí pojiva výhradně anorganického přírodního původu, jako je kukuřičný škrob. K dosažení vysoké pevnosti a povrchové odolnosti je však nutné v lisu vzniklou peletu okamžitě ochladit, aby došlo ke ztuhnutí pojiv. Peleta tak získá charakteristický lesk.

3.1 Popis technologie

Technologii výroby pelet lze rozdělit na několik klíčových technologických uzlů, které navazují na sebe:

- sušení
- dezintegrace
- kondicionování
- lisování
- chlazení
- třídění
- skladování výsledného produktu

Počet stupňů dezintegrace biomasy je závislý na její vstupní formě. Kvalita výsledného produktu je ovlivněna každým technologickým uzlem svým specifickým způsobem.

3.1.1 Sušení

Optimální vlhkost biomasy (suroviny) před lisováním je 10 až 15 % dle technologie lisování a druhu suroviny. Obvyklá vstupní vlhkost biomasy se pohybuje v rozmezí 40 až 60 %. Je tedy třeba snížit vlhkost o 25 až 50 %. Biomasa může být sušena přirozeně, nebo uměle za použití sušáren. K vysušení 1 kg biomasy obsahující 50 % vlhkosti na 10 % vlhkosti je třeba 0,42 kWh energie [BROWN, 2003]. To představuje 8,5% energetického obsahu výsledné bílé pelety.

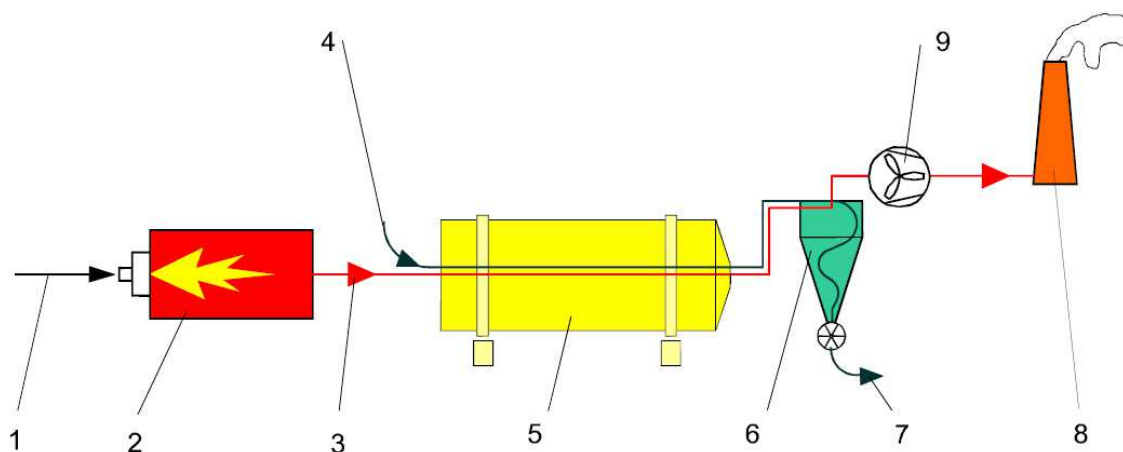
Přirozené sušení je energeticky nenáročné, ovšem v našich klimatických podmínkách málo použitelné. Lze jej využít pro sušení polních plodin které jsou zdrojem biomasy mnoha agropelet. Studium podmínek přirozeného sušení se zabývá mnoho vědeckých prací. Intenzita

přirozeného sušení biomasy (vojtěšky) je závislá na solární radiaci, teplotě suchého teploměru, psychrometrické diferenci, obsahu vlhkosti v půdě a záběru žacího stroje. [ROTZ & CHEN, 1985].

Umělé sušení je energeticky nejnáročnější částí výroby pelet. Výhodou je možnost použití energie vlastní zpracovávané biomasy pro krytí tepelných nároků sušáren. Sušení musí probíhat při nízkých teplotách, protože již od teploty 150 °C se začíná uvolňovat prchavá hořlavina z paliva, která tvoří významný podíl hořlaviny paliva. Při teplotách kolem 250 °C je uvolňování prchavé hořlaviny velmi intenzivní. Nevhodným sušením tak způsobujeme snížení obsahu hořlaviny a zvýšení obsahu popeloviny výsledného produktu, což je v obou případech nežádoucí.

Bubnová sušárna

Bubnová sušárna (obr. 5) je investičně, ale především provozně levnější variantou, velmi rozšířenou u technologií středních výrobních kapacit v ČR. Patří i mezi světově nejrozšířenější sušárny energeticky využívané biomasy [WORLEY, 2011]. Nejběžnějším zdrojem tepla jsou spaliny kotle na štěpku nebo jinou formu zpracovávané biomasy naředěné vzduchem, které jsou smíchány s biomasou určenou k sušení ještě před vstupem do sušárny. Vlastní prostor sušárny je řešen jako rotující buben s vnitřním lopatkováním, které usměrňuje pohyb sušené biomasy. Na výstupu z bubnu je instalován cyklon k oddělení vysušené biomasy a spalin. Výhodou bubnových sušáren je velká kapacita, nízká spotřeba elektrické energie, možnost použití levného zdroje tepla (spaliny), jednoduchá montáž na stavbě (minimum pomocných ocelových konstrukcí), nízké pořizovací náklady. Doba setrvání sušeného materiálu v bubnu je od jedné minuty po půl hodiny dle frakce sušené biomasy. Mezi nevýhody patří vysoké riziko vzniku požáru, velké emise prachu a VOC, horší regulace vlhkosti výstupního materiálu a relativně velký zastavěný prostor.



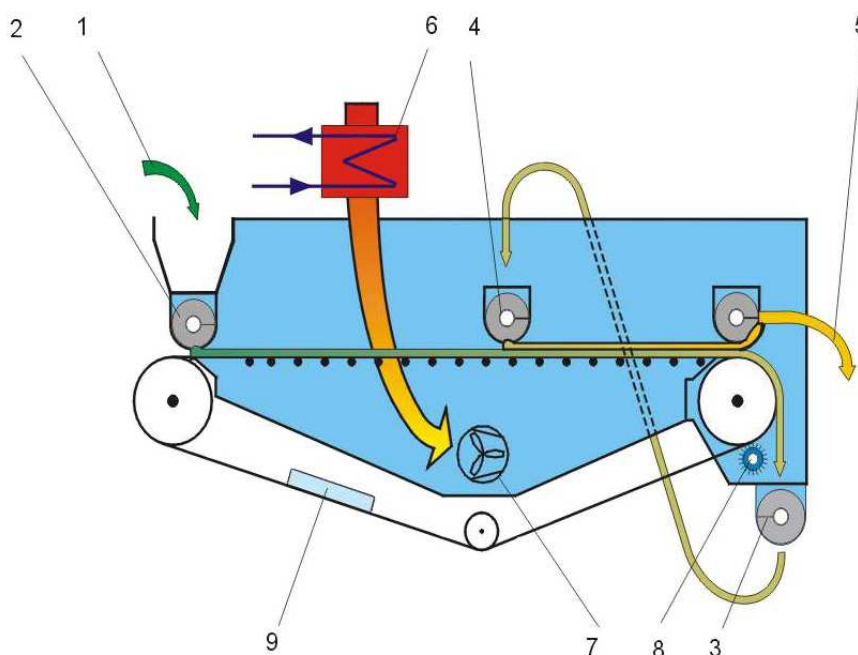
Obr. 5 Bubnová sušárna, upraveno dle [PRODESA, 2010a] 1 palivo, 2 kotel, 3 spaliny, 4 biomasa určená k sušení, 5 bubnová sušárna, 6 cyklon, 7 vysušená biomasa, 8 komín, 9 ventilátor

Pásová sušárna

Pásová sušárna je druhou nejrozšířenější sušárnou. Na obrázku 6 je pásová sušárna umožňující sušení ve dvou vrstvách. Tato konstrukční úprava umožňuje efektivní využití zastavěného prostoru [BENNETT, 2011]. Sušená biomasa se na vstupu rovnoměrně vrství na pás pomocí šnekového dávkovače. Zdrojem tepla je výměník voda/vzduch, ohřátý vzduch je nasáván ventilátorem přes vrstvu vysušené biomasy. Část použitého vzduchu se nahrazuje

čerstvým, zbytek cirkuluje. Jednotek výměník tepla – ventilátor je použito více, každá sekce sušárny tak může mít nastaven jiný sušící režim. Na konci pásu je spodní vrstva biomasy sebrána sběračem se šnekovým dopravníkem a znovu navrstvena k dosušení jako horní vrstva předsušené biomasy vrstvičkou s dopravníkem. Horní vrstva, která již dosahuje konečné vlhkosti, je odebírána a dopravována k dalšímu zpracování. Zpětný pohyb prázdného pásu je využíván k čištění jeho ok. K základnímu čištění dochází kontaktem pásu a rotujících kartáčů. Tak je získáno větší množství hmoty, která ulpěla v okách. Tato hmota se vrací zpět k dosušení. Pokud je pás zanesen tak, že rotující kartáče nestačí zajistit požadovanou průchodnost ok pásu, aktivuje se mokré čištění s tlakovou vodou. Aktivace mokrého čištění probíhá na základě měřené tlakové diference vznikající při průchodu proudu vzduchu přes pás.

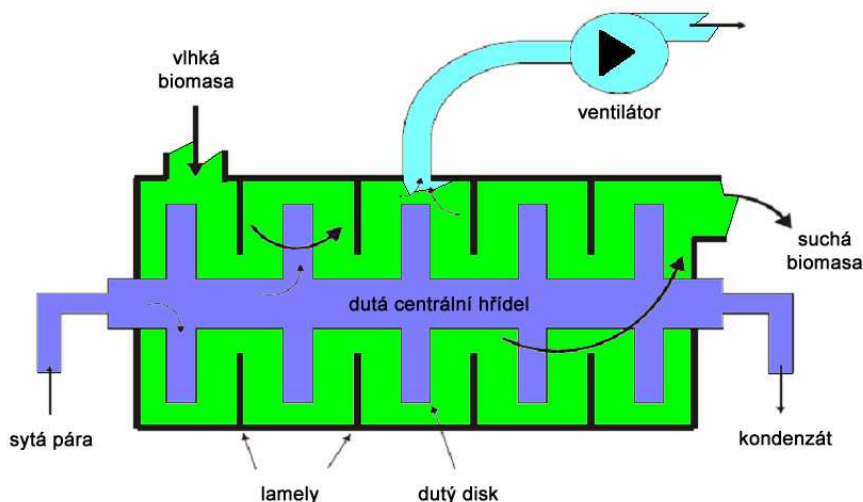
Rychlost pohybu pásu je řízena prostřednictvím frekvenčních měničů asynchronních elektromotorů v závislosti na technologických požadavcích. Vlhkost sušené biomasy je kontinuálně snímána na výstupu, ale často i na vstupu do sušárny. Sušícím médiem je horký vzduch o teplotách obvykle do 120°C. U pásové sušárny lze přesně regulovat požadovanou výstupní vlhkost, která je navíc rovnoměrná v celém sušeném objemu za sušárnou. Nedochozí tedy ani k lokálnímu přehřívání biomasy a tím degradaci ligninu potřebného při peletování. To je významná výhoda proti bubnovým sušárnám. Nízké teploty sušení umožňují využití odpadního nízkopotenciálního tepla kogeneračních jednotek, což zlepšuje ekonomiku jejich provozu. Pásové sušárny dosahují vyšší zbytkové vlhkosti (8 %) proti bubnovým (4 %).



Obr. 6 Pásová sušárna, upraveno dle [PRODESA, 2010b] 1 vstupující vlhká biomasa, 2 vrstvička vstupního materiálu, 3 šnekový dopravník spodní vrstvy, 4 vrstvička druhé vrstvy, 5 odběr horní vysušené vrstvy, 6 výměník tepla, 7 ventilátor, 8 čistící kartáč, 9 čištění tlakovou vodou

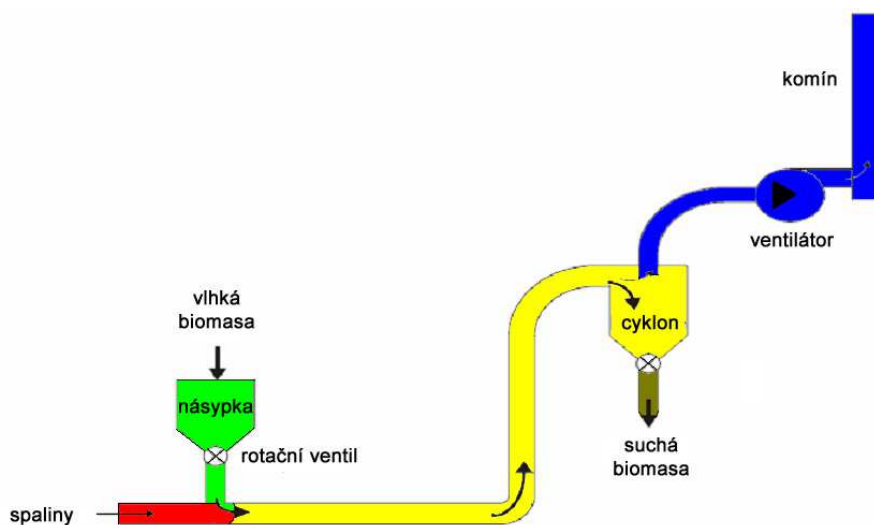
Mezi méně běžná konstrukční řešení sušárny, se kterými se lze setkat především v zahraničí, patří **disková a rozprašovací sušárna**. U diskové sušárny nedochází ke kontaktu sušené biomasy a sušícího média. Teplo je předáváno vedením pomocí rotujících disků na duté centrální hřídeli. Vnější plášť sušárny připomínající bubnovou sušárnu je stacionární, rotuje dutá centrální hřídel s disky. Odvod vlhkého vzduchu je zajištěn ventilátorem. Sušárna má nízké riziko vzniku požáru a dobré předpoklady využití rekuperace tepla. Sytá para může být

nahrazena horkou vodou. Disková sušárna je konstrukčně složitá a používá se spíše výjimečně pro malé kapacity.



Obr. 7 Disková sušárna, upraveno dle [AMOS, 1998]

Rozprašovací sušárna vyžaduje biomasu o malé frakci (piliny až prach), která je pneumaticky rozprašována do proudu spalin. Díky vysokým teplotám spalin a malým částicím sušeného materiálu je rychlost sušení v řádu sekund. Na výstupu sušárny je instalován cyklon pro oddělení biomasy a spalin. Rozprašovací sušárna je často používána (zahraničí) v provozech velkých peletáren, je-li třeba sušit pouze drobnou frakci. Největší výhodou je malá náročnost na prostor, riziko požáru je nižší než u bubnové sušárny. Zvláštním druhem rozprašovací sušárny je sušárna, kde běžné sušící médium – spaliny – je nahrazeno přehřátou parou. Výrazně se tak redukuje nebezpečí požáru, je možné využít rekuperaci tepla. Přehřátá pára jako sušící médium se používá u sušáren největších výkonů. Přehřátá pára může způsobovat vyluhování extraktivních látek, což způsobuje korozi zařízení [WORLEY, 2011; VAN DEVENTER, 2004]. Biomasa ochuzená o extraktivní látky může být hůře peletizovatelná. Nasazení tohoto typu sušárny je třeba vždy pečlivě zvážit. Systémy využívající páru nemohou použít nízkopotenciální odpadní teplo například kogeneračních jednotek. V tabulce 2 uvádím přehled základních vlastností zde uvedených typů sušáren. Tabulka 3 pak uvádí přehled základních energetických parametrů tří nepoužívanějších sušáren.



Obr. 8 Rozprašovací sušárna, upraveno dle [AMOS, 1998]

Tabulka 2 porovnání základních vlastností sušáren, upraveno dle [AMOS, 1998]

Typ sušárny	Požadavek drobného materiálu	Požadavek jednotné velikosti	rekuperace tepla	nebezpečí požáru	použití páry
bubnová	ne	ne	ne	vysoké	ano
pásová	ne	ne	snadná	nízké	ano
rozprašovací	ano	ne	složitá	střední	ne
disková	ne	ne	snadná	nízké	ano
přehřátá pára	ano	ne	snadná	nízké	ano

Tabulka 3 porovnání energetických parametrů sušáren, upraveno dle [HOLMBERG, 2007]

typ sušárny / parametr	bubnová	pásová	rozprašovací
rychlost vypařování vody [t/h]	3 - 23	0,5 - 40	4,8 - 17
sušící teplota [°C]	200 - 600	30 - 200	150 - 280
požadavek tepla na 1t vypařené vody [GJ/t]	3 - 4	1,26 – 2,5	2,7 – 2,8
možnost využití nízkopotenciálního tepla	ne	ano	ne
spotřeba elektrické energie	malá	střední	velká
emise prachu a VOC	střední	nízké	vysoké

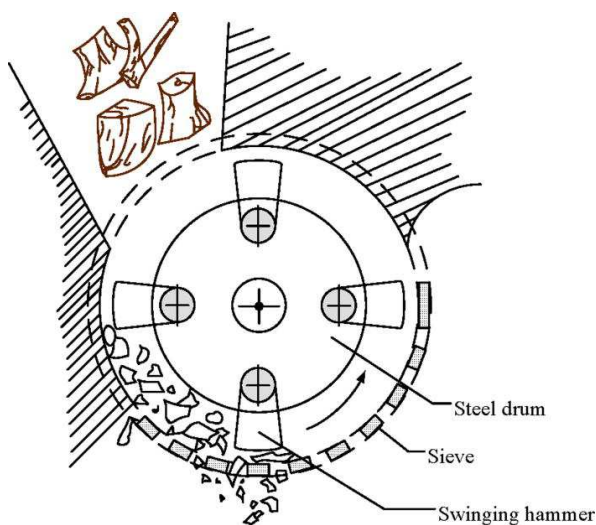
3.1.2 Dezintegrace

Před vlastním lisováním musí být materiál rozměrově upraven na maximálně polovinu výsledného průměru pelety. Pro běžný průměr pelet 6 nebo 8 mm je tak maximální doporučený rozměr lisované frakce 3 až 3,5 mm. Doporučená velikost částic pro dobrou kvalitu pelet je 0,6 až 0,8 mm [TURNER, 1995]. FRANKE & REY [2006] doporučuje velikost částic 0,5 až 0,7 mm. V tabulce 4 uvádím často citované doporučení optimálního složení jednotlivých frakcí směsi z pohledu vysoké kvality výsledných pelet [PAYNE, 2006]. Obecně platí, že velký podíl částic velikosti nad 1mm způsobuje snížení mechanické odolnosti pelet. Velký podíl jemných částic znamená velmi vysokou mechanickou odolnost výsledného produktu, ale jemné mletí je nežádoucí protože zvyšuje spotřebu energie [MIAO et al., 2011; MANI et al., 2005]. Optimálním řešením je směs různých velikostí částic, protože směs tvoří pevné spojení částic s minimem volného prostoru mezi jednotlivými částicemi [MACBAIN, 1966; PAYNE, 1978; GROVER & MISHRA, 1996].

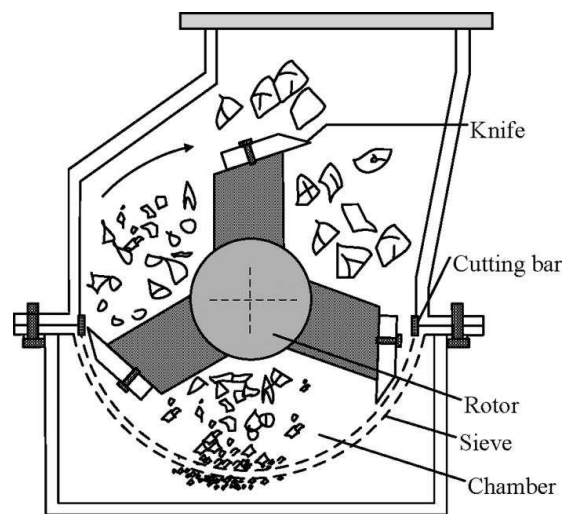
Tabulka 4 optimální složení jednotlivých frakcí směsi [PAYNE, 2006]

rozměr síta [mm]	hmotnostní podíl materiálu na sítu [%]
3,0	max. 1
2,0	max. 5
1,0	20
0,5	30
0,25	24
< 0,25	ne méně než 20

Technicky je dezintegrace řešena kladivovým nebo nožovým mlýnem. Nožový (střížný) mlýn vyžaduje ostření nožových nástrojů, dosahuje menšího rozptylu výstupních frakcí, ale má vyšší jednotkovou spotřebu energie na dezintegraci. Z uvedených důvodů je kladivový mlýn používán mnohem častěji.

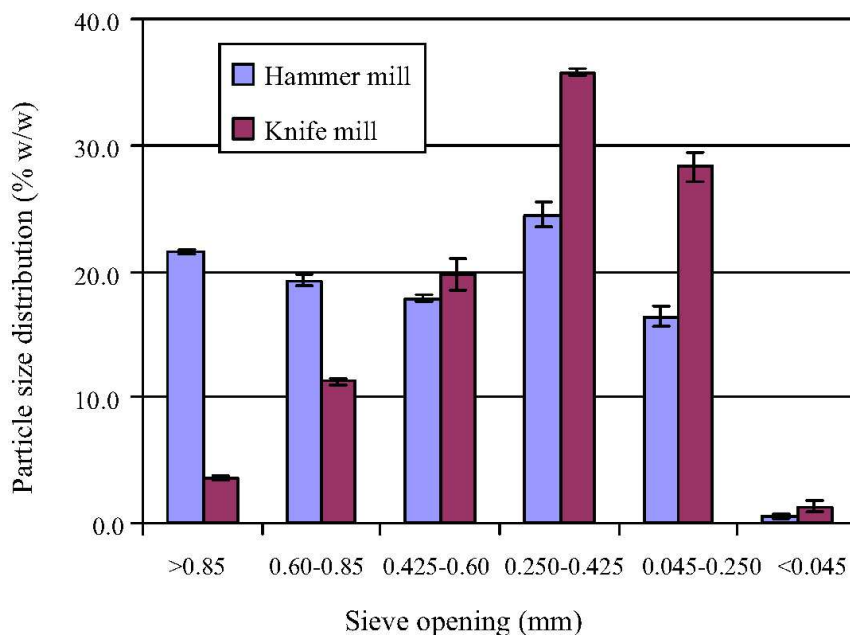


Obr. 9 kladivový mlýn, [Miao et al., 2011]

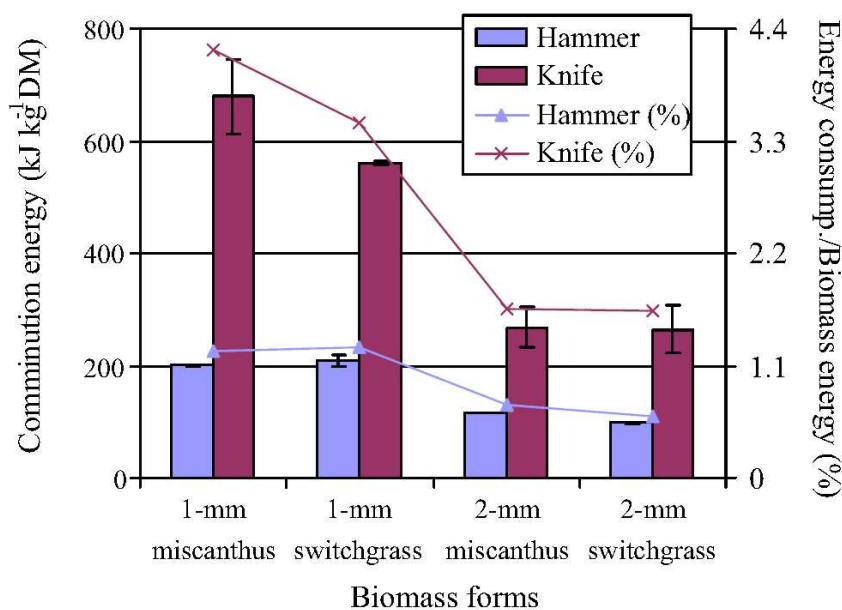


Obr. 10 nožový mlýn, [Miao et al., 2011]

Obrázek 11 uvádí výsledek sítové analýzy výstupní suroviny kladivového a nožového laboratorního mlýnu. Obrázek 12 porovnává měrnou energii spotřebovanou na dezintegraci jednotlivými stroji. Z uvedeného je vidět, že při jemném mletí s 1 mm sítím je spotřeba energie při použití kladivového mlýnu třetinová. V případě použití sít 2 mm výrazně klesá spotřebovaná energie u obou strojů. Rozdíly mezi nimi jsou pak menší, kladivový mlýn spotřebuje asi polovinu energie.

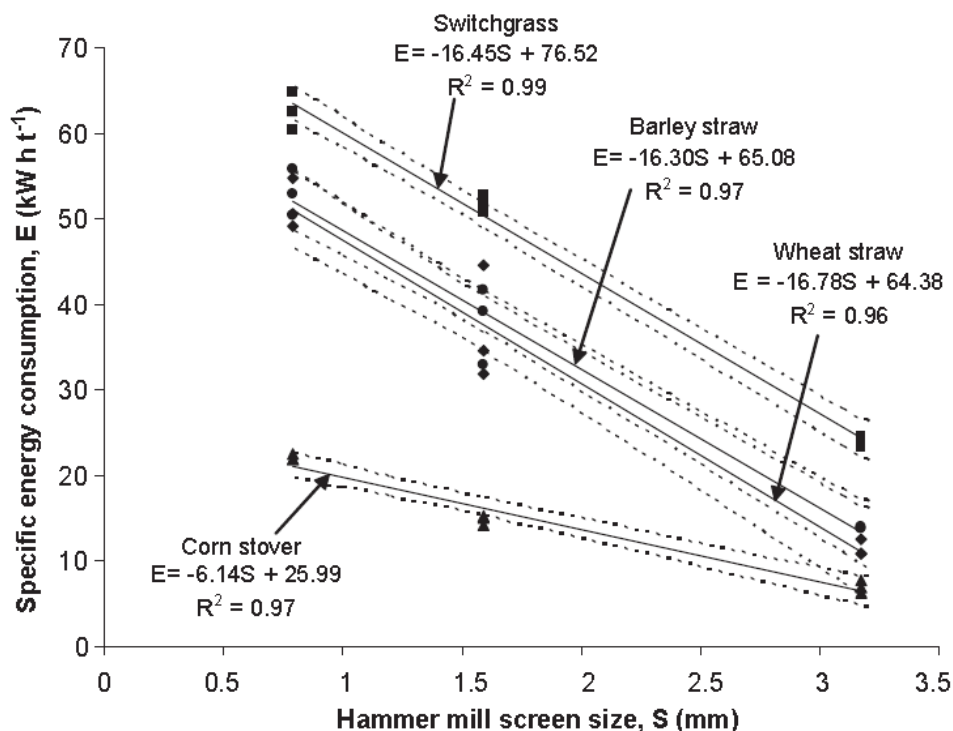


Obr. 11 Porovnání sítové analýzy dezintegrované biomasy kladivovým mlýnem Retsch SK100 a nožovým mlýnem Retsch SM2000 [Miao et al., 2011]

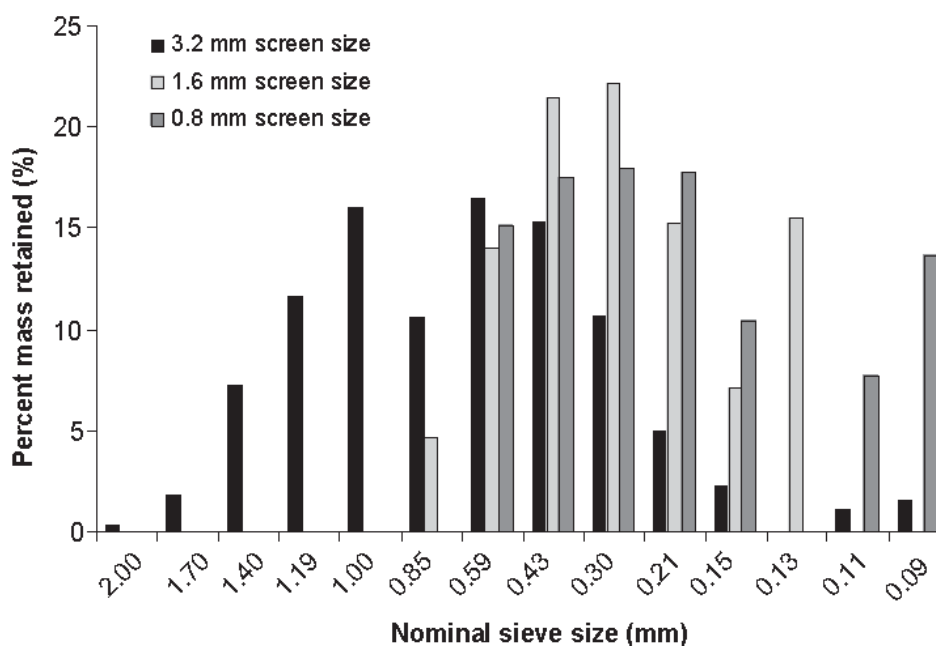


Obr. 12 Porovnání energie na dezintegraci biomasy kladivovým mlýnem Retsch SK100 a nožovým mlýnem Retsch SM2000 [Miao et al., 2011]

Spotřebu měrné energie na dezintegraci biomasy provozním kladivovým mlýnem stanovil [MANI et al., 2004; Adapa et al., 2011], přehledný graf je na obrázku 13. Je patrný výrazný nárůst spotřeby energie při použití malých ok síta. Na obrázku 14 je výsledek sítové analýzy dezintegrované pšeničné slámy z téhož kladivového mlýna. Podmínku optimálního složení jednotlivých frakcí směsi z pohledu vysoké kvality výsledných pelet, kterou stanovil [PAYNE, 2006], splňuje kladivový mlýn při použití sít o velikosti ok 3,2 mm. Uvedená skutečnost významně šetří energii spotřebovanou na dezintegraci biomasy.



Obr. 13 Spotřeba měrné energie pro dezintegraci prosa, ječmenné a pšeničné slámy, kukuřičných stonků kladivovým mlýnem. Vlhkost biomasy 8%. [MANI et al., 2004]



Obr. 14 Výsledky sítové analýzy částic pšeničné slámy dezintegrované kladivovým mlýnem s různou velikostí ok v síti. [MANI et al., 2004]

3.1.3 Kondicionování

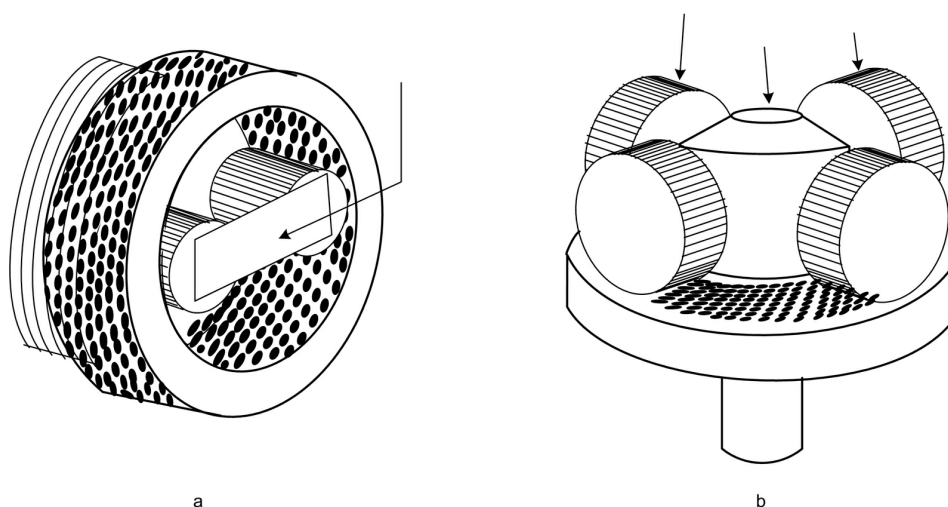
Vysušená biomasa před lisováním projde úpravou v podobě vlhčení, čímž se zajišťuje obohacení povrchových vrstev vodou. Tím je zaručeno lepší spojování jednotlivých částic biomasy a lepší průchodnost lisovací matricí. Voda se aplikuje rozstřikováním kapek do intenzivně míchaného množství kontinuálně procházející biomasy bezprostředně přes lisem.

V některých technologiích je rozstřikování vody nahrazeno vlhčením parou, což má navíc za následek přehřev biomasy a tím jednodušší plastifikaci ligninu. V této technologické fázi lze mimo vodu přidávat i aditiva.

3.1.4 Lisování

Peletovací lisy bývají označovány jako granulátory. Lisování probíhá na protlačovacím matricovém lisu, ve kterém je vysušená, dezintegrovaná a kondicionovaná biomasa protlačovaná přes kónické otvory v matrici pomocí válcových roln. Podle tvaru matrice rozeznáváme dva základní typy granulátorů. Granulátor s diskovou matricí (obr. 15b) je tvořen horizontálně umístěnou matricí ve tvaru disku, na které jsou umístěny dvě až čtyři rolly. Rotovat může matrice, rolly se pak volně otáčejí kolem své horizontální osy, ale nejsou poháněny. Ve druhém případě mohou rotovat rolly proti stacionární matrici. Granulátory s diskovou matricí mají na území ČR velkou tradici, protože byly již dříve používány jako granulátory krmných směsí. Jejich konstrukce je jednodušší a jsou vhodné do linek malých a středních výkonů. Typický rozsah použití granulátoru s diskovou matricí je do kapacity 1t pelet za hodinu.

Granulátor s prstencovou matricí (obr. 15a) je tvořen matricí prstencového tvaru s horizontální osou rotace. Na vnitřní stranu prstencové matrice přiléhají s elektronicky vymezenou technologickou vůlí obvykle dvě až tři rolly. V tomto uspořádání rotuje matrice, dochází ke stejnému principu tvorby pelet jako u granulátorů s diskovou matricí. Granulátor s prstencovou matricí je konstrukčně komplikovanější stroj, umožňuje však větší výkony, typicky nad 1t pelet za hodinu.



Obr. 15 a) granulátor (lis) s prstencovou matricí, b) granulátor (lis) s diskovou matricí, [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

3.1.5 Chlazení

Peleta bezprostředně za granulátorem dosahuje teploty 90 až 120 °C. Při této teplotě dochází k intenzivnímu přenosu zbytkové vlhkosti biomasy zevnitř pelety směrem na povrch, který je však difúzně uzavřený díky tenké hladké vrstvičce ligninu na povrchu. Voda v plynné podobě pohybující se díky vzniklému gradientu parciálních tlaků vodní páry ze středu na povrch tuto vrstvičku narušuje a tím výrazně snižuje stabilitu (mechanickou odolnost) celé pelety. Pokud se peleta nerozpadne hned, má díky porušené povrchové vrstvě nižší odolnost vůči přijímání vlhkosti z okolí a je tedy méně stabilní v celém procesu skladování. Z uvedeného důvodu je nezbytně nutné zchladit vyrobenou peletu na teplotu kolem 40 °C. To se děje nejčastěji průchodem pelet přes protiproudý nebo křížový vzduchový chladič.

3.1.6 Třídění

Především pelety určené pro spalování v kotlích malých výkonů mají stanoven maximální podíl jemných částic v palivu, který nemá přesahovat 1 % celkového objemu. Proto jsou pelety tříděny na vibračních nebo rotačních sítích s velikostí ok do 3,5 mm. Vytříděný odrol se vrací zpět před granulační lis či technologický uzel kondicionování.

3.1.7 Skladování

Vyrobené pelety je nutné před distribucí bezpečně uskladnit. To je realizováno ve skladovacích silech podobných obilným silům. Před expedicí jsou pelety baleny do 15 kg plastových pytlů nebo do textilních big-bagů o hmotnosti 500 až 1 000 kg. Další možností je zásobování koncového zákazníka cisternou, ve které jsou pelety přepravovány volně ložené.

3.2 Rozdělení peletáren dle velikosti

3.2.1 Peletárna velkého výkonu

Typickou technologií peletáren velkého výkonu je pásová sušárna a několik granulátorů s prstencovou maticí zapojených do technologického toku paralelně z důvodu eliminace odstávek technologie v případě poruchy na lisu. Typickou roční výrobní kapacitou takového technologického uspořádání jsou hodnoty od 20 000 tun pelet. Například největší tuzemský výrobce pelet a zároveň jeden z nejmodernějších provozů v Evropě - firma Mayer -Melnhof Pellets z Paskova má roční výrobní kapacitu 100 000 tun pelet. Uvedená kapacita představuje asi dvojnásobek celkové spotřeby pelet v ČR.



Obr. 16 Pásová sušárna, [PRODESA, 2010b]



Obr. 17 Peletovací lisy s prstencovou maticí, [PRODESA, 2010b]

3.2.2 Peletárna středního výkonu

Typickou technologií peletáren středního výkonu je bubnová sušárna a obvykle jeden až tři peletovací lisy s diskovou maticí zapojené do technologického toku paralelně, což umožňuje eliminovat odstávky technologie v případě poruchy na granulátoru. Typickou roční výrobní kapacitou takového technologického uspořádání je 1 000 až 10 000 tun pelet. Odpovídající výkon granulátorů je 400 až 4 000 kg za hodinu při dvojsměnném provozu.



Obr. 18 Bubnová sušárna, [ATEA, 2010]



Obr. 19 Peletovací lis s diskovou maticí, [ATEA, 2010]

3.2.3 Malá granulační linka

Typickým představitelem linek malého výkonu jsou linky výrobce KOVO Novák, jejíž typ MGL200 je součástí naší laboratoře biopaliv. Linka má kapacitu asi 100 kg dřevních pelet za hodinu, v případě produkce agropelet může být kapacita až dvojnásobná, v závislosti na zpracovávaném materiálu. Linka je vhodná pro provozy, kde je k dispozici biomasa bez nutnosti sušení, tedy pro stolárny, nebo zemědělské farmy.



Obr. 20 Peletovací linka MGL200 bez čerpadla vlhčení
1 vstupní zásobník, 2 šnekový elevační dopravník, 3 kondicionér, 4 peletovací lis,
5 chladicí a třídící válec, 6 zásobník vyrobených pelet

Vstupní surovina o požadované vlhkosti 8 až 15 % (podle druhu biomasy) je skladována v malém zásobníku (1) odkud je vyhrabována šnekovým elevačním dopravníkem (2) do prostoru hradítka ovládaného kolečkem na závitové tyči. Kolečkem se nastavuje šterbina hradítka a tím množství biomasy, která samospádem propadá do prostoru kondicionéru (3). Zbývající množství biomasy přepadává potrubím zpět do zásobníku. Celý proces regulace zpracovávaného množství lze sledovat průhledítkem. Kondicionér (3) je tvořen horizontálně orientovanou trubkou s míchací tyčí. Do pláště kondicionéru je zaústěna tryska vlhčení, která je přes pulzní čerpadlo zásobena vodou z nádrže. Množství dodávané vody je přímo regulováno potenciometrem na čerpadle.

Kondicionovaná biomasa propadá přímo do válce peletovacího lisu (4). Zde na biomasu působí pára vytvořená teplem vzniklým přeměnou energie motoru lisu (7,5 kW) a vody z biomasy. Na dně válce biomasa dopadá na rotující disk matrice a za pomoci dvou rolen dochází k protlačování biomasy přes matrici. Velikost lisovacího tlaku je nastavována dvěma šrouby, které regulují mezeru mezi matricí a rolnami. Tato operace je náročná na zkušenosti obsluhy, při příliš velkém dotažení šroubů může dojít k rozválčení matrice. V případě malého dotažení vzniká peleta s nedostatečnou pevností nebo dojde k přetížení elektromotoru lisu, v závislosti na dopravovaném množství biomasy do lisu. Nastavení šroubů je regulováno podle zvuku odvalujících se rolen po matrici a na základě indikace protékajícího proudu měřenou fází elektromotoru lisu pomocí klešťového ampérmetru umístěného na ovládacím panelu linky.

Námi provozovaná linka je vybavena centrálním mazáním hřídele rolen, které je třeba mazat v krátkých časových intervalech, neboť absence centrálního mazání by vyžadovala stálý dohled obsluhy. Linka obsahuje několik dalších mazacích míst, ty se však mažou ručně

tlakovou maznicí vždy před každou směnou. Na výstupní straně peletovací matrice je umístěn nůž, o který se láme kontinuálně tvořená peleta na požadovanou délku. Poté jsou pelety gravitačně plechovým skluzem dopravovány do prostoru kombinovaného chladiče s rotačním třídičem. K peletám klouzajícím po skluzu je snadný přístup umožňující kontinuální kontrolu lisovaného produktu ještě před vstupem do chladiče. Posouzení kvality pelet bezprostředně za granulačním lisem je dalším vstupním parametrem který slouží k nastavení linky pro danou směs. Chladič je realizován jako skloněné rotační síto v protiproudu ofukované chladícím vzduchem. Odrol padající pod síto je dopravován zpět do zásobníku na vstupu linky. Na výstupu síta padají zchlazené a vytříděné pelety do přistavené nádoby. Výstup ze síta je pouze několik cm od podlahy, proto neumožňuje umístění objemnějšího zásobníku. Z toho důvodu je praktické linku vybavit elevačním pásovým nebo korečkovým dopravníkem.

Vstupními veličinami do procesu manuální regulace linky jsou:

1. zvuk odvalování rolen po matrici
2. proud motoru lisu
3. kvalita pelet bezprostředně za lisem

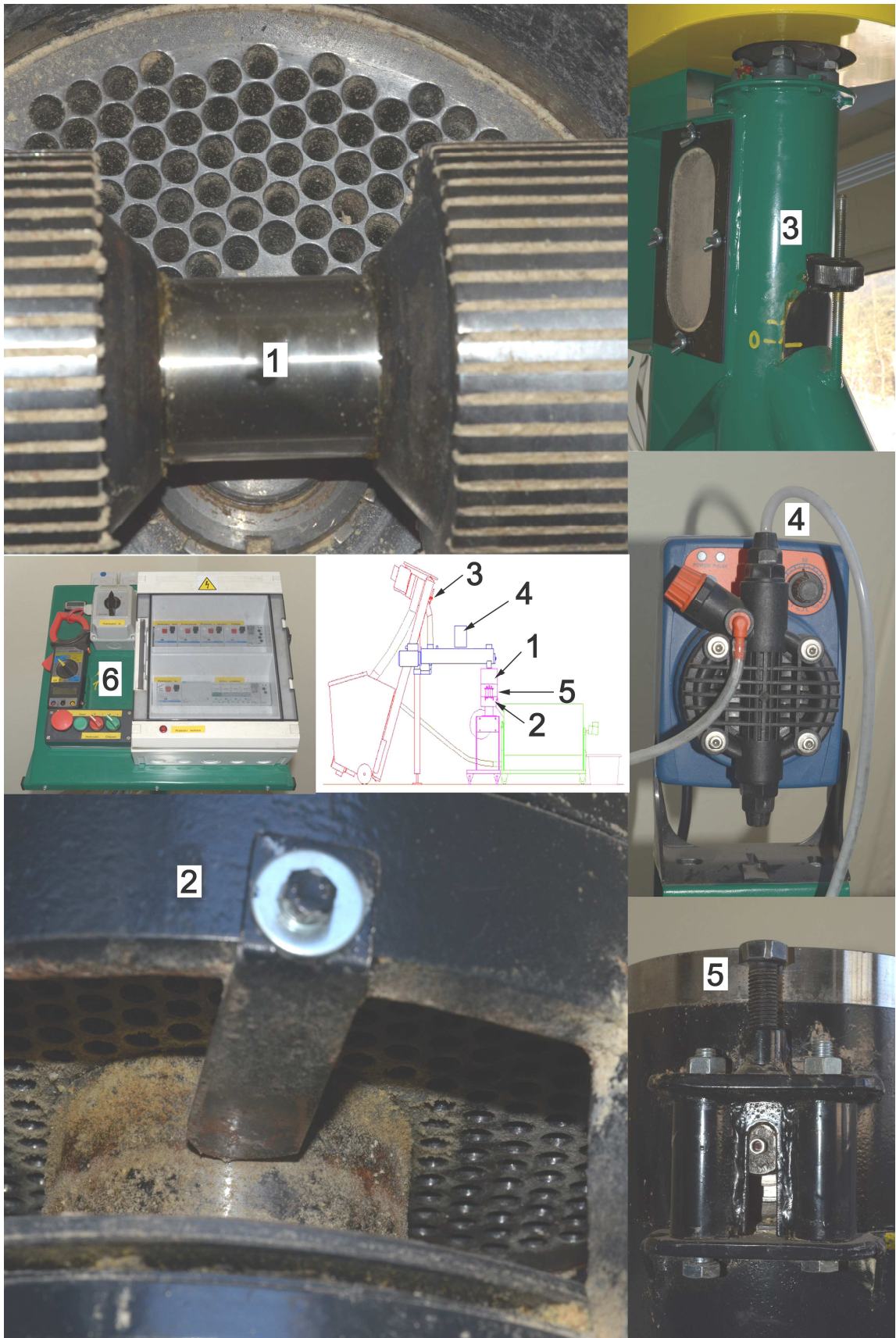
Regulačními prvky, kterými lze vyregulovat linku jsou:

1. poloha hradítka na vstupu biomasy
2. poloha šroubů hřídele rolen
3. intenzita dávkování vody či aditiv

Při odstavení linky na konci směny je bezpodmínečně nutné zajistit, aby granulovaná biomasa nezůstala v otvorech matrice lisu. Po jejím vytvrnutí by byla matrice již nepoužitelná. Jednou z možností, používaných ve velkých provozech, je aplikace jiného složení lisované směsi těsně před odstavením. Tato směs se vyznačuje tím, že ji nelze lisovat. Po odstavení lisu se nevytvoří pevný špunt směsi v otvorech matrice a při dalším spuštění lisu je směs z otvorů matrice vytlačena automaticky nově se formující peletou. Základní látkou takové směsi je olej. Je však nutné zabránit kontaminaci vyráběných pelet touto směsí. Další možností, často používanou u linek malých výkonů je odvtání matrice bezprostředně po odstavení linky.

Na obrázku 21, pozice 6 je fotografie ovládacího panelu granulační linky. Vzhledem k tomu, že jde o technologicky nejjednodušší linku, ovládací panel obsahuje pouze rozvaděč s jištěním jednotlivých motorů, vypínače dopravníků a vlastního granulátoru. Veškerá regulace je prováděna obsluhou manuálně. Kvalita výsledného produktu je tak silně závislá na schopnostech obsluhy. Díky této minimalistické verzi je možné pořídít linku MGL200 za cenu kolem 200 tisíc Kč. Na základě vlastních terénních šetření u různých majitelů linky MGL200 bylo zjištěno, že investice do linky se jim vrátila za méně než jeden rok, a to při jednosměnném provozu. Vzhledem ke kapacitě linky je výhodnou přidruženou výrobou všude tam, kde je k dispozici vhodná biomasa bez nutnosti použít sušárnu. Zajištěný odbyt pelet je samozřejmě nezbytnou podmínkou každé fungující ekonomiky podniku.

V současné době je na trhu v ČR nabízeno velké množství malých granulačních lisů především zahraniční výroby. Je třeba uvést že použití takových granulátorů je z hlediska nabízené ceny velmi lákavé, ale jejich využití bez zapojení do kompletní linky je prakticky nemožné. Diskutabilní je rovněž kvalita „levných“ granulátorů. U mnohých z nich jde o výrobky nabízené v zemi svého původu ke granulaci krmných směsí, při jejichž výrobě se však nevyskytují tak velké tlaky mezi maticí a rolnami jako při výrobě dřevěných pelet. Následkem tohoto nevhodného použití je nízká životnost lisu končící až mechanickou destrukcí.



Obr. 21 Peletovací linka MGL200 v detailech. 1 rolny a matrice, 2 ořezávací nůž pod maticí v pohledu z výstupního skluzu pelet, 3 hradítko k regulaci průtoku biomasy, 4 čerpadlo vlhčení, 5 přítlačný šroub rolen, 6 rozvaděč

3.3 Energetické nároky peletování

Důležitou otázkou z hlediska nejen ekonomiky provozu, ale i z hlediska environmentálního, je celková spotřeba elektrické a tepelné energie na jednotkovou produkci pelet. Celkovou spotřebu el. energie při výrobě pelet ze dřeva odhaduje [MANI et al., 2006] na 470 kWh/t což je asi 9,5 až 10 % energetického obsahu pelet. Do této spotřeby započítává energii kladivového mlýnu, peletovacího lisu, chlazení a třídění pelet. [BALATINECZ, 1983] uvádí, že 1 až 3 % energetického obsahu biomasy jsou potřebné pro lisování, 2 až 3 % pro dezintegraci a 7 až 15 % pro sušení v závislosti na vstupní vlhkosti biomasy. Celková účinnost výroby biomasy je 88 až 93 %. Jako typickou hodnotu spotřeby energie pro sušení uvádí [MANI et al., 2005] 80 až 980 kWh/t, pro dezintegraci 30 až 50 kWh/t a pro lisování 30 až 80 kWh/t.

[REED & BRYANT, 1978] uvádí spotřebu peletovacího lisu 36,8 kWh/t pro piliny, [MILES & MILES, 1980] uvádí 30 až 45 kWh/t pro dřevo s kůrou a 37 až 64 kWh/t pro slámu s pojivky. [NEALE, 1986] uvádí pro slámu 22 až 55 kWh/t a [TABIL AND SOKHANSANJ, 1996] uvádí 33 až 61 kWh/t pro trávu. Nejnížší hodnotu 30 kWh/t uvádí [TABIL & SOKHANSANJ, 1996] pro vojtěšku a nejvyšší hodnotu 74,5 kWh/t [MILES & MILES, 1980] u prosa.

Na našem pracovišti bylo provedeno několik testů, při kterých byla měřena celková spotřeba elektrické energie linky MGL200 a za stejnou časovou jednotku byly váženy vyrobené pelety. Odměr obou hodnot probíhal vždy v ustáleném režimu linky. Z uvedených testů vyplývá variabilita v dosahované spotřebě elektrické energie v rozmezí od 60 kWh/t do 140 kWh/t v závislosti na peletované směsi. V literatuře je uváděna poloviční spotřeba elektrické energie středně velkých a velkých peletovacích lisů. Jednotková spotřeba peletovacího lisu je tím menší, čím je větší jeho kapacita. Navíc u těchto lisů bývá zabudováno kondicionování parou, které významně snižuje spotřebu energie lisu. U velkých linek naopak narůstá spotřeba elektrické energie pomocných technologií a je nezbytné dodávat tepelnou energii pro procesy sušení.

V peletě vyrobené malou i velkou linkou je tedy zabudované řádově stejné množství elektrické energie spotřebované na její výrobu. Na základě údajů uvedených v literatuře, ale i podle vlastních měření lze konstatovat, že energetická peleta je nejušlechtlejší forma tuhých biopaliv s minimální energetickou účinností výroby 80%. Jinými slovy, minimální hodnota COP je 5.

Malá peletovací linka může využít lokálních zdrojů biomasy z bezprostředního okolí, zdroje pro velké linky je třeba mnohdy dovážet ze vzdáleností větších než 50 km. Zahrnutím energie dopravy do hodnocení energetické náročnosti technologií by uvedené výsledky mohly být diametrálně odlišné. Jednoduchý příklad, jak doprava ovlivňuje zabudovanou (šedou) energii a cenu výsledného biopaliva, je uveden v kapitole 8 „Doprava tuhých biopaliv“.

4 Výroba krátkého kusového dříví

V rámci spolupráce s firmou Rojek byly provedeny praktické testy drtiče DH10sp. Drtič DH10sp je vybaven dvoutaktním spalovacím motorem Honda o výkonu 5,5HP a pytlovacím zařízením. Drtič tak ke své činnosti nevyžaduje traktor s vývodovou hřídelí, pytlovací zařízení výrazně zefektivňuje balení výsledného produktu do formy vhodné pro další manipulaci.



Obr. 22 drtič Rojek DH10sp v originálním provedení

Drtič je určen pro výrobu krátkého kusového dříví z větví do maximálního průměru 10 mm, které dělí podélně na kusy o délce 50 až 120 mm. Výsledná frakce dříví je pytlována do rašlových pytlů, ve kterých je složeno na místě určeném k vysušení. Vzhledem k průměru jednotlivých kusů 1 až 10 cm a délce 5 až 12 cm lze výsledný produkt nazvat krátké kusové dříví (KKD). Díky optimální frakci KKD lze při skladování během osmi až deseti týdnů v letním období dosáhnout vzduchosuché vlhkosti (cca 20 %), která je vhodná pro spalování v dřevozplynujících kotlích.

Vzhledem k rozměrným výstupním frakcím KKD ve srovnání se štěpkou má drtič DH10 velmi nízkou spotřebu paliva, která se pohybuje v rozmezí od 0,5 do 0,7 litru benzínu za hodinu při průměrném hodinovém výkonu 2 m³. Z hlediska dřevin je největšího výkonu dosahováno u větví které netvoří košatou korunu, například jasan a líska. Naopak biomasa z prořezávek sadů, zejména jabloní vyžaduje před vlastním zpracováním drtičem ruční dělení větví motorovou pilou nebo sekerou. Čerstvé jasanové větve lze zpracovávat bez problémů až do tloušťky 12 cm. Suché větve listnáčů lze zpracovat pouze do průměru 5 cm. Duté větve bezu černého se podélně rozpadají na několik třísek. Další vliv na výkon drtiče má rozložení biomasy na ploše. Časté přejíždění a snášení biomasy výrazně snižuje kapacitu. Rozptyl výkonu byl zjištěn v rozmezí 0,5 m³ za hodinu v jabloňovém sadě při zpracování proschlých větví až po 3 m³ za hodinu při zpracování vykácené plochy jasanových výmladků. Souhrnné informace z měření výkonu a spotřeby paliva jsou uvedeny v tabulce 5 a 6.

Tab. 5 zpracování prořezávek v jabloňovém sadu

parametr	hodnota	jednotka
doba práce	3	h
počet pytlů	17	ks
hmotnost KKD	328	kg _{db}
sypaná hmotnost	233	kg _{db} /m ³
výkon	109	kg _{db} /h
výkon	0.469	m³/h
spotřeba paliva	1.4	l
měrná spotř. pal.	0.467	l/h

Tab. 6 zpracování jasanových výmladků

parametr	hodnota	jednotka
doba práce	3	h
počet pytlů	99	ks
hmotnost KKD	1930	kg _{db}
sypaná hmotnost	210	kg _{db} /m ³
výkon	643	kg _{db} /h
výkon	3.063	m³/h
spotřeba paliva	1.9	l
měrná spotř. pal.	0.633	l/h

Vyšší kapacity bylo dosahováno v případě pojíždění s drtičem v terénu s následným sběrem jednotlivých hromad napytlovaného KKD. Původní koncepce stroje na vysokém podvozku, standardně vyráběná firmou Rojek (obr. 22) nebyla pro pojíždění v terénu vhodná. Vzhledem k využití relativně velké investice je vhodné sdílení stroje mezi několika uživateli. Tato skutečnost vyžaduje snadný přesun stroje po pozemních komunikacích. Původní verze stroje byla přepravována na běžném přípojném vozíku za osobním automobilem. Vzhledem k rozměrům a hmotnosti stroje vyhoví prakticky každý vozík. Nevýhodou je nízká stabilita jízdní soupravy díky vysokému těžišti stroje. To výrazně omezuje cestovní rychlost především na silnicích třetí třídy.

Vhodným řešením nedostatků silniční i terénní přepravy je změna koncepce běžně montovaného podvozku. Naše konstrukce využívá nízký podvozek na průmyslových kolech malého průměru [KLEPÁRNÍK & VEVERKA, 2011]. Původní výšku stroje je tak možné snížit o 30 až 50 cm. Nová průmyslová kola umožňují bezproblémovou manipulaci se strojem na betonových plochách hal či v garážích. Pro přepravu je pak stroj naložen na automobilový vozík

a fixován jedním pásem, pro zvýšení přepravní stability jsou jeho kola zajištěna brzdou. V případě použití vozíku s koly vedle ložné plochy má drtič s upraveným podvozkem stejnou pracovní výšku jako drtič s původním podvozkem ovšem stojící na zemi. Po silničním přesunu je tedy možno přepřáhnout vozík s drtičem za malotraktor, nebo terénní automobil či čtyřkolku a drtič používat běžným způsobem bez nutnosti sjetí z vozíku. Za vhodnou úpravu považují centrální čep podvozku, který umožňuje dostatečnou fixaci drtiče na vozíku bez použití pásu. To však vyžaduje konstrukční zásah do ložné plochy vozíku, ideálním řešením je překližková podlaha vozíku. V případě šířky nákladní plochy vozíku alespoň 1250 mm je pak možné po odbrzdění kol drtiče jednoduše celý stroj otočit okolo čepu o 90°. Pytlovací zařízení se tak přesune mimo ložnou plochu vozíku.



Obr. 23 drtič Rojek DH10sp s úpravou podvozku [KLEPÁRNÍK & VEVERKA, 2011]



Obr. 24 Větve jasanu pro výrobu KKD



Obr. 25 Větve bezu černého

5 Vlastnosti tuhých biopaliv

V této kapitole uvádím přehled základních vlastností tuhých biopaliv se zvláštním zřetelem na pelety. Jsou zde uvedeny výsledky výzkumných zpráv, normativní předpisy a vztahy mezi jednotlivými vlastnostmi, které jsou podstatné pro praktické využití tuhých biopaliv (pelet).

ČSN EN 14961 Tuhá biopaliva. Specifikace a třídy paliv.

Norma poskytuje celoevropsky jednoznačnou klasifikaci tuhých biopaliv. Tím je zjednodušeno obchodování z důvodu jasné a jednoznačné definice parametrů paliv mezi dodavatelem a odběratelem, a to především na nadnárodní úrovni. Biopaliva zahrnutá do této normy jsou identická s palivy vyňatými ze směrnice 2000/76/ES O spalování odpadu.

Základní předpis definuje požadované vlastnosti tuhých biopaliv na evropské úrovni. Je rozdělena na několik dílů:

1. Obecné požadavky
2. Dřevní štěpka pro maloodběratele
3. Dřevní brikety pro maloodběratele
4. Dřevní pelety pro maloodběratele
5. Palivové dřevo pro maloodběratele
6. Nedřevní pelety pro maloodběratele (dosud nevydána)

Slovní spojení „pro maloodběratele“ zde znamená použití příslušných tuhých biopaliv ve spalovacích zařízeních malých výkonů, která jsou charakterizována jednodušší regulací procesu spalování, jednodušším mechanismem čištění spalin, nejsou zpravidla obsluhovány profesionály z oboru spalování a jsou umístěny v obytných a zalidněných oblastech. Patří sem například vytápění obytných budov, domácností a provoz menších komerčních kotlů.

Specifikace tuhých biopaliv je provedena podle:

- původu a zdroje
- obchodní formy
- vlastností

Základní dělení původu je na dřevní, na bylinnou a ovocnou biomasu. Například dřevní biomasa se dále dělí na dřevní biomasu původem z lesa či plantáží, z dřevozpracujícího průmyslu a nebo jako dřevo použité. Původ a zdroj tuhých biopaliv určuje mnohé fyzikální a chemické vlastnosti, například spalné teplo, výhřevnost při dané vlhkosti, obsah popela a jeho charakteristické teploty, obsah prchavé hořlaviny, obsah jednotlivých chemických prvků.

Hlavní obchodní formy tuhých biopaliv jsou uvedeny v tabulce 7. Obchodní forma tuhých biopaliv určuje fyzikální vlastnosti jako jsou rozměry, sypná hmotnost, hustota částic, mechanická odolnost. Pro každou obchodní formu se definují jiné vlastnosti. Například mechanická odolnost má význam jen pro pelety a brikety, zatímco rozměry jsou definovány pro všechny obchodní formy tuhých biopaliv.

Vlastnosti se dělí na normativní a informativní. Výrobci mají povinnost uvádět normativní vlastnosti. Uvedení informativních vlastností umožňuje lépe popsat daný druh paliva, pokud však není domluveno jinak, není povinným údajem.

Tab. 7 Hlavní obchodní formy tuhých biopaliv, podle [ČSN EN 14961-1].

Název paliva	Typická velikost částic	Běžná metoda přípravy
Celý strom	> 500 mm	bez přípravy
Palivové dřevo	100 mm až 1000 mm	řezání ostrými nástroji
Dřevní štěpka	5 mm až 100 mm	řezání ostrými nástroji
Rozdrcené dřevní palivo	různá	drcení tupými nástroji
Kůra	různá	odkornění zbytků stromů
Otep, snop	různá	podélným orientováním a svázáním
Palivový jemný prach	< 1 mm	mletí
Piliny	1 mm až 5 mm	řezání ostrými nástroji
Hoblíny	1 mm až 30 mm	hoblování ostrými nástroji
Brikety	průměr \geq 25 mm	mechanické stlačení
Pelety	průměr \leq 25 mm	mechanické stlačení
Balíky malé čtverhranné velké čtverhranné kulaté	0,1 m ³ 3,7 m ³ 2,1 m ³	stlačením a svázáním
Řezanka ze slámy nebo z energetických travin	10 mm až 200 mm	rozřezání během sklizení nebo před spálením
Zrno nebo semena	různá	bez přípravy nebo sušení vyjma operací nutných pro skladování obilnin
Ovocné pecky nebo jádra	5 mm až 15 mm	bez přípravy nebo lisování a extrakce chemikáliemi
Vláknité výlisky	různá	příprava vláknitého odpadu odvodněním

Je-li známý původ biomasy, manipulace i metoda přípravy, potom není nutná fyzikálně – chemická analýza vlastností. Pro minimalizaci nákladů na analýzy je možno použít jiné postupy stanovení vlastností, a to v následujícím pořadí:

- použití typických hodnot vlastností
- výpočet vlastností
- provedení analýzy
 - zjednodušenou metodou (je-li k dispozici)
 - referenční metodou

Použití typických hodnot vlastností je dáno možností použít hodnoty uvedené v databázích, kam byly zapsány na základě řady experimentálních měření mnoha evropských laboratoří zabývajících se výzkumem tuhých biopaliv. Nejznámějšími databázemi jsou databáze Phyllis, navržená a spravovaná holandským výzkumným centrem „Netherlands Energy Research Foundation (ECN)“ [VAN DER DRIFT & VAN DOORN, 1998] a databáze BIOBIB, kterou spravuje TU Vídeň [REISINGER, et al, 1996]. Mnohé hodnoty jsou uvedeny přímo v ČSN EN 14961-1. Databáze typických hodnot vlastností mohou být použity pro indikaci vlastností, nemohou být použity pro limity parametrů paliv. Odpovědnost výrobce nebo dodavatele za poskytnutí správných a přesných informací je úplně stejná, je-li laboratorní analýza provedena anebo ne. Databáze vlastností jsou tak velmi důležité z hlediska předpokládaného chování tuhých biopaliv v procesu jejich spalování. Například vyšší obsah chlóru signalizuje větší problémy s nízkoteplotní korozí kotlových výměníků malých zdrojů tepla, vyšší obsah sodíku a draslíku signalizuje nebezpečí spékání popela.

ČSN EN 14961-2:2011 Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Dřevní pelety pro maloodběratele.

Pelety odpovídající této ČSN se mohou používat v kamnech na pelety zkoušených podle EN 14785, v hořácích na pelety zkoušených podle EN 15270 a v kotlích na pelety nebo v systémech integrovaných hořáků na pelety zkoušených podle ČSN EN 303-5. Jde tedy o použití pelet u maloodběratelů.

Použitým dřívím není dřevo z demolic, to spadá do kategorie „použité dřevo pocházející z demolic budov nebo staveb“ dle [ČSN EN 14588, kapitola 4.52]. Pelety získané karbonizací (pražené pelety) nejsou zahrnuty do předmětu této normy.

Norma definuje tři třídy kvality pelet. A1, A2 a B. Zdrojem biomasy pro kvalitu třídy A1 a A2 je přírodní, chemicky neošetřené dříví. Třída B připouští jako zdroj biomasy použité dříví, ale bez chemického ošetření, které obsahuje těžké kovy a halogenované organické sloučeniny, tedy dřevo bez ochrany chemickými prostředky a nátěry. Třída A2 na rozdíl od třídy A1 připouští vyšší obsah popelovin, dusíku a chlóru. Přehledně jsou definované vlastnosti jednotlivých tříd uvedeny v tabulce 8.



Obr. 26. Vliv komprese paliva na energetický obsah.
Hromádky obou obchodních forem biomasy představují stejný energetický obsah.

Agropelety vhodné pro využití v malých zdrojích tepla musí splňovat normu [ČSN EN 14961-6:2012] Tuhá biopaliva. Specifikace a třídy paliv. Část 6: Nedřevní pelety pro maloodběratele.

Požadované vlastnosti tuhých biopaliv pro kotle s ručním přikládáním (kusové dřevo a brikety) definuje norma: „Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 3: Dřevní brikety pro maloodběratele“ [ČSN EN 14961-3:2011] a norma: „Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 5: Palivové dřevo pro maloodběratele“ [ČSN EN 14961-5:2011].

Požadované vlastnosti štěpku definuje norma: „Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 4: Dřevní štěpka pro maloodběratele“ [ČSN EN 14961-4:2011].

Tab. 8 Specifikace normativních vlastností dřevních pelet pro maloodběratele, podle [ČSN EN 14961-2:2011].

Vlastnost	Jednotka	Třída vlastnosti		
		A1	A2	B
Původ a zdroj		1.1.3 Kmenové dříví 1.2.1 Chemicky neošetřené dřevní zbytky	1.1.1 Celé stromy bez kořenů 1.1.3 Kmenové dříví 1.1.4 Zbytky po těžbě dřeva 1.1.6 Kůra (z průmyslového zpracování) 1.2.1 Chemicky neošetřené dřevní zbytky	1.1 Lesní, plantážové a jiné přírodní dřevo 1.2 Vedlejší produkty z zbytky z dřevozpracujícího průmyslu 1.3 Použité dřevo
Průměr D a délka L	mm	D06: 6 ± 1 ; $3,15 \leq L \leq 40$ D08: 8 ± 1 ; $3,15 \leq L \leq 40$		
Obsah vody M	$\%_w$ v původním stavu, vlhký stav	M10: ≤ 10		
Obsah popela A	$\%_w$ v sušině	A0.7: $\leq 0,7$	A1.5: $\leq 1,5$	A3.0: $\leq 3,0$
Mechanická odolnost DU	$\%_w$ v původním stavu	DU97.5: $\geq 97,5$		DU96.5: $\geq 96,5$
Obsah jemných částic F	$\%_w$ v původním stavu	F1.0 $\leq 1,0$		
Přísady	$\%_w$ v sušině	$\leq 2,0$, určit typ a množství		
Výhřevnost Q	MJ/kg nebo kWh/kg, v původním stavu	Q16.5: $16,5 \leq Q \leq 19$ nebo Q4.6: $4,6 \leq Q \leq 5,3$	Q16.3: $16,3 \leq Q \leq 19$ nebo Q4.5: $4,5 \leq Q \leq 5,3$	Q16.0: $16,0 \leq Q \leq 19$ nebo Q4.4: $4,4 \leq Q \leq 5,3$
Sypná hmotnost BD	kg/m ³	BD600: ≥ 600		
Obsah dusíku N	$\%_w$ v sušině	N0.3 $\leq 0,3$	N0.5 $\leq 0,5$	N1.0 $\leq 1,0$
Obsah síry S	$\%_w$ v sušině	S0.03 $\leq 0,03$		S0.04 $\leq 0,04$
Obsah chlóru Cl	$\%_w$ v sušině	Cl0.02 $\leq 0,02$		Cl0.03 $\leq 0,03$
Obsah arzenu As	mg/kg sušiny	≤ 1		
Obsah kadmia Cd	mg/kg sušiny	$\leq 0,5$		
Obsah chromu Cr	mg/kg sušiny	≤ 10		
Obsah mědi Cu	mg/kg sušiny	≤ 10		
Obsah olova Pb	mg/kg sušiny	≤ 10		
Obsah rtuti Hg	mg/kg sušiny	$\leq 0,1$		
Obsah niklu Ni	mg/kg sušiny	≤ 10		
Obsah zinku Zn	mg/kg sušiny	≤ 100		

Tab. 9 Specifikace informativních vlastností dřevních pelet pro maloodběratele, podle [ČSN EN 14961-2:2011].

Vlastnost	Jednotka	Třída vlastnosti		
		A1	A2	B
Teplota tavitelnosti popela	°C	Doporučuje se stanovit všechny charakteristické teploty za oxidačních podmínek:		

		počáteční teplota smrštění ST teplota deformace TD teplota polokulovitého tvaru HT teplota tečení FT
--	--	---

5.1 Obsah vody

Obsah vody (vlhkost) v tuhých biopalivech je klíčovou vlastností, která ovlivňuje vlastnosti přípravy biopaliv (komprimace - výroba pelet a briket, vliv vlhkosti na energii dezintegrace), skladování (vodní aktivita, výskyt plísní), mechanické vlastnosti (bobtnání a rozpadání lisovaných paliv) a energetické vlastnosti (výhřevnost, účinnost spalování a teplota spalování).

V případě vlhkosti biomasy (dřeva) je třeba důsledně rozlišovat mezi relativní a absolutní vlhkostí. Relativní vlhkost biomasy je definována jako poměr hmotnosti v biomase obsažené vody a hmotnosti vlhké biomasy (rov.1). Absolutní vlhkost je dána poměrem hmotnosti vody a hmotnosti absolutně suché biomasy (rov. 2). Fyzici a energetici používají relativní vlhkost, zatímco lesníci a dřevaři absolutní vlhkost. Vzájemný přepočtení obou veličin uvádí rovnice 3 a graf na obr. 27. Pokud budu dále v textu používat termín „vlhkost“, bude tím vždy míněna „relativní vlhkost“.

$$w_r = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_{H_2O}}{m_w} \cdot 100 \quad (1)$$

kde w_r je relativní vlhkost biomasy [%],
 m_w je hmotnost vlhké biomasy [g],
 m_0 je hmotnost absolutní sušiny [g],
 m_{H_2O} je hmotnost vodního obsahu [g].

$$w_a = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_{H_2O}}{m_0} \cdot 100 \quad (2)$$

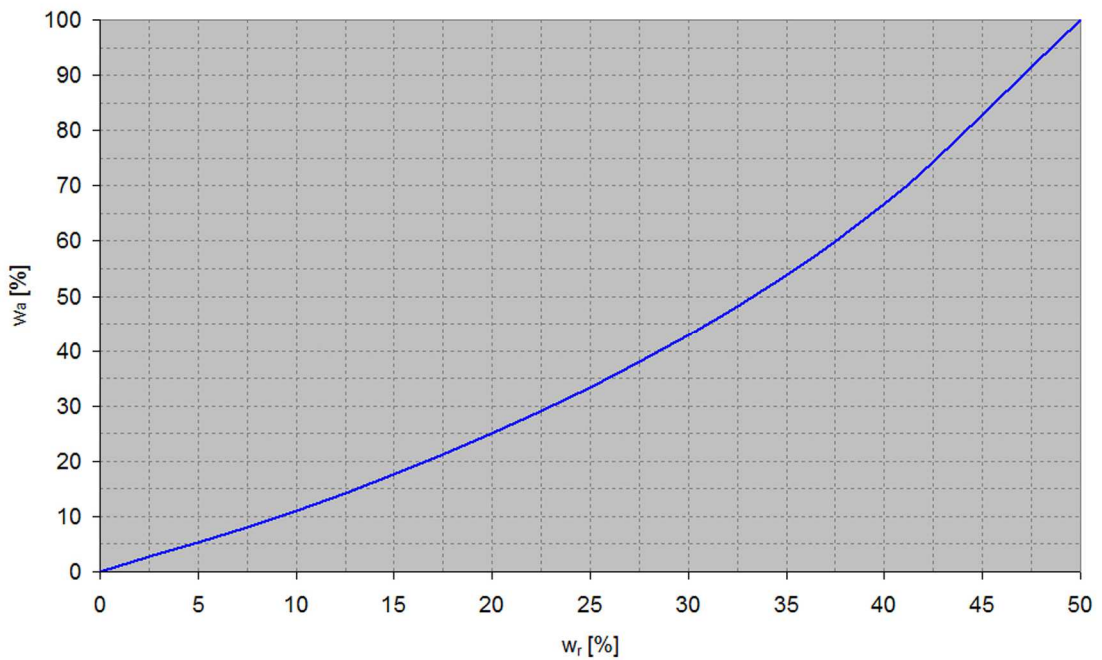
kde w_a je absolutní vlhkost biomasy [%],
ostatní veličiny viz. vzorec (1).

$$w_a = \frac{100 \cdot w_r}{100 - w_r}; \quad w_r = \frac{100 \cdot w_a}{100 + w_a} \quad (3)$$

kde w_a je absolutní vlhkost biomasy [%],
 w_r je relativní vlhkost biomasy [%].

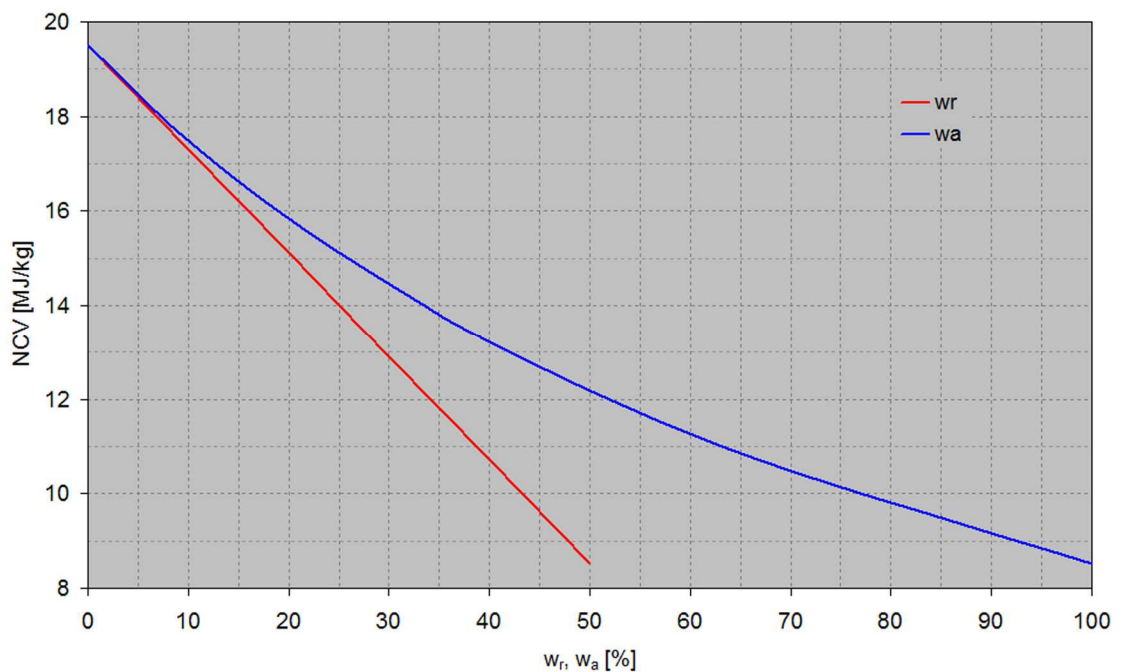
Se zvyšující se vlhkostí biomasy výrazně klesá její výhřevnost (NCV). Výhřevnost je definována v následující kapitole. Je to způsobeno tím, že část energie uvolněná z paliva se spotřebuje v podobě výparného tepla na odpaření vody. Závislost výhřevnosti na vlhkosti je znázorněna na obrázku obr 28. Obecně lze říci, že dříví do vlhkosti 30% lze spalovat v běžných kotlích. Dříví o vlhkosti v rozmezí 30 až 60 % je spalitelné pouze v kotlích speciální konstrukce a vyšších výkonů, kde je zaručeno jeho předsušení a stabilizace teploty spalování. Z energetického hlediska je nejvýhodnější spalovat absolutní sušinu, neboť ta má nejvyšší výhřevnost. V praxi lze však dosáhnout minimální vlhkosti dříví kolem 20 % v případě skladování pod přístřeškem venku (vzduchosuché dříví). Nižší obsah vlhkosti je pouze v dřevním odpadu z výroby nábytku a stavebně truhlářských výrobků, nebo v ušlechtilých tuhých biopalivech jako jsou brikety a pelety. Jediným v praxi běžným způsobem, jak zvýšit výhřevnost je snížení vlhkosti biomasy. Vzhledem k hydrokopickým vlastnostem biomasy musí být takto vysušený produkt skladován v suchých prostorech, jinak opět přijímá vzdušnou vlhkost z okolí a to až do výše rovnovážné vlhkosti biomasy.

Rovnovážná vlhkost je funkcí teploty a relativní vlhkosti vzduchu okolí a je uvedena na obr. 29.

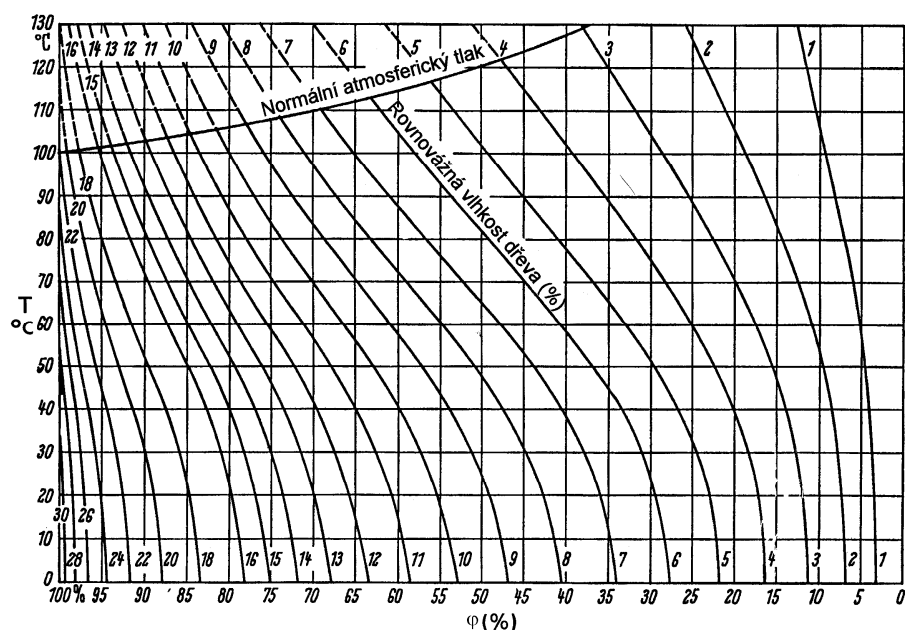


Obr. 27. Přepočet relativní a absolutní vlhkosti biomasy

Možností zlepšení energetické bilance biomasy bez sušení je využití kondenzačních kotlů. Tato technologie je však novinkou zatím bez většího rozšíření do praxe. Navíc předpokládá využití nízkopotenciálního tepla.



Obr. 28. Závislost výhřevnosti na relativní a absolutní vlhkosti dřeva



Obr. 29 Nomogram pro stanovení rovnovážné vlhkosti dřeva v závislosti na relativní vzdušné vlhkosti φ a teplotě prostředí T [Kollmann & Coté, 1968].

Vlhkost biomasy je dána součtem volné a vázané vody. Se zvýšeným obsahem volné vody souvisí i problematika zdravotního rizika pro osoby manipulující s uskladněnou biomasou z důvodu možného výskytu plísní. Pro tyto účely je vhodné definovat vodní aktivitu. Vodní aktivita je z technologického hlediska definována jako poměr parciálního tlaku vodních par skladované biomasy k parciálnímu tlaku nasycených par destilované vody při určité teplotě.

Růst mikroorganismů na biologických materiálech, zvláště plísní, se nevyskytuje při vodní aktivitě menší než 0,6 [BEUCHAT, 1981]. Uvedené skutečnosti je velmi často využíváno při doporučení bezpečného skladování potravin. Je obecně známo, že potraviny neplesniví jestliže je před skladováním vysušíme, nebo je skladujeme za snížené teploty v chladničce. Totéž platí pro energeticky využitelnou biomasu, vodní aktivita se sníží jestliže snížíme vlhkost (obsah volné vody) nebo teplotu. Dřevní biomasa vysušená na vlhkost pod 30 % již není biologicky aktivní, protože neobsahuje volnou vodu. Při vyšších vlhkostech je vhodné znát bezpečnou teplotu skladování. Například Štencl stanovil vliv teploty na vodní aktivitu biomasy amarantu v rozsahu teplot 10 až 30 °C na základě Clausius – Clapeyronovy rovnice a stanoveného sorpčního tepla [ŠTENCL et al, 2010].

5.1.1 Stanovení obsahu vody

Pro stanovení vlhkosti lze použít přímých i nepřímých metod. Běžnou přímou metodou v různých modifikacích je metoda stanovení vlhkosti sušením (gravimetrická metoda). Gravimetrická metoda je pro svoji vysokou přesnost, danou nízkým vlivem rušivých faktorů, používána rovněž jako metoda referenční. Použití nepřímých metod znamená skutečné měření zástupné fyzikální veličiny, jejíž závislost na vlhkosti měřeného materiálu je předem známa. Nepřímé metody měření dosahují nižší přesnosti, která je navíc často mění v celém rozsahu možných vlhkostí energeticky využitelné biomasy. Velkou výhodou nepřímých metod měření je jejich rychlost stanovení, proto jsou často používány v provozní praxi či automatizovaných linkách jako součásti dopravníkových cest. Mezi běžně používané nepřímé metody patří metody vodivosti, metody dielektrické (kapacitní a mikrovlnná), metody radiometrické (absorpce gama záření), metoda nukleární magnetické rezonance a metoda infračervené

spektroskopie. Princip jednotlivých metod, včetně určení vhodnosti použití uvádí Fexa a Široký [FEXA & ŠIROKÝ, 1983, s. 103 až 172], jako nepřímé metody měření však označuje takové metody, kdy na vlhkost materiálu usuzujeme z výsledků měření v jiné fázi, obvykle plynné, přímo obklopující měřený materiál [FEXA & ŠIROKÝ, 1983, s. 181].

Přestože fyzikální principy nepřímých metod měření vlhkosti jsou již dlouhou dobu známy, je v současné době neustále zkoumáno a zdokonalováno jejich praktické použití zejména v systémech měření a regulace technologických celků, kde je využíváno nových materiálů a technologií používaných v oblasti konstrukce čidel.

Jensen sledoval přesnost měření vlhkosti šesti vlhkoměry na devadesáti osmi vzorcích různé energeticky využitelné biomasy, od dřevní štěpky jehličnatých a listnatých stromů, přes rychle rostoucí dřeviny až po semena slunečnice a olivové pecky [JENSEN et al., 2006]. Mezi sledovanými vlhkoměry bylo pět vlhkoměrů měřících na principu dielektrické metody, z toho dva se zásobníkem pro měřený vzorek a tři příložné. Posledním vlhkoměrem byl vlhkoměr využívající detekci od materiálu odraženého blízkého spektra infračerveného záření (NIR). NIR metoda je jediná z testovaných, která umožňuje bezdotykové měření vlhkosti biomasy a tedy nasazení pro automatizované kontinuální měření. Data byla měřena v jedenácti laboratořích, byly sledovány systematické chyby měřících metod (přesnost měřidla a vliv sypné hmotnosti na přesnost) a nahodilé chyby vlivem paliva (druh paliva, směsi) a laboratoří (odlišná praxe). Systematická chyba vlivem rozdílné sypné hmotnosti paliva se z principu neprojevuje u metod infračervené spektroskopie, u dielektrických metod je závislá na použité frekvenci a na velikosti částic vzorku. Základní specifikaci jednotlivých vlhkoměrů uvádí tabulka 10.

Tab. 10 Porovnávané vlhkoměry podle [JENSEN et al., 2006]

Metoda měření	Princip měření	Výrobce: typ	č.	Rozsah vln	Rozsah w [%]
dielektrická	kapacitní	Pandis: FMG 3000	1	< 0,3 GHz	0 - 55
		ACO: MMS-0-1-2-0	2		0 - 80
		Farmcomp: Wile 25	3		13 - 85
		Schaller: FS 2002-H	4		0 - 40
	mikrovlnný	HF sensor: Moist 100	5	0,3 - 20 GHz	0 - 80
optická	NIR reflexe	Mesa: MM710	6	800 - 2500 nm	10 - 40

NIR reflexní metoda (Mesa: MM710) a dielektrické přístroje se zásobníkem vzorku (Pandis: FMG 3000 a Schaller: FS 2002-H) mají výrazně vyšší výhody ve srovnání s ostatními systémy. Pracují s vyšší přesností a s nižší citlivostí k variabilitě typu paliva a kalibračním procedurám. Největší přesnosti dosáhl přístroj Mesa, na dalším místě pak Schaller a Pandis. Testy probíhaly v rozsahu vlhkosti materiálu deklarovaném výrobcem (tab. 10). Schaller má však menší deklarovaný rozsah než Pandis. V případě využití obou přístrojů v rozsahu 0 až 55 % vlhkosti je výhodnější použití vlhkoměru Pandis.

Nasazení dielektrických metod je třeba dobře zvážit z důvodu citlivosti k sypné hmotnosti. Vzhledem k vyšší přesnosti je vhodné provádět individuální kalibraci pro převažující typ biomasy ve vzorku než univerzální kalibraci (jedna kalibrační křivka) pro všechny typy dřevních paliv různých vlastností a původu. Použití kalibrace z jiné laboratoře může být riskantní vzhledem k odlišnostem.



Obr. 30. Vlhkoměry Pandis: FMG 3000, Farmcomp: Wile 25, Mesa: MM710

Gravimetrická metoda vychází z principu prvního zvažení vlhkého vzorku, následného sušení až do neměnné vlhkosti (kontroluje se vážením) a posledního vážení. Vlhkost je pak dána poměrem hmotnosti vody a prvního vážení (hmotnosti vlhkého vzorku). Vzhledem k tomu, že se gravimetrická metoda často používá jako referenční, je nutné si uvědomit že vzorek v sušárně nikdy nevysušíme na absolutně nulovou vlhkost, protože tlak vodní páry v sušárně není nulový. Nejdokonalějšího vysušení dosáhneme při vysoké teplotě a za současné aplikace desikativa (silikagel, BaO), které sníží tlak vodní páry. Tuhá biopaliva však nedovolují použít vyšší teploty než asi 110 °C z důvodu uvolňování těkavých látek za vyšších teplot. To prakticky vylučuje použití mikrovlnného sušení z důvodu nerovnoměrného ohřevu biomasy [NASSWETROVÁ et al., 2013].



Obr. 31 Gravimetrické analyzátory vlhkosti vlevo Kern MLB-50-3N, vpravo Mettler Toledo HR83

Přesnost stanovení vlhkosti značně zvyšují automatické analyzátory vlhkosti pracující na principu kontinuálního vážení vzorku při sušení, nejčastěji infralampou. S tímto typem analyzátoru disponuje i naše pracoviště (analyzátor vlhkosti Kern MLB – 50 – 3N, obr. 31). Přístroje s vyšší citlivostí vah umožňují použití menší navážky, přesnost stanovení vlhkosti je stejná nebo vyšší, ale doba sušení se výrazně zkracuje. Tyto přístroje jsou však dražší a citlivější na prostředí laboratoře.

Pokud se vzorek materiálu váží mimo sušárnu, může dojít k chybě měření vlivem sorpce vzdušné vlhkosti a vlivem působení vztakových sil na zahřátou misku se vzorkem. Dalším zdrojem nahodilých chyb je možnost ztráty jemných frakcí vzorku při transportu mezi sušárnou a vahou. Část vlhkosti obsažená ve vzorku může zkondenzovat na povrchu obalu při skladování před vlastní analýzou.

5.1.1.1 Referenční gravimetrická metoda

Referenční gravimetrická metoda je definována v [ČSN EN 14774-1:2010]. Vzorek biopaliva se suší v sušárně při teplotě 105 ± 2 °C tak dlouho, dokud nedosáhne konstantní hmotnosti. Z úbytků hmotnosti vzorku se vypočítá obsah vody v procentech a zahrne se postup pro korekci vlivů vztaku.

Sušárna: Sušení ohřátým vzduchem, teplota 105 ± 2 °C, počet výměn vzduchu 3 až 5 za hodinu. Při proudění vzduchu v sušárně nesmí docházet k unášení částic vzorku.

Misky: Misky z inertního, korozivzdorného materiálu o takové ploše, aby se na ně vešel zkušební vzorek o zaplnění asi 1 gram vzorku na cm^2 .

Zkušební vzorek: Zkušební vzorek musí mít horní nominální rozměr maximálně 30 mm a hmotnost minimálně 300 g. Pro biopaliva s jemnými částicemi (piliny, hobliny, prášek) se připouští hmotnost vzorku 200 g, pokud se použijí váhy s přesností na 0,01 g, připouští se hmotnost vzorku 100 g.

Pro zjištění zkondenzované vody v misce se prázdná miska váží. V případě, že voda ulpí na obalu vzorku, musí být tato voda zahrnuta do výpočtu obsahu vody. Tuhá biopaliva jsou hygroskopická, proto se musí naplněná miska znovu zvážit do 10 až 15 s, dokud je miska ještě horká. Vztakové síly působící na horkou misku eliminujeme vážením stejné prázdné (referenční) misky, která je rovněž umístěna do sušárny. Konstantní hmotnost je definovaná jako změna nepřevyšující 0,2 % celkového úbytku hmotnosti během další doby sušení po dobu 60 minut.

$$w_r = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5) + m_6}{(m_2 - m_1) + m_6} \cdot 100 \quad (4)$$

kde	w_r	je relativní vlhkost biomasy [%],
	m_1	je hmotnost prázdné misky [g],
	m_2	je hmotnost misky se vzorkem před sušením [g],
	m_3	je hmotnost misky se vzorkem po sušení [g],
	m_4	je hmotnost referenční misky před sušením (váženo při laboratorní t.) [g],
	m_5	je hmotnost referenční misky po sušení (váženo pokud je ještě teplá) [g],
	m_6	je hmotnost vody v transportním obalu vzorku [g].

Výsledná hodnota se počítá s přesností na dvě desetinná místa, po výpočtu se výsledek zaokrouhlí na první desetinné místo.

5.1.1.2 Zjednodušená gravimetrická metoda

Zjednodušená gravimetrická metoda je definována v [ČSN EN 14774-2:2010]. Vliv vztlaku ve zjednodušené metodě se zanedbává. To je jediný rozdíl mezi oběma metodami. Obsah celkové vody se tedy vypočítá podle zjednodušené rovnice 5.

$$w_r = \frac{(m_2 - m_3) + m_6}{(m_2 - m_1) + m_6} \cdot 100 \quad (5)$$

kde	w_r	je relativní vlhkost biomasy [%],
	m_1	je hmotnost prázdné misky [g],
	m_2	je hmotnost misky se vzorkem před sušením [g],
	m_3	je hmotnost misky se vzorkem po sušení [g],
	m_6	je hmotnost vody v transportním obalu vzorku [g].

5.1.1.3 Stanovení obsahu vody v analytickém vzorku

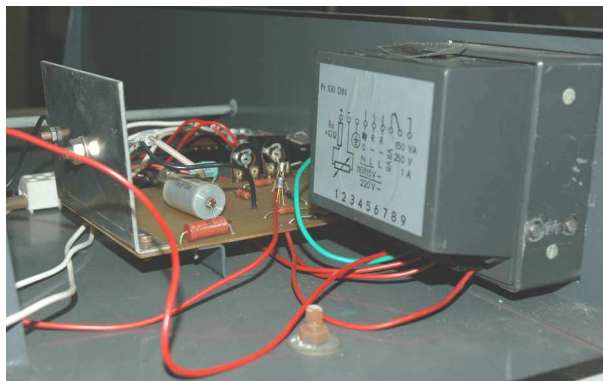
Stanovení obsahu vody v analytickém vzorku je definováno v [ČSN EN 14774-3:2010]. Vzorek použitý pro stanovení je analytický vzorek pro všeobecný rozbor o rozměru částic 1 mm nebo menším, připravený podle normy: „Tuhá biopaliva - Příprava vzorku“ [ČSN EN 14780:2011]. Používají se váhy s přesností 0,1 mg. Místo otevřených misek se používá váženka s víčkem ze skla nebo korozivzdorného a teplu odolného materiálu. Velikost váženky musí být taková, aby vrstva vzorku nepřevyšovala 0,2 g/cm². Dále je třeba exsíkátor s vysoušedlem pro zabránění absorpce vlhkosti z atmosféry vzorkem. Specifikace sušárny stejná jako v předešlých metodách, jen je možno alternativně použít sušení v dusíkové atmosféře. Pro stanovení vlhkosti se použije rovnice 6.

$$w_r = \frac{(m_2 - m_3)}{(m_2 - m_1)} \cdot 100 \quad (6)$$

kde	w_r	je relativní vlhkost biomasy [%],
	m_1	je hmotnost prázdné váženky [g],
	m_2	je hmotnost váženky se vzorkem před sušením [g],
	m_3	je hmotnost váženky se vzorkem po sušení [g].

5.1.2 Vlastní vývoj laboratorního přístroje

Z důvodu možnosti zjištění vlhkosti biomasy byla na našem pracovišti renovována elektronika sušárny KBC G-100/250. Nová elektronika umožňuje přesnější regulaci požadované teploty ($\pm 0,1$ °C) a naprogramování sušících řádů, včetně rampování [KLEPÁRNÍK & KADLEC, 2010]. V současné době je pro stanovení obsahu vody používán univerzální přístroj TGTest rovněž vlastního vývoje.



Obr. 32 Detail upravované elektroniky sušárny. [KLEPÁRNÍK & KADLEC, 2010]

5.2 Spalné teplo a výhřevnost

Spalné teplo (GCV) je definováno jako množství energie, která se uvolní při dokonalém spálení jednotkového množství paliva za předpokladu, že všechna vodní pára obsažená ve spalinách zkondenzuje.

Výhřevnost (NCV) je množství energie získané dokonalým spálením jednotkového množství paliva za předpokladu, že všechna vodní pára obsažená ve spalinách odejde v plynném stavu.

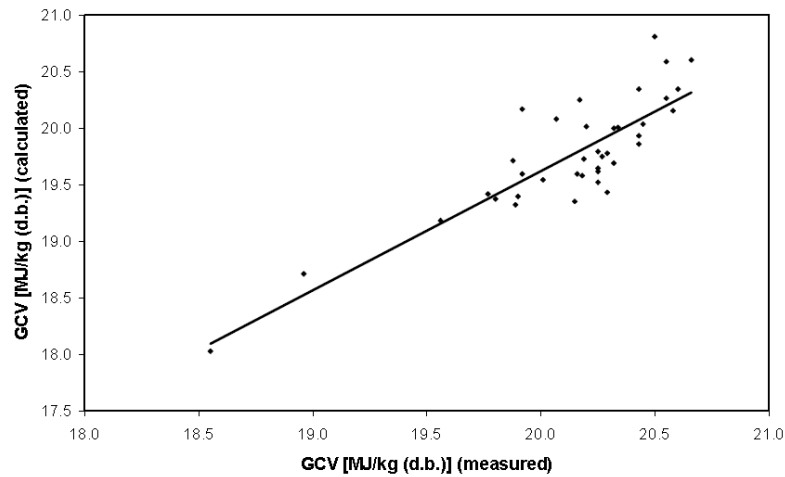
Spalné teplo lze zjistit měřením v kalorimetru s tlakovou nádobou, nebo spočítat pomocí empiricky odvozené rovnice na základě dat zjištěných chemickým rozbořením paliva. Vhodnou rovnici odvodili Gaur a Reed na základě souboru 100 vzorků spalitelné biomasy, u nichž byla známa primární analýza (obsah vody, popela, prchavé hořlaviny a pevného uhlíku), elementární analýza (obsah C, H, S, N, O), a spalné teplo stanovené kalorimetricky. Průměrná chyba výpočtu dle rovnice 7 je 1,45 % [GAUR & REED, 1995]. Tuto rovnici doporučuje IEA, kde bylo zjištěno že vypočtená hodnota GCV je průměrně o 1,8 % nižší než hodnota stanovená kalorimetrickým měřením [OBERNBERGER & THEK, 2004]. Uvedená hodnota se týká pelet a briket. Průměrná chyba byla zjištěna podle rovnice 8.

$$GCV = 0.3491 \cdot X_C + 1.1783 \cdot X_H + 0.1005 \cdot X_S - 0.0151 \cdot X_N - 0.1034 \cdot X_O - 0.0211 \cdot X_{ash} \quad (7)$$

kde	GCV	je spalné teplo [MJ/kg],
	X_C	je obsah uhlíku v sušině [wt%, db],
	X_H	je obsah vodíku v sušině [wt%, db],
	X_S	je obsah síry v sušině [wt%, db],
	X_N	je obsah dusíku v sušině [wt%, db],
	X_O	je obsah kyslíku v sušině [wt%, db],
	X_{ash}	je obsah popela v sušině [wt%, db].

$$\Delta GCV = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{GCV_{meas,i} - GCV_{calc,i}}{GCV_{meas,i}} \right) \cdot 100}{n} \quad (8)$$

kde je	ΔGCV	je průměrná chyba výpočtu spalného tepla [%],
	$GCV_{meas,i}$	je spalné teplo stanovené měřením [MJ/kg],
	$GCV_{calc,i}$	je spalné teplo stanovené výpočtem [MJ/kg],
	n	je počet vzorků [ks].



Obr. 33 Závislost mezi vypočítaným a naměřeným spalným teplem.
[OBERNBERGER & THEK, 2004]

Výhřevnost je pak nižší o energii spotřebovanou na odpaření vody vzniklé spalováním vodíku obsaženého v palivu a vody přítomné v palivu jako voda volná a vázaná (vlhkost paliva). Výhřevnost paliva o dané vlhkosti a obsahu vodíku lze stanovit podle rovnice 9, jejíž použití doporučuje IEA.

$$NCV = GCV \left(1 - \frac{w}{100} \right) - 2.444 \cdot \frac{w}{100} - 2.444 \cdot \frac{h}{100} \cdot 8.936 \left(1 - \frac{w}{100} \right) \quad (9)$$

kde	NCV	je výhřevnost [MJ/kg],
	GCV	je spalné teplo [MJ/kg],
	w	je vlhkost paliva [wt%],
	h	je obsah vodíku v sušině [wt%, db],
	2,444	je entalpický rozdíl mezi plynnou a kapalnou vodou při 25°C,
	8,936	je poměr molárních hmotností M_{H_2O} / M_{H_2} .

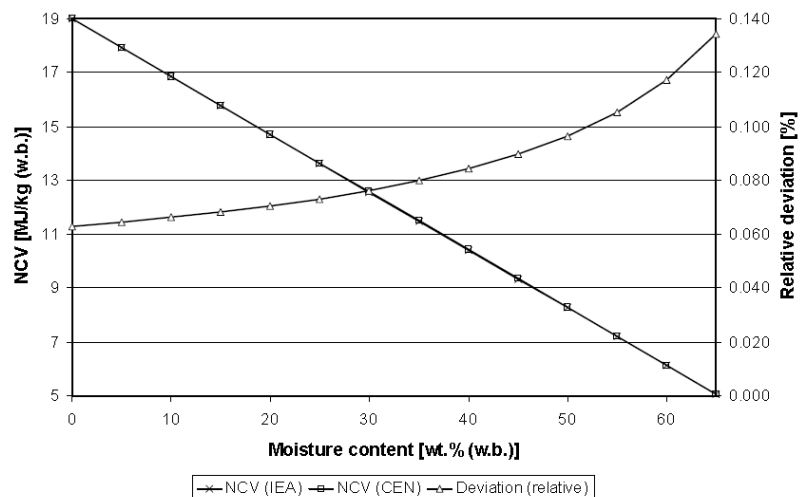
Ve skutečnosti je výhřevnost ovlivněna navíc přítomností kyslíku a dusíku v biomase. Uvedenou skutečnost zohledňuje rovnice 10, jež je doporučená normou „Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv – Obecné požadavky“ [ČSN EN 14961-1:2010].

$$NCV = \left[GCV - 0.2122 \cdot X_H - 0.0008 \cdot (X_O + X_N) \right] \cdot \left(1 - \frac{M}{100} \right) - 2.443 \cdot \frac{M}{100} \quad (10)$$

kde	NCV	je výhřevnost [MJ/kg],
	GCV	je spalné teplo [MJ/kg],
	M	je vlhkost paliva [wt%],
	X_H	je obsah vodíku v sušině [wt%, db],
	X_O	je obsah kyslíku v sušině [wt%, db],
	X_N	je obsah dusíku v sušině [wt%, db].

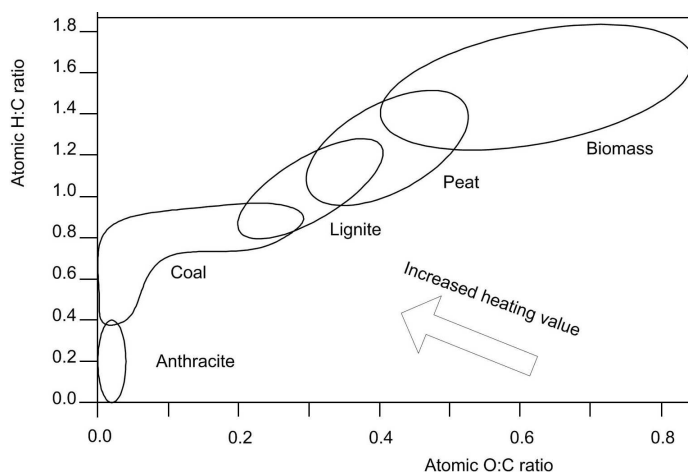
Na obrázku 34 je porovnání obou výpočetních metod stanovení výhřevnosti. Z grafu vyplývá, že obě metody vykazují téměř identické výsledky. Při vlhkosti vzorku do 50 % je relativní

odchylka do 0,1 %. V případě stanovení výhřevnosti jednodušší rovnicí v intervalu vlhkosti vzorku od 50 do 65 % nepřesáhne relativní odchylka 0,14 %, což je zanedbatelné. Z uvedeného důvodu je výhodnější použít rovnici doporučenou IEA, protože hodnoty obsahu kyslíku a dusíku nebývají známy, navíc stanovení obsahu kyslíku je náročné.



Obr. 34 Porovnání rozdílných metod výpočtu výhřevnosti. [OBERNBERGER & THEK, 2010]

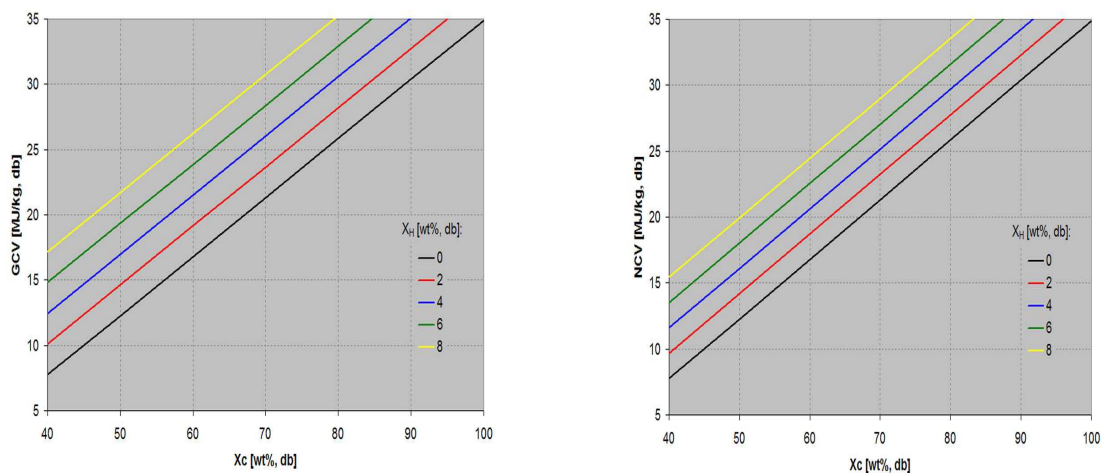
Zvyšující se podíl uhlíku, vodíku a síry má tedy vliv na zvýšení spalného tepla, naproti tomu zvyšující se podíl kyslíku, dusíku a popelovin spalné teplo snižuje. V případě biopaliv je vliv obsahu síry na výhřevnost velmi malý, což je dáno malým obsahem síry v biopalivech. Vliv obsahu dusíku a popela je ve srovnání s obsahem kyslíku také méně významný, zvláště u dřeva. Nejvýznamnější parametry, které mají vliv na spalné teplo jsou tedy obsah uhlíku, vodíku a kyslíku. Jejich poměr v tuhých biopalivech je znázorněn na obrázku 35. Nejvyšší výhřevnosti dosahují antracit a černá uhlí. Hnědá uhlí, biomasa, lignit a rašelina mají podobné hodnoty výhřevnosti, avšak téměř poloviční než antracit a černá uhlí.



Obr. 35 Chemické složení různých druhů tuhých paliv podle [JENKINS et al., 1998].

U absolutně suchého vzorku biomasy má výhřevnost tím nižší hodnotu (oproti spalnému teplu stejného vzorku), čím je vyšší obsah vodíku v biomase. Pro běžně dostupnou biomasu (ve

vlhkém stavu) se rozdíl mezi spalným teplem a výhřevností dále výrazně zvyšuje s narůstající vlhkostí paliva. Uvedené závislosti jsou vyjádřeny v grafech na obrázku 36. Nejvyššího spalného tepla dosahuje palivo se 100% obsahem uhlíku, $GCV = 35 \text{ MJ/kg, db}$. Díky nulovému obsahu vodíku je v tomto případě spalné teplo rovno výhřevnosti v bezvodém stavu ($GCV = NCV$). U biomasy, kde je běžný obsah uhlíku 45 až 55 wt% a obsah vodíku 5 až 7 wt%, dosahuje hodnota GCV v průměru 20,2 MJ/kg a hodnota NCV 18,9 MJ/kg.



Obr. 36 Graf závislosti obsahu uhlíku v palivu na výhřevnosti a spalném teple při nulové vlhkosti a různém podílu vodíku.

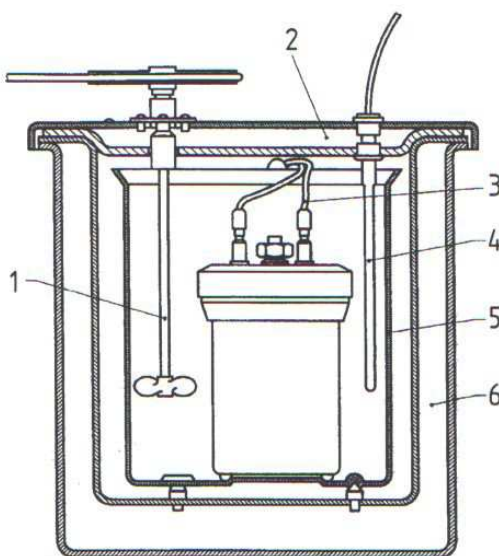
5.2.1 Stanovení spalného tepla a výhřevnosti

Pro stanovení spalného tepla se používají kalorimetry s tlakovou nádobou určenou ke spálení vzorku materiálu v kyslíkové atmosféře za vysokého tlaku. Spálením uvolněné teplo se bude sdílet s okolním prostředím tlakové nádoby, zde umístěný materiál bude zvyšovat svoji teplotu. Na základě nárůstu teploty a efektivní tepelné kapacity kalorimetru se stanoví spalné teplo. Doba a četnost měření teploty záleží na použitém typu kalorimetru.

Kalorimetr se skládá z tlakové nádoby pro spalování, kalorimetrické nádoby, míchadla kalorimetru, vody, teplotního čidla a přívodů se svorkami uvnitř kalorimetrické nádoby, potřebných pro zapálení vzorku, nebo jako součást sestavy pro měření teploty nebo regulačních obvodů. Během měření je kalorimetr uložen v termostatu. Způsob, jakým se teplota reguluje, definuje pracovní režim zařízení. V aneroidních systémech jsou kalorimetrická nádoba, míchadlo i voda nahrazeny kovovým blokem.

Tlaková nádoba pro spalování musí být schopná vydržet tlaky vzniklé během spalování. Materiál pro konstrukci musí být odolný vůči kyselinám, vzniklých při spalování biopaliv. Vhodný objem tlakové nádoby je od 250 ml do 350 ml. Kalorimetrická nádoba je vyrobena kovu s vysoce leštěným vnějším povrchem (eliminace sdílení tepla sáláním), s dostatečným množstvím vody pro úplné ponoření horního povrchu tlakové nádoby při míchání vody. Víko obecně pomáhá ke snížení odparu vody v kalorimetru, ale pokud není během spalování v dobrém kontaktu s kalorimetrickou nádobou, tepelně se opožďuje během spalování, takže vzniká neurčitá výměna tepla s termostatem s prodloužením hlavního úseku.

Míchadlo s konstantní rychlostí. Hřídel míchadla má být tepelně málo vodivá a nebo z částí malé hmotnosti pod víkem vodního pláště, k minimalizaci přenosu tepla do nebo ze systému. To je zvláště důležité, je-li hřídel míchadla v tepelném kontaktu s motorem. Pokud se používá kalorimetrická nádoba s víkem, tato část hřídele by měla být nad víkem. Termostat (vodní plášť), zcela obklopující kalorimetr se vzdušnou mezerou oddělující kalorimetr a termostat, přibližně 10 mm. Hmotnost vody v termostatu musí být dostatečná k vyrovnání vnějších teplotních rázů. Teplota má být během zkoušky regulována na $\pm 0,1$ K nebo přesněji.



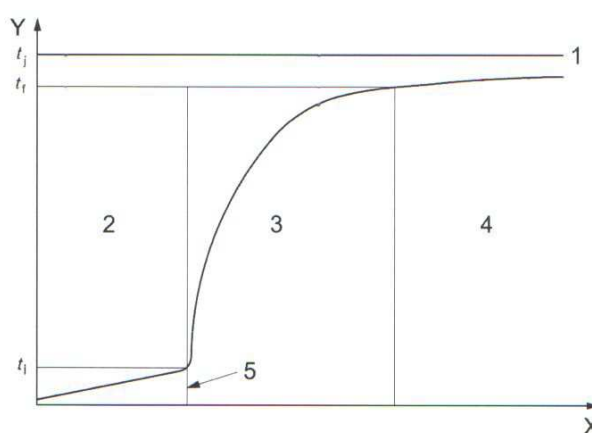
Obr. 37 Kalorimetr s tlakovou nádobou pro spalování (klasické uspořádání).

1 – míchadlo, 2 – víko termostatu, 3 – zapalovací přívody, 4 – teploměr,
5 – kalorimetrická nádoba, 6 – nádoba termostatu, podle [ČSN EN 14918:2010]

Termostat s pasivní konstantní teplotou (statický) musí mít dostatečnou tepelnou kapacitu, aby se omezila změna teploty v něm obsažené vody. Pokud se požaduje, aby termostat (vodní plášť) těsně sledoval teplotu kalorimetru, má mít nízkou hmotnost a má být přednostně vybaven vnořenými topnými tělísky. Příkon energie musí být dostatečný k udržování teploty vody v termostatu v rozmezí 0,1 K od teploty vody v kalorimetru po zapálení zkušebního podílu. Při rovnovážném stavu při 25 °C nesmí vypočtená střední časová změna teploty v kalorimetru převyšovat 0,0005 K/min. Zařízení pro měření teploty musí měřit teplotu s přesností nejméně 0,001 K, takže teplotní interval od 2 K do 3 K lze stanovit s rozlišením 0,002 K nebo lepším. V oblasti referenční teploty kalorimetrických stanovení musí být absolutní teplota známa na nejbližší 0,1 K. Zařízení pro měření teploty má mít v používaném intervalu lineární nebo linearizovanou odezvu na změny teploty. Vedle tradičních skleněných rtuťových teploměrů jsou jako alternativní teplotní čidlo vhodné platinové odporové teploměry, termistory, rezonanční křemenné krystaly a jiné, které s vhodným odporovým můstkem, nulovým detektorem, čítačem kmitočtů nebo jiným elektronickým vybavením dosahují požadovanou rozlišovací schopnost. Krátkodobá opakovatelnost zařízení tohoto typu musí být 0,001 K nebo lepší. Dlouhodobá časová změna teploty nesmí převýšit ekvivalent 0,05 K po dobu šesti měsíců. U čidel s lineární odezvou je časová změna teploty méně náchylná k zavedení systematické chyby v kalorimetrických měřeních než u nelineárních čidel. Zdroj proudu pro zapalovací obvod by měl mít bezpečné napětí. Pokud se zapaluje ručně, spínač pro zapálení musí být umístěn tak, aby nedošlo k náhodnému sepnutí. Okruh zapalování je vhodné doplnit sériově zapojenou indikační žárovkou. Použitý kelímeček musí být

vyroben z nereaktivního materiálu o nízké tepelné kapacitě. Vhodným materiálem je kelímek křemenný, nikl-chromový, platinový. Kelímek má mít průměr 15 mm až 25 mm s plochým dnem a s hloubkou větší než 20 mm. Křemenné kelímky mají mít tloušťku stěny asi 1,5 mm a kovové kelímky asi 0,5 mm. Pokud se objeví částice nespáleného uhlíku, lze použít malý platinový kelímek malé hmotnosti nebo nikl-chromový kelímek, tloušťky 0,25 mm, průměru 15 mm a hloubky 7 mm.

Měření teploty, potřebné k vyhodnocení opraveného teplotního vzestupu se provádí během počátečního, hlavního (reakčního) i konečného úseku (podle obr. 38). Pro kalorimetr v adiabatickém režimu musí být počáteční a konečný úsek pouze tak dlouhý, jak je nutné pro ustavení výchozí (zapalovací) a konečné teploty. Pro isoperibolický (isotermální plášť) režim kalorimetru slouží počáteční a konečný úsek ke zjištění vlastností výměny tepla kalorimetru, potřebný k umožnění příslušné opravy na výměnu tepla mezi kalorimetrem a termostatem během hlavního úseku, kdy proběhlo spalování. Počáteční a konečný úsek musí být delší.



Obr. 38 Časově – teplotní křivka kalorimetru. X – čas, Y – teplota, 1 – teplota pláště, 2 – počáteční úsek, 3 – hlavní úsek, 4 – konečný úsek, 5 – zapálení, podle [ČSN EN 14918:2010]

Výkon míchání se udržuje konstantní během celé doby zkoušky z důvodu zachování konstantního koeficientu přestupu tepla. V průběhu hlavního úseku bude hlava tlakové nádoby znatelně teplejší než ostatní části tlakové nádoby, proto je nutné, aby byl nad ní dostatek dobře promíchané vody k udržení dostatečně malých teplotních gradientů ve vodě kalorimetru během rychlého úseku vzestupu teploty.

Některé druhy tuhých biopaliv nemusí zcela shořet, jde o explodující biopaliva a nebo biopaliva zanechávající zbytky obsahující významná množství nespáleného vzorku nebo sazí. Přidáním známého množství pomocných látek (kyselina benzoová, parafinický olej), použitím sáčků nebo kapslí se může dosáhnout úplného spálení vzorku.

Z důvodu nízké hustoty se tuhá biopaliva zkoušejí ve formě pelet o hmotnosti $1 \pm 0,1$ g. Pelety se připravují lisováním z analytického vzorku. Je třeba stanovit i vlhkost vzorku.

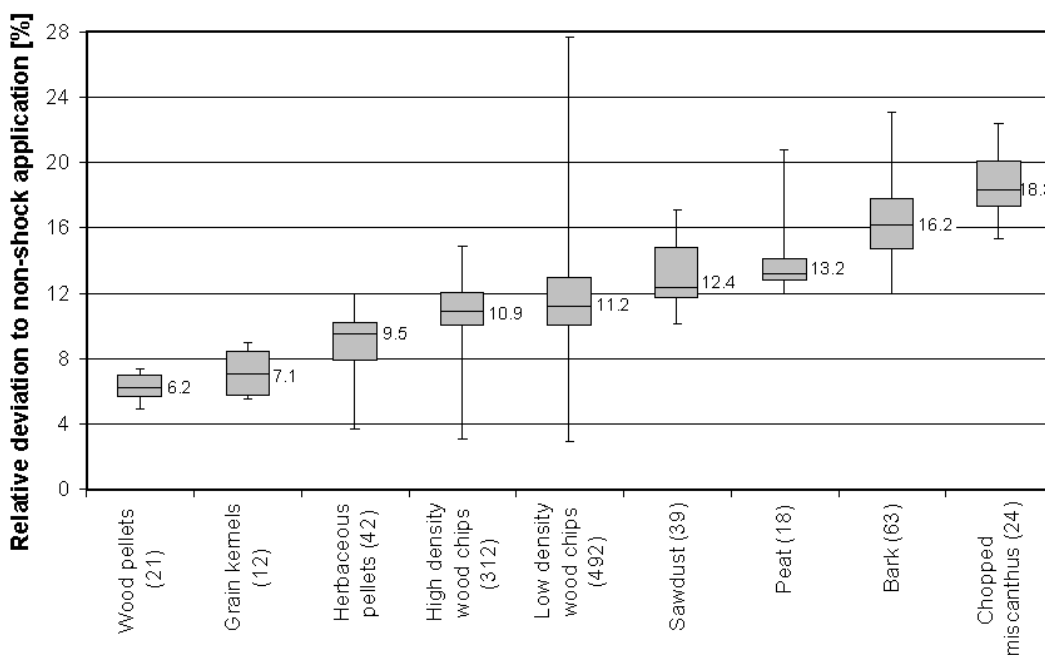
Uvedené požadavky na kalorimetr odpovídají normě „Tuhá biopaliva – Stanovení spalného tepla a výhřevnosti“ [ČSN EN 14918:2010].

5.3 Sypná hmotnost

Sypná hmotnost je důležitým parametrem při dodávkách paliva v objemových jednotkách, umožňuje optimalizaci přepravních nákladů a dimenzování skladovacích prostor. Spolu s výhřevností umožňuje stanovit energetický obsah v palivu – hustotu energie.

Metoda měření sypné hmotnosti zahrnuje definici řízeného nárazu sypkého materiálu. Tento náraz vede ke zvýšení sypné hmotnosti, tedy ke zmenšení objemu nasypaného materiálu. Nahrazuje se takto vliv zhutnění objevující se v průběhu výrobního řetězce. Palivo je obvykle skladováno v zásobnících mnohem většího objemu než jsou zkušební nádoby a tak na ně působí tlak sloupce paliva. Během transportu rovněž dochází k hutnění paliva z důvodu působení vibrací. Při transportu vnitropodnikovou dopravou v podobě dopravníků a pneumatických potrubí, nebo při nakládce a vykládce obecně dochází k ukládání do zásobníků z velké výšky, kdy volně padající palivo působí na již uskladněné kinetickou energií a dochází tak opět k zhutnění. Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že metoda stanovení sypné hmotnosti s řízeným nárazem lépe odpovídá skutečnosti než v případě, když by náraz nebyl použit [HARTMANN et al, 2004].

Pro základní odhad náchylnosti různých druhů biopaliv k hutnění nárazem lze použít výsledky, které uvádí Hartmann [HARTMANN et al, 2004]. Tyto údaje ukazují, že vliv zhutnění obecně pro paliva z biomasy je mezi 6 a 18 %, pro dřevní pelety mezi 5 a 7 % (obr. 39).



Obr. 39 Relativní odchylky ve stanovení sypné hmotnosti bez aplikace řízeného nárazu. Podle [HARTMANN et al, 2004].

5.3.1 Stanovení sypné hmotnosti

Pro stanovení sypné hmotnosti tuhých biopaliv s horním nominálním rozměrem maximálně 100 mm (100 mm je velikost oka síta, kterým projde nejméně 95 % hmotnostních materiálů) je zavedena norma „Tuhá biopaliva – Stanovení sypné hmotnosti“ [ČSN EN 15103:2010].

Princip měření spočívá ve zvážení známého objemu nasypaného paliva, umístěného do vhodné nádoby. Na palivo v nádobě působíme řízeným nárazem, při kterém se nasypané palivo zhutní. Zhutněné palivo dosypeme a okraj nádoby zarovnáme pomocí dřevěného hranolu. Poté proběhne vážení.

Nádoba musí být válcového tvaru s hladkým povrchem, vyrobená z materiálu, jenž je odolný nárazu. Poměr výšky a průměru nádoby musí být v rozmezí od 1,25 do 1,5. Velká plnicí nádoba má objem 50 litrů $\pm 2\%$ a je použitelná pro všechna tuhá biopaliva specifikovaná v předmětu normy. Malá odměrná nádoba má plnicí objem 5 litrů $\pm 2\%$. Malá nádoba je použitelná pro paliva s horním nominálním rozměrem do 12 mm a pro pelety s průměrem do 12 mm včetně. Objem nádoby se pravidelně kontroluje vážením prázdné nádoby a nádoby naplněné vodou.

Váhy pro velkou nádobu musí vážit s přesností 10 g, váhy pro malou nádobu musí vážit s přesností na 1 g. Váží se prázdná nádoba a plná po dosypání zhutněného paliva řízeným nárazem, dosypání a zarovnání.

Řízený náraz se aplikuje třikrát po naplnění paliva do nádoby, a to tak, že se nádoba pustí volným pádem z výšky 150 mm svisle na podložku z OSB desky o tloušťce minimálně 15 mm (nebo podobnou).

Výpočet sypné hmotnosti paliva v původním stavu se vypočte podle rovnice 11, přepočten na sypnou hmotnost v bezvodém stavu se přepočítá podle rovnice 12 [ČSN EN 15103:2010]. Není zde však uvažováno s bobtnáním a sesýcháním paliva, proto je uvedený přepočten vhodný pouze pro orientační stanovení.

$$BD_{ar} = \frac{m_2 - m_1}{V}, \quad (11)$$

kde	BD_{ar}	je sypná hmotnost v původním stavu [kg/m^3],
	m_1	je hmotnost prázdné nádoby [kg],
	m_2	je hmotnost plné nádoby [kg],
	V	je objem nádoby [m^3].

$$BD_d = BD_{ar} \frac{100 - w}{100}, \quad (12)$$

kde	BD_d	je sypná hmotnost v bezvodém stavu [kg/m^3],
	BD_{ar}	je sypná hmotnost v původním stavu [kg/m^3],
	w	je vlhkost paliva v původním stavu [wt%].

Sypná hmotnost se zjišťuje minimálně ze dvou vzorků jako aritmetický průměr jednotlivých vzorků. Bezprostředně po zvážení je nutné stanovit vlhkost. Pro opakovatelnost měření vzorků s $BD < 300 \text{ kg}/\text{m}^3$ jsou přípustné rozdíly do 3,0 %, pro $BD \geq 300 \text{ kg}/\text{m}^3$ do 2,0 %. Pro

reprodukovatelnost $BD < 300 \text{ kg/m}^3$ jsou přípustné rozdíly do 6,0 %, pro $BD \geq 300 \text{ kg/m}^3$ do 4,0 %.

5.4 Hustota

Stanovení hustoty (hustoty částic, particle density) má v oboru tuhých biopaliv význam především u lisovaných paliv (pelety a brikety) a dřeva (kmeny, rovnané palivové dříví). V případě stanovení energetického obsahu pelet je výhodnější použít přímo sypné hmotnosti (bulk density). V případě rovnaného palivového dříví se vychází z hustoty a koeficientu zaplnění hráně.

Hustota částic je náchylná ke změnám hodnoty v čase z důvodů závislosti na vlhkosti, vibracích a biodegradaci biologického materiálu. Hodnota změřené hustoty by tedy měla být považována za okamžitou hodnotu v čase, nebo obvyklou hodnotu v určité části technologického uzlu.

Hustota je definována jako poměr hmotnosti a objemu vzorku. Základem stanovení je tedy stanovení hmotnosti a objemu. Zatímco hmotnost lze zjistit poměrně snadno, stanovení objemu je spojeno s několika nejistotami. Nepravidelný tvar a drsnost povrchu je důvodem vysoké variability zvláště u stereometrických metod. Hydroskopičnost komprimovaného dřeva závisí na druhu původního materiálu. Hydroskopičnost pelet a briket má vliv nejen na hmotnost vzorku, ale i na objem. Hustota částic má vliv na sypnou hmotnost a na vlastnosti spalování (tepelná vodivost, doba hoření a rychlost uvolňování prchavé hořlaviny).

5.4.1 Metody měření hustoty

5.4.1.1 Metody měření hustoty pomocí výtlačku kapaliny

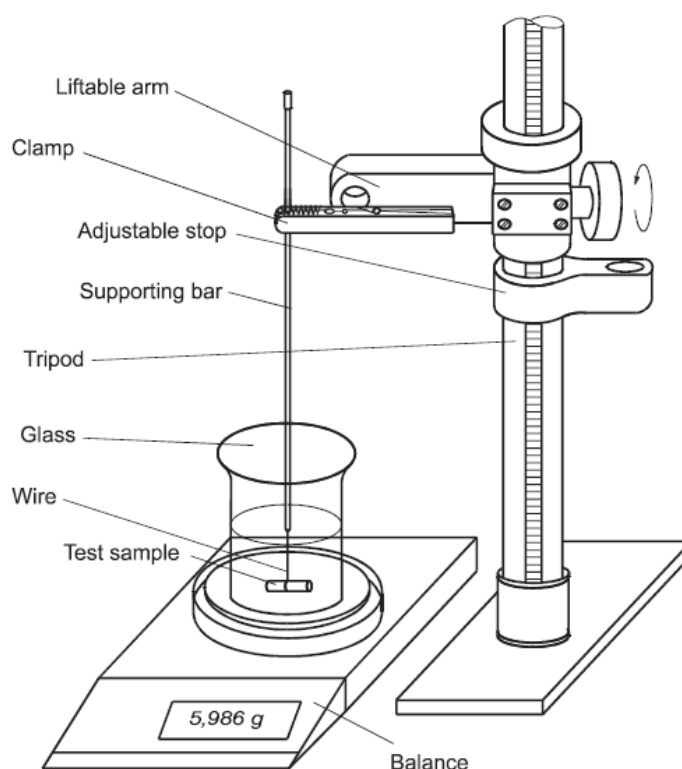
Metody jsou založeny na aplikaci Archimédova zákona. Objem vzorku je určen hmotností objemu vytlačeného, když je vzorek ponořen do kapaliny. Tato metoda má dvě velké nevýhody. Voda může být absorbována vzorkem díky jeho hydroskopickým vlastnostem a vzduchové bubliny mohou narůstat na povrchu vzorku při jeho ponoření z důvodu povrchového napětí. Pokud se chceme vyhnout uvedeným problémům, je třeba vzorek opatřit na povrchu tenkou vrstvou z parafínu a do kapaliny přidat smáčedlo snižující povrchové napětí.

5.4.1.1.1 Hydrostatická metoda.

Testovaný vzorek měříme nejprve na vzduchu a pak při jeho ponoření do kádinky s vodou jako navýšení hmotnosti. Výslednou hustotu zjistíme z rovnice 13. Princip metody je na obr. 40.

$$\rho_M = \frac{m_a}{m_{w,dis}} \cdot \rho_w, \quad (13)$$

kde	ρ_M	je hustota buď skupiny pelet nebo jednotlivé brikety při daném obsahu vody $M \text{ [g/cm}^3\text{]}$,
	m_a	je hmotnost vzorku na vzduchu [g],
	$m_{w,dis}$	je hmotnost kapaliny vytlačené vzorkem [g],
	ρ_w	je hustota použité kapaliny $\text{[g/cm}^3\text{]}$.



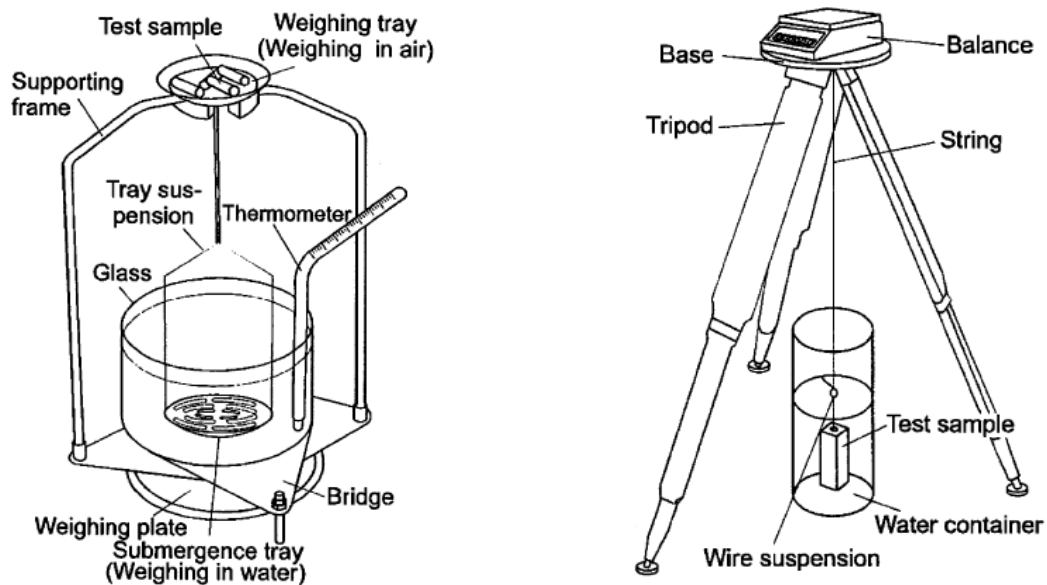
Obr. 40 Stanovení objemu hydrostatickou metodou. Podle [RABIER et al, 2006].

5.4.1.1.2 Vztlaková metoda.

Na rozdíl od hydrostatické metody není kádinka s vodou umístěna na váze. Měříme tak hmotnost vzorku sniženou o vztlakové síly. Výslednou hustotu zjistíme z rovnice 14. Princip metody je na obr. 41.

$$\rho_M = \frac{m_a}{m_a - m_1} \cdot \rho_w, \quad (14)$$

kde	ρ_M	je hustota buď skupiny pelet nebo jednotlivé brikety při daném obsahu vody M [g/cm^3],
	m_a	je hmotnost vzorku na vzduchu [g],
	m_1	je hmotnost vzorku v kapalině [g],
	ρ_w	je hustota použité kapaliny [g/cm^3].



Obr. 41 Stanovení objemu metodou měření vztlaku pro pelety (vlevo) a brikety (vpravo).
Podle [RABIER et al, 2006].

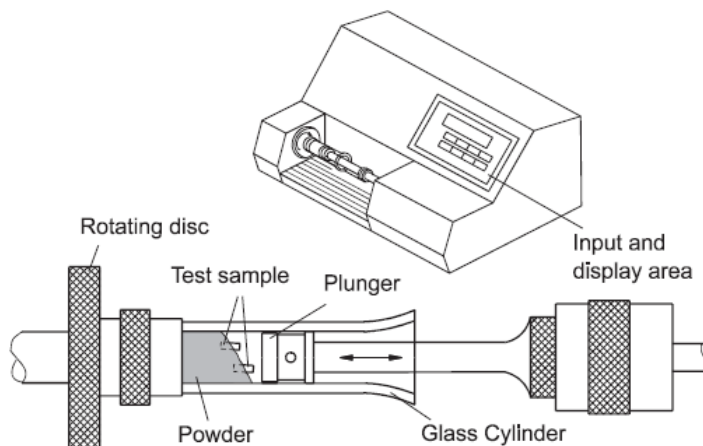
5.4.1.2 Stereometrická metoda

Vzorek je vážen pouze na vzduchu, jeho objem je zjištěn změřením základních rozměrů například posuvným měřidlem. V případě pelet měříme průměr dvakrát křížem na každém konci a uprostřed pelety a její délku. Objem pak vypočítáme jako objem válce. Přesnost vážení na 0,1 mg, přesnost měření délek na 0,1 mm.

5.4.1.3 Metoda měření hustoty pomocí výtlačku pevné látky

5.4.1.3.1 Metoda s pyknetrem

Pyknometr je přístroj zobrazený na obr. 42. Jde o válec s pístem, přičemž uvnitř je jemný prach. Zasunutím pístu s konstantní silou změříme přesnou polohu pístu. Poté píst uvolníme a do prachu zasuneme měřený vzorek pelet. Opět zasuneme píst se stejnou silou a změříme jeho polohu. Změna polohy pístu odpovídá objemu uvnitř uzavřených pelet.

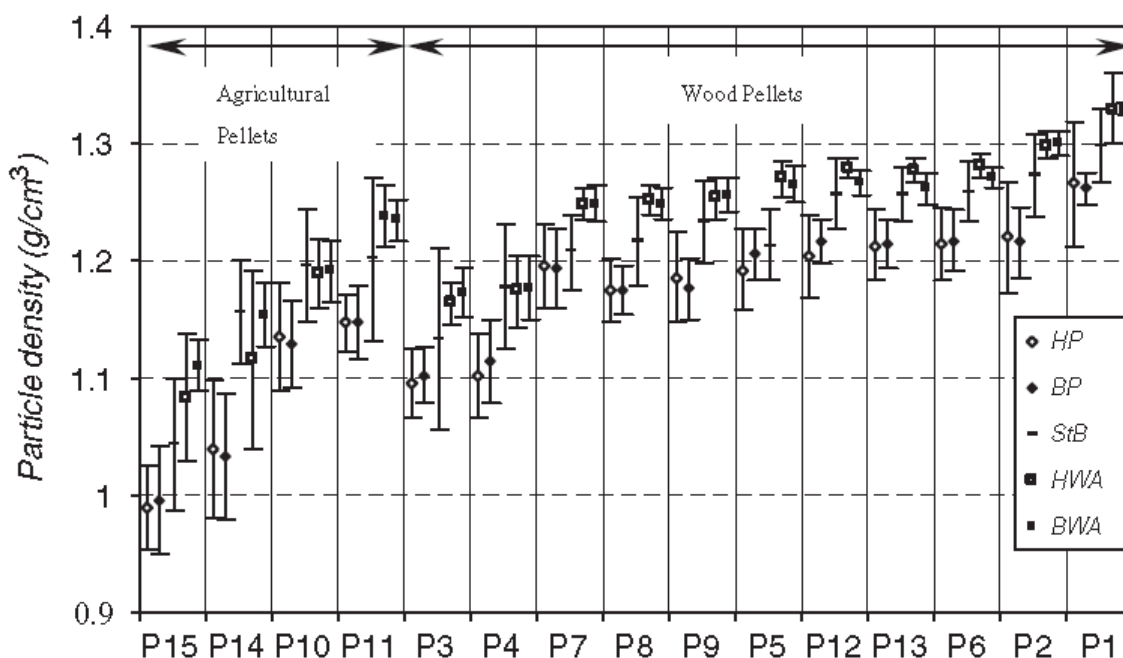


Obr. 42 pyknometr, podle [RABIER et al, 2006]

5.4.2 Porovnání metod měření hustoty

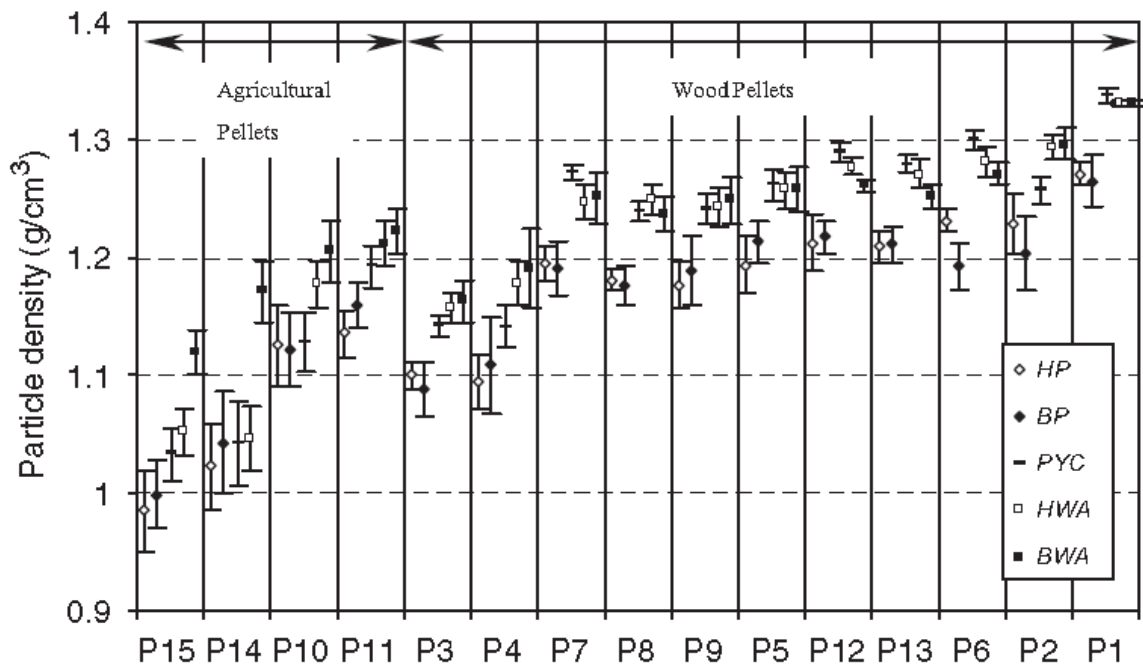
Rabier provedl porovnání výsledků měření hustoty pelet a briket za různých podmínek [RABIER et al, 2006]. Porovnává šest metod stanovení hustoty částic pelet a briket. Jsou porovnány stereometrické metody a metody výtlačku kapaliny i pevné látky. Testování bylo prováděno v mezinárodním týmu pěti evropských laboratoří s použitím 15 druhů pelet a 5 druhů briket. Vlhkost použitých vzorků byla stanovena před testováním.

Metody hydrostatická a vztlková byly provedeny ve variantě aplikace smáčedla do kapaliny a ve variantě aplikace parafínu na povrch pelet. Další porovnávanou metodou byla metoda stereometrická. Poslední metoda využívala pro stanovení objemu pyknometr, byla však použita pouze v jedné z pěti laboratoří, proto zde nebylo možné stanovit reprodukovatelnost. Výsledky pro 15 měřených vzorků jsou uvedeny na obr. 43 až obr. 45. Vzorky P15 a P10 jsou pelety ze slámy, vzorek P14 je peleta ze sena a vzorek P11 miskantus. Ostatní vzorky představují pelety ze dřeva (měkké, tvrdé, směs).

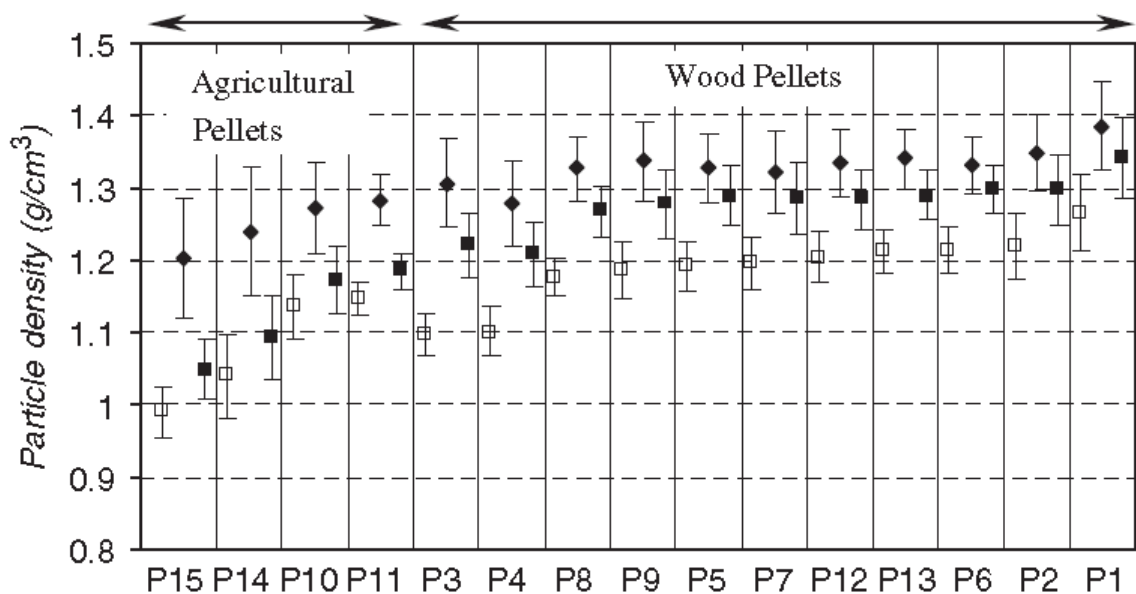


Obr. 43 Průměrná hodnota a rozptyl naměřených hodnot hustoty jednotlivých vzorků pelet za použití několika měřících metod. Vzorky měřeny v pěti laboratořích, podle [RABIER et al, 2006].

HP – hydrostatická metoda s pokrytím povrchu pelety parafinem, BP – vztlková metoda s pokrytím povrchu pelety parafinem, StB – stereometrická metoda, HWA – hydrostatická metoda se smáčedlem, BWA – vztlková metoda se smáčedlem



Obr. 44 Průměrná hodnota a rozptyl naměřených hodnot hustoty jednotlivých vzorků pelet za použití několika měřících metod. Vzorky měřeny v jedné laboratoři, podle [RABIER et al, 2006].
 HP – hydrostatická metoda s pokrytím povrchu pelety parafínem, BP – vztaková metoda s pokrytím povrchu pelety parafínem, PYC – pyknometr, HWA – hydrostatická metoda se smáčedlem, BWA – vztaková metoda se smáčedlem



Obr. 45 Průměrná hodnota a rozptyl naměřených hodnot hustoty jednotlivých vzorků pelet za použití hydrostatické metody s parafínem. Bez korekce a s korekcí na parafín, podle [RABIER et al, 2006].

Nízkou variabilitu vykazují metody hydrostatická a vztaková za použití smáčedla. Výsledku poskytnuté oběma metodami lze považovat za identické. Naopak vysoká variabilita je při použití stereometrických metod a pyknometru. Tyto metody jsou zcela nevhodné pro agropelety (pelety s nízkou hustotou).

Korekce na objem parafínu Corr1 byly zjištěny pouze vážením pelet před a po aplikaci parafínu při známé hustotě parafínu. Nevýhodou je nemožnost zjištění penetrace. Pro stanovení penetrovaného množství parafínu bylo zjištění váhového přírůstku doplněno o zjištění objemu před a po aplikaci parafínu pyknometrem, a to pro jednotlivé kategorie pelet hromadně. Výsledkem je pak korekce na objem parafínu Corr2. Z grafu na obr. 45 je patrné, že především agropelety vykazují vysokou penetraci parafínu a je tedy nutné použít korekci Corr2. Pro dřevní pelety je rozdíl mnohem menší, Corr2 však vykazuje i zde vyšší přesnost.

5.4.3 Stanovení hustoty částic

Stanovení hustoty částic pelet a briket popisuje norma „Tuhá biopaliva – Stanovení hustoty částic“ [ČSN EN 15150:2012]. Měření objemu částic je založeno na principu měření vztlaku částic ponořených do vody. Aby nedošlo k porušení lisovaných paliv vlivem ponoření do vody, je na jejich povrch aplikována tenká vrstva parafínu o teplotě tání 52 až 54 °C. Použitá voda má mít nízký obsah iontů (pitná voda) a teplotu v rozmezí 10 až 20 °C. Do vody se přidává detergent (Triton X-100).

5.4.3.1 Stanovení hustoty částic pelet

Základním přístrojem jsou váhy s přesností stanovení hmotnosti na 1 mg. Váhy musí být chráněny před prouděním vzduchu umístěním do skříňky. Váhy musí být doplněny příslušenstvím podle obr. 41 vlevo, které umožňuje vážení pelet ve vzduchu i ve vodě. Můstek vynáší zatížení kádinky s vodou mimo desku vah. Miska slouží k vážení na vzduchu a perforovaná ponorná miska je určena pro vážení ve vodě. Perforování má menší rozměry než pelety a umožňuje intenzivní ponoření do vody, rozměr misky musí umožnit umístění minimálně čtyř pelet. Pelety o hustotě menší než hustota vody je třeba vážit na upraveném zařízení tak, aby neplavaly na hladině.

5.4.3.2 Stanovení hustoty částic briket

Základním přístrojem jsou váhy s přesností stanovení hmotnosti na 10 mg. Pokud jsou zkoušeny brikety o hmotnosti každé jednotlivé vyšší než 500 g, je možno vážit s přesností na 100 mg. Doporučuje se použití vah umístěných na trojnožce a vybavených spojovacím bodem ve spodní části (obr. 41 vpravo). Pro spojení vah a měřené brikety je použit ocelový tenký drát. Trojnožka je vybavena deskou s otvorem, která umožňuje přímé připojení drátu. Na spodním konci ocelového drátu je spojovací kroužek nebo háček, který umožňuje připojení brikety. Pokud je měřena briketa s hustotou menší než je hustota vody, zatěžuje se briketa závažím, které zabraňuje jejímu vyplavání.

Hustota pelet nebo briket se pro každé měření stanoví podle rovnice 15.

$$\rho_M = \frac{m_a}{m_a - m_1} \cdot \rho_w, \quad (15)$$

kde	ρ_M	je hustota buď skupiny pelet nebo jednotlivé brikety při daném obsahu vody M [g/cm ³],
	m_a	je hmotnost vzorku na vzduchu [g],
	m_1	je hmotnost vzorku v kapalině [g],
	ρ_w	je hustota použité kapaliny [g/cm ³].

Každé měření se opakuje desetkrát, výsledek se uvádí jako aritmetický průměr jednotlivých měření s přesností na 0,01 g/cm³. V některých evropských zemích existují národní předpisy, například v Německu [DIN 51731] či v Rakousku [ÖNORM M7135].

5.5 Mechanická odolnost

Mechanická odolnost je schopnost tuhých komprimovaných biopaliv odolávat mechanickým silám, které způsobují hmotnostní úbytek vlastní formy paliva (pelety, brikety) v podobě oddělování drobných částic. Je definována jako relativní hodnota konečné hmotnosti vzorku k hmotnosti počáteční při aplikaci stanoveného působení mechanických sil na vzorek ve zkušebním stroji. Pelety o nízké mechanické odolnosti se během transportu a dopravy rozpadají na menší částice, zvyšuje se prašnost a dochází tak k zablokování dopravníkových cest technologie využívající pelety jako nosiče energie. Podle mechanické odolnosti pelet tak můžeme usuzovat na míru rizika potenciální poruchy dopravníkových cest [STAHL et al, 2009] či problémy s prachovými frakcemi při dopravě (prašnost, výbušnost) a spalování (obsah TZL ve spalinách).

5.5.1 Stanovení mechanické odolnosti

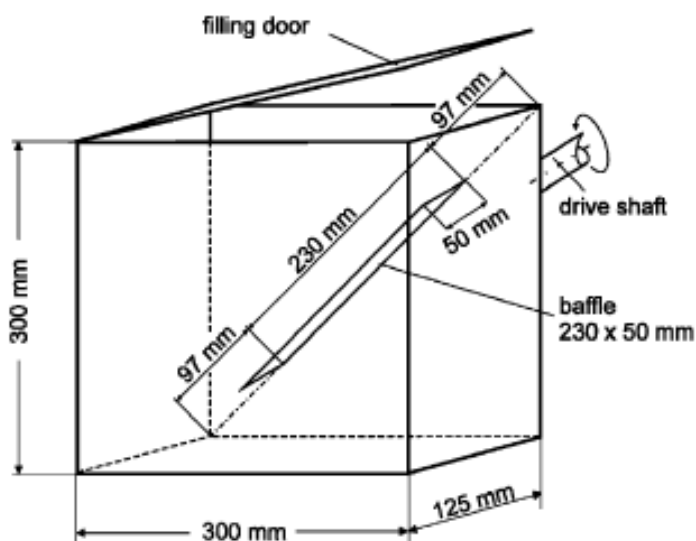
$$DU = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100, \quad (16)$$

kde	DU	je mechanická odolnost pelet [%],
	m_A	je hmotnost vzorku po testu [g],
	m_E	je hmotnost vzorku před testem [g].

Zjišťování mechanické odolnosti pelet definuje norma „Tuhá biopaliva - Stanovení mechanické odolnosti pelet a briket - Část 1: Pelety“ [ČSN EN 15210-1:2010]. Vzniku této normy však předcházelo několik porovnávacích studií různých způsobů měření založených na rozdílných principech měření. Například Temmerman [TEMMERMAN et al, 2006] porovnává různé metody stanovení mechanické odolnosti pelet. Srovnává rotační testovací zařízení dle standartu ASAE [ASAE S 269.4, 1996], měření dle ÖNORM využívající přístroj Lignotester [ÖNORM M 7135] a další metodu s rotačním testovacím zařízením v podobě navrženého prototypu. Pro jednotlivé testované metody stanovil opakovatelnost, reprodukovatelnost a minimální počty opakování měření vedoucí k dosažení požadované přesnosti. Navíc byla testována závislost mezi mechanickou odolností a hustotou, která nebyla prokázána.

5.5.2 Metody měření mechanické odolnosti pelet

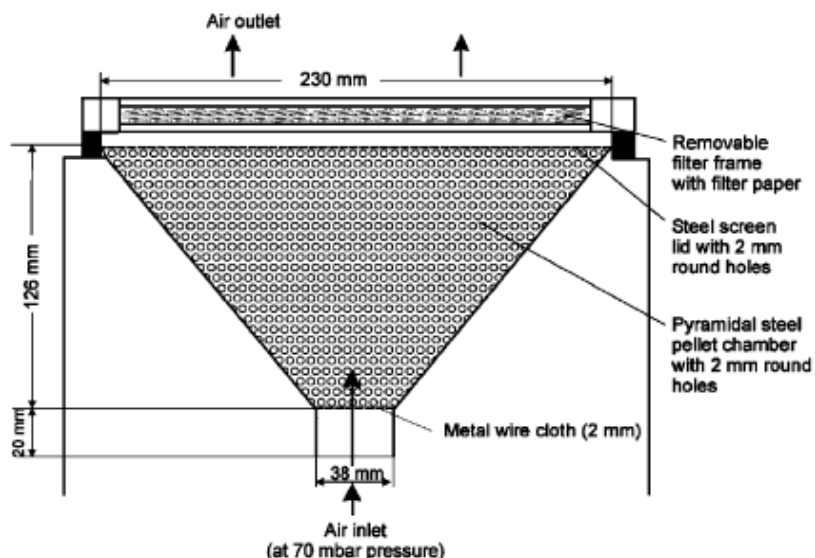
5.5.2.1 Přístroj dle ASAE S269.4



Obr. 46 Přístroj pro měření mechanické odolnosti pelet dle [ASAE S269.4, 1996]

Přístroj dle ASAE S269.4 je tvořen zásobníkem tvaru kvádru o hranách 300 x 300 x 125 mm, uvnitř kterého je umístěna diagonálně k nejvyšší stěně přepážka 230 x 50 mm (obr. 46). Zásobník se naplní peletami o hmotnosti 500g (hmotnost m_E), ze kterých byly odstraněny drobné frakce na ručním sítu. Následně se aplikuje 500 otáček o rychlosti 50 otáček za minutu. Na sítu o otvorech 3,15 mm se provede ručně odstranění podrozměrné frakce, celistvé pelety v podobě nadsítiného se opět zváží (hmotnost m_A). Za výsledek je považován aritmetický průměr tří opakování.

5.5.2.2 Přístroj Lignotester

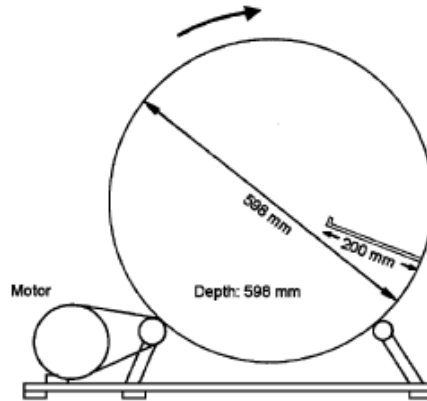


Obr. 47 Přístroj Lignotester pro měření mechanické odolnosti pelet dle [ÖNORM M 7135, 2000]

Přístroj Lignotester je tvořen čtyřstrannou pyramidou postavenou na špici (obr. 47). Jde o metodu používanou v rakouské normě Önorm M7135. Jednotlivé stěny jsou perforovány otvory o průměru 2 mm. Vnitřní rozměry pyramidy jsou 230 ± 5 mm u základny a 126 ± 10 mm po výšce. Zkoušený vzorek víří uvnitř pyramidy díky proudu vzduchu o definovaném tlaku. Tím dochází k otěru jednotlivých pelet o sebe a o stěny pyramidy. Vzorek je tvořen navázkou $100 \pm 0,1$ g pelet předem zbavených podrozměrných frakcí síťováním. Následně je aplikován proud vzduchu o tlaku 70 mbar po dobu 60 s. Po této době je přístroj automaticky vypnut a obsluha provede opětné zvážení vzorku. Za výsledek je považován aritmetický průměr pěti opakování.

5.5.3 Metody měření mechanické odolnosti briket

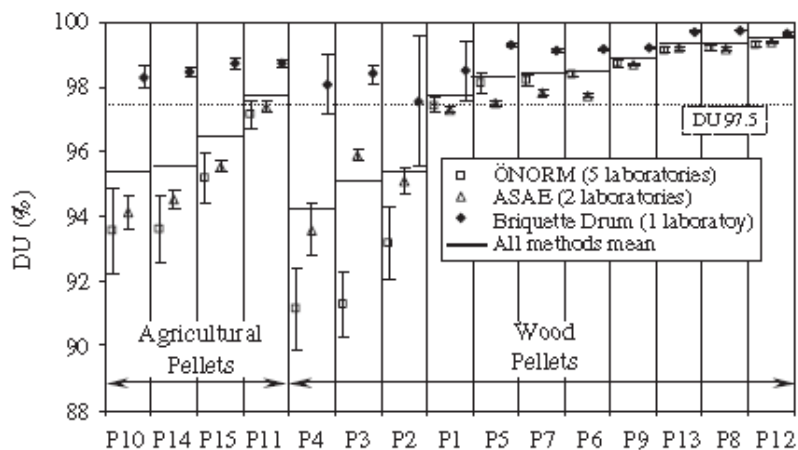
Posledním porovnávaným způsobem měření je testování v bubnu primárně určeném pro měření mechanické odolnosti briket. Jde o válec o vnitřním průměru 598mm a hloubce 598mm který je uvnitř vybaven radiálně umístěnou přepážkou 598 x 200mm (obr. 48). Test probíhá 30s při rychlosti 105 otáček za minutu. Následně je provedeno odstranění podsítiného a nové vážení. Počet opakování je stanoven na pět.



Obr. 48 Příklad pro měření mechanické odolnosti briket, podle [TEMMERMAN et al, 2006].

5.5.4 Porovnání metod měření mechanické odolnosti pelet

Porovnávací test byl prováděn na celkem 26ti vzorcích pelet v několika laboratořích. V testování byly zastoupeny jak pelety za dřeva, tak agropelety. Vyhodnocení mechanické odolnosti (DU) pelet je uveden na obr. 49. Použití bubny na brikety je nevhodné, protože se neprojevilo snížení mechanické odolnosti pelet. Použití Lignotesteru a metody dle ASAE vykazuje velmi dobrou shodu výsledků. Lignotester ale vykazuje vyšší variabilitu výsledku, což je třeba kompenzovat větším počtem opakování měření. Větší variabilitu rovněž vykazují všechny agropelety a pelety ze dřeva s nižší mechanickou odolností než 97,5 % a to u obou metod. Pro praxi je tak nejvýhodnější použití bubny dle ASAE S269.4. Tato metoda se proto stala základem nové evropské normy EN 15210-1 Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets, která je od května 2010 převzata jako [ČSN EN 15210-1:2010].

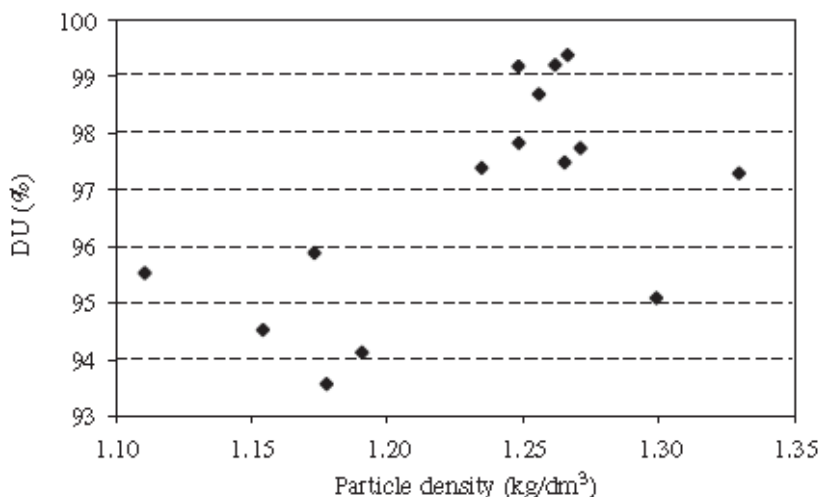


Obr. 49 Mechanická odolnost pelet různého původu zjištěná třemi rozdílnými metodami. Podle [TEMMERMAN et al, 2006].

V případě ASAE metodiky a dřevěných pelet s mechanickou odolností nad 97,5 % stačí jedno opakování měření pro dosažení přesnosti stanovení 0,5 %. U agropelet by dosažení stejné přesnosti vyžadovalo sedm opakování měření. (Pro Lignotester pak 3 a 49 opakování).

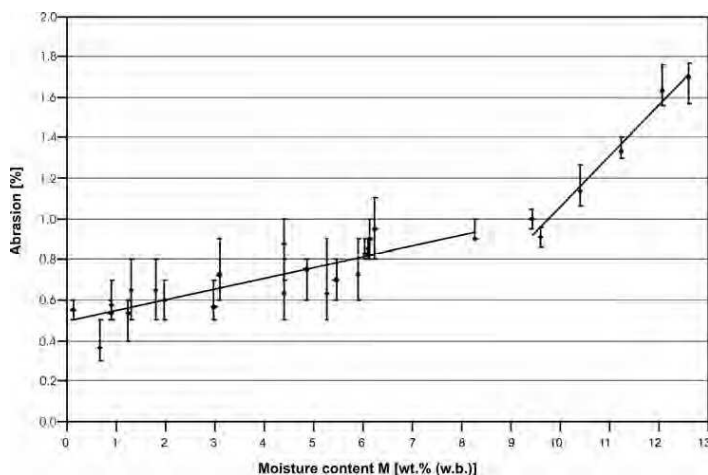
5.5.5 Vliv fyzikálních vlastností pelet na mechanickou odolnost

Velmi často bývá spojována mechanická odolnost s hustotou pelet. Vzájemnou závislostí těchto veličin se zabýval Temmerman [TEMMERMAN et al, 2006], závislost však nebyla prokázána (obr. 50).



Obr. 50 Funkční závislost mechanické odolnosti pelet na hustotě. Podle [TEMMERMAN et al, 2006].

Naproti tomu Obernberger zjistil silnou závislost abraze (mechanické odolnosti) na vlhkosti pelet (obr. 51) [OBERNBERGER et al, 2010]. Abraze je doplněk mechanické odolnosti do 100 %, proto lze konstatovat, že se zvyšováním vlhkosti pelet dochází ke snižování mechanické odolnosti. Do vlhkosti 10 % pozvolna, poté pak velmi prudce. Mechanická odolnost je tedy závislá nejen na technologických parametrech výroby pelet, ale i na způsobu skladování výsledného produktu. Vlhkost pelet vyšší než 10 % signalizuje nižší mechanickou odolnost.



Obr. 51 Funkční závislost abraze pelet na vlhkosti. Podle [OBERNBERGER et al, 2010].

5.5.6 Poruchy automatických kotlů vlivem nízké mechanické odolnosti

Dostatečná mechanická odolnost pelet má zásadní vliv na jejich využití v automatických kotlích malých výkonů. Ve Švédsku byly provedeny studie, které analyzují důvody poruch automatických kotlů spalujících pelety [STAHL & WIKSTROM, 2009]. Jednotlivé poruchy byly rozděleny do několika kategorií. Za nejzávažnější jsou považovány poruchy vedoucí

k automatickému odstavení kotle a tím k přerušení dodávky tepla. Další kategorií poruch kotlů jsou pak chyby obsluhy. Poslední, méně závažnou kategorií jsou poruchy které nezpůsobí výpadek dodávky tepla, ale kde kotel pracuje se sníženou hospodárností. Mezi problémy, které způsobí automatické odstavení patří zastavení dopravníkového systému, chod dopravníkového systému naprázdno a prohoření. Zastavení dopravníkového systému je nejčastěji způsobeno zablokováním šnekového dopravníku částicí, jež byla uvolněna z pelet z důvodu jejich nízké mechanické odolnosti. Chod dopravníkového systému naprázdno je způsoben klenbováním. Pelety jsou na rozdíl od štěpky velmi odolné klenbování z důvodu stabilního tvaru a velikosti jednotlivých částic. Problematické jsou však rozpadavé pelety – tedy pelety s nízkou mechanickou odolností. Prohoření paliva je primárně dáno nevhodnými tlakovými poměry mezi dopravníkem paliva a navazujícím hořákem. V tomto případě jde o konstrukční problém kotle, který může být podpořen nevhodnou frakcí paliva. Současné moderní konstrukce hořáků (kotlů) mají dostatečně účinná konstrukční opatření bránící prohoření paliva.

Mezi chyby obsluhy je zařazen problém s vysokým nebo proměnlivým množstvím popela. Tato skutečnost souvisí s nevhodným typem použitého paliva obvykle z důvodu jeho nižší ceny za hmotnostní jednotku. Ne vždy je však tato cena nejnižší po přepočtu na množství tepla na výstupu z kotle. Palivo s vyšším či proměnným podílem popela obvykle znamená spalování s nižší účinností, v extrémních případech pak odstavení hořáku. Chybu však lze zcela eliminovat dodržením předepsaného druhu paliva. Jde tak skutečně o typickou chybu obsluhy. Další chybou obsluhy je nevhodná manipulace s palivem či nevhodné skladování, při kterém může dojít ke zvýšení vlhkosti a nebo ke snížení mechanické odolnosti.

Problémy s hospodárností provozu jsou zapříčiněny převážně proměnlivou sypnou hmotností paliva. Dopravník hořáku dávákuje palivo v cyklech s konstantním objemem. V případě rozdílné sypné hmotnosti se pak jedná o rozdílnou hmotnost paliva, což se projeví změnou účinnosti spalování. Řešením je zpětná vazba o složení spalin za kotlem, což jistě není standardní řešení, zejména v podmínkách České republiky. Poruchy příslušenství (regulátory, snímače, systém automatického čištění výměníku aj.) nemusí způsobit odstávku, kotel lze provozovat za snížené účinnosti.

5.5.7 Vlastní vývoj laboratorního přístroje

Na základě výše uvedeného lze považovat za klíčové parametry původ biomasy určené pro výrobu pelet a mechanickou odolnost spolu s vlhkostí pelet. Z důvodů možnosti měřit mechanickou odolnost pelet byl na našem pracovišti vyvinut funkční vzorek „Peltest“ (obr. 52.) [KLEPÁRNÍK, 2009a].



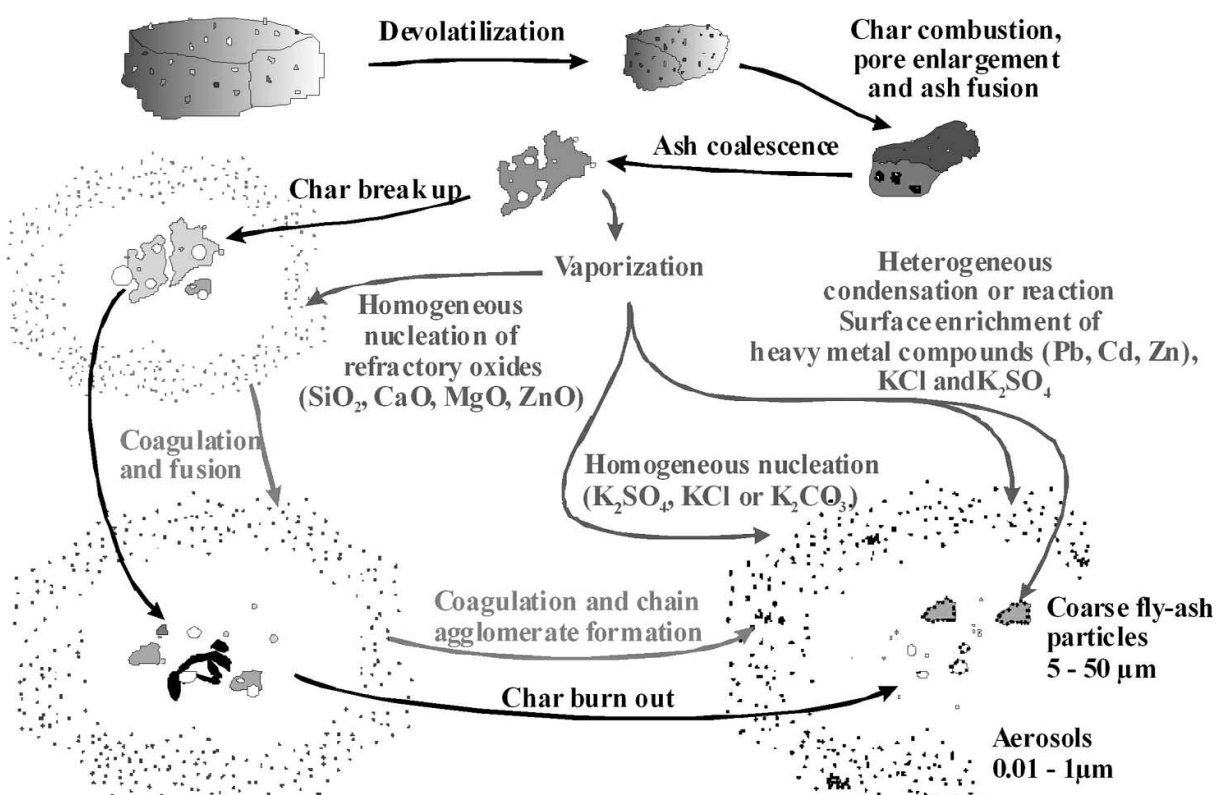
Obr. 52 Funkční vzorek přístroje „PelTest“. [KLEPÁRNÍK, 2009a]

5.6 Obsah popela

Prvky tvořící popel v biomase jsou soli vázané v uhlovodíkové struktuře (vázaný popel), které bývají často doplněny minerálními částicemi z nečistot zanesených do biomasy během těžby a dopravy (volný popel). Sloučeniny vázaného popela jsou homogenně rozloženy v palivu a jsou mnohem reaktivnější než sloučeniny volného popela. Snadno těkají a ochotně reagují v hořící vrstvě.

Během hoření se sloučeniny tvořící popel vypařují a jsou uvolňovány do plynné fáze. Složení a množství vypařené frakce je závislé na vlastnostech paliva, atmosféře a použité technologii spalování. Například vysoké spalovací teploty a redukční atmosféra způsobuje zvýšení vypařování pro životní prostředí významných těžkých kovů jako jsou Zn, Pb a Cd. Tyto kovy poté za nižších teplot kondenzují na povrchu popílku. Popílek je jemný úletový popel, který se dostává až za spalovací komoru a je odloučen multicyklonem, jemnější frakce jsou zachyceny až filtrem (u kotlů malých výkonů bez filtrace se dostávají do ovzduší jako prach). Hrubší kusy popela, které se neudrží ve vznosu, propadnou do popelníku pod roštem (u roštových kotlů). Podrošťový popel tedy není obohacen o těžké kovy. U běžných roštových topenišť tvoří podrošťový popel 60 až 90 %, popílek pak zbytek.

Zvýšený obsah alkalických kovů Ca, Na a K způsobuje nižší teploty tavení popela. Díky tomu dochází k zanášení roštu. Důležitou vlastností biomasy je tedy nejen množství popela ale i hodnoty charakteristických teplot popela.



Obr. 53 Pochody tvořící popel při spalování biomasy. [OBERNBERGER et al, 2006]

Množství popela v palivu a jeho charakteristické teploty ovlivňují stabilitu hoření. Palivo, tvořící velké množství popela a nebo spékavý popel, zanáší rošty hořáku a omezuje přístup spalovacího vzduchu k palivu. Dochází tak ke zvyšování chemického i mechanického

nedopalu, což vede k snížení účinnosti spalování. V horším případě může dojít k vyhasnutí hořáku z důvodu extrémního nedostatku spalovacího vzduchu či zablokování přívodu paliva z důvodu napečených vrstev popela v dopravníkových cestách. Z uvedených důvodů je vhodné znát nejen množství popela v palivu, ale i jeho charakteristické teploty. Z pohledu souboru evropských norem „Tuhá biopaliva“ jsou však charakteristické teploty pouze vlastností informativní (nepovinná vlastnost, kterou není třeba uvádět).

Typický obsah popela v biomase různého původu uvádí tabulka 11. Nejmenší obsah popela má dřevo bez kůry. Dřevo mnohých tropických dřevin má vyšší obsah popela než naše domácí dřeviny z důvodu vyššího obsahu křemíku. Největší množství popela lze očekávat u slámy a travin.

Tab. 11. Obsah popela v biomase různého původu [OBERNBERGER & THEK, 2010, s. 59]

Fuel type	Typical ash content wt.% (d.b.)
Softwood ¹⁾	0.4 - 0.8
Hardwood ¹⁾	1.0 - 1.3
Bark	2.0 - 5.0
Straw	4.9 - 6.0

Spékavost popela je závislá na jeho chemickém složení, které uvádí tabulka 12. Obecně lze říci, že se zvyšujícím se podílem zásaditých sloučenin (sloučeniny s Ca, K, Na, Mg) v popelu klesá teplotní odolnost popela. Naopak sloučeniny Si, Al a Ti teplotní odolnost popela zvyšují. Pro zhodnocení teplotního chování popela se často používají různá poměrová čísla. Nejčastěji používaným je poměr zásaditých a kyselých oxidů, uvedený v rovnici 17. Pro uhlí je optimální hodnota $R_{b/a}=0,75$, pro biomasu o něco nižší [JENKINS et al., 1998].

Tab. 12. Chemické složení popela biomasy různého původu [OBERNBERGER & THEK, 2010, s. 60]

Element	Unit	Wood (spruce)	Bark (spruce)	Straw (wheat, rye)	Whole crops (wheat, triticale)
Ca	wt.% (d.b.)	26 - 38	24 - 36	4.5 - 8.0	3.0 - 7.0
K	wt.% (d.b.)	4.9 - 6.3	3.5 - 5.0	10.0 - 16.0	11.0 - 18.0
Mg	wt.% (d.b.)	2.2 - 3.6	2.4 - 5.6	1.1 - 2.7	1.2 - 2.6
Na	wt.% (d.b.)	0.3 - 0.5	0.5 - 0.7	0.2 - 1.0	0.2 - 0.5
P	wt.% (d.b.)	0.8 - 1.9	1.0 - 1.9	0.2 - 6.7	4.5 - 6.8
Si	wt.% (d.b.)	4.0 - 11.0	7.0 - 17.0	16.0 - 30.0	16.0 - 26.0

$$R_{b/a} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}, \quad (17)$$

kde $R_{b/a}$ je poměr zásaditých a kyselých oxidů [-].

Jednoznačné hodnocení jednoduchým poměrem je však problematické. Konkrétní chování popela závisí mimo zmíněného poměru i na technologii spalování a přítomnosti sloučenin dalších prvků, například Cl a S [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008, s. 46].

5.6.1 Stanovení obsahu popela

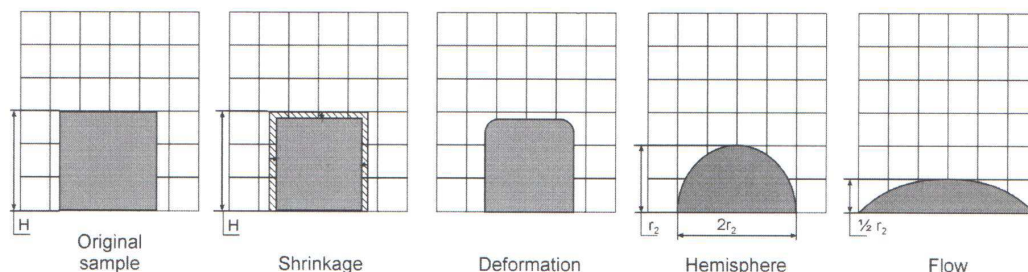
V Evropě existuje několik národních předpisů stanovení obsahu popela, přičemž nejpodstatnější rozdíl je v teplotě žhání vzorku. Švédská norma SS 187171 předepisuje teplotu 550 °C, německá DIN 51719 pak teplotu 815 °C. Žhání při vyšších teplotách způsobuje rozklad uhličitánů vytvářejících CO₂, úbytek těkavých anorganických sloučenin a další oxidaci anorganických sloučenin. Výsledkem je nižší zisk popela při vyšší teplotě žhání. Rozdíl ve stanovení obsahu popela dle výše uvedených norem pro dřevěné pelety dosahuje 15 až 32 % s mediánem 23 % [OBERNBERGER et al, 2004].

V ČR je používána ČSN EN 14775 Tuhá biopaliva – Stanovení obsahu popela, která je v platnosti od května 2010. Teplota žhání je zde předepsaná na 550 ± 10 °C. Teplota pece se nejprve zvyšuje rovnoměrně rychlostí 4,5 °C/min až 7,5 °C/min na teplotu 250 °C. Na této teplotě se setrvá po dobu 60 min., aby se před zapálením vzorku uvolnila prchavá hořlavina. Poté s rychlostí ohřevu 10 °C/min dojde k nárůstu teploty až na 550 ± 10 °C. Na této teplotě se setrvá nejméně 120 min. Pec musí mít dostatečné odvětrání tak, aby nenastal nedostatek kyslíku během zahřívání a spalování.

Navážku tvoří minimálně 1g vzorku. Přesnost vážení na 0,1 mg. Vzorek je před vážením chlazen v exsikátoru z důvodu vysoké hygroscopicity popela.

5.6.2 Stanovení charakteristických teplot popela

Z testovaného popela se vyrobí tělíčko tvaru válce o výšce 3 až 5 mm, přičemž průměr je stejný jako výška. Tělíčko se vloží do pece, kde se zvyšuje teplota a sleduje se tvar tělíčka. Tavení popela probíhá v několika fázích od prvních příznaků až do úplného roztečení (při dostatečné teplotě). Charakteristické teploty odpovídají teplotám v peci při charakteristické deformaci tělíčka (obr. 54). V první fázi se tělíčko smrští a poté se začnou postupně zaoblovat hrany, zaoblení se bude zvětšovat, až vznikne těleso polokulovitěho tvaru. V závěru se zkušební tělíčko zcela rozteče.



Obr. 54 Fáze tavení popela
(původní vzorek – tvar při teplotě 550 °C) [CEN/TS 15370-1:2006]

Teplota smrštění (teplota kulovitěho tvaru) ST (ash sphere temperature, sintering t.) je teplota, při které se projeví smrštění zkušebního válečku (plocha se smrští pod 95% původní plochy).

Teplota deformace (teplota měknutí) DT (ash deformation temperature, softening t.) je teplota, při které nastávají první příznaky zaoblení hran zkušebního tělíska v důsledku tání. Teplota polokulovitěho tvaru (teplota tání) HT (ash hemisphere temperature) je teplota, při které těleso vytvoří přibližně polokulovitý tvar, kdy se jeho výška rovná poloměru základny. Teplota tečení FT (ash flow temperature, melting t.) je teplota, při které se popel rozteče na podložce ve vrstvě, jejíž výška je třetinou výšky tělíska při teplotě tání. Teplota smrštění nemá velký praktický význam. Podstatná je teplota deformace, při které se již částice popela na sebe nalepují a hůře se odstraňují z roštu. Příklad charakteristických teplot biomasy různého původu je uveden v tabulce 13.

Tab. 13. Charakteristické teploty popela různého původu [VAN LOO et al., 2008, s. 45]

	Sintering temp. [°C]	Softening temp. [°C]	Hemisphere temp. [°C]	Melting temp. [°C]	Number of samples
Wood (beech, Austria)	1140	1260	1310	1340	1
Wood (spruce, Austria)	1110–1340	1410–1640	1630– >1700	>1700	3
Bark (spruce, Austria)	1250–1390	1320–1680	1340– >1700	1410– >1700	3
Bark + mineral impurities (spruce, Austria)	1020	1100	>1700	>1,700	1
Miscanthus (Austria)	820–980	820–1160	960–1290	1050–1270	27
Miscanthus (Switzerland)	–	980	1210	1320	n.s.
Straw (winter wheat, Austria)	800–860	860–900	1040–1130	1080–1120	3
Straw (winter wheat, Switzerland)	–	910	1150	1290	n.s.
Cereals (winter wheat, Austria)	970–1010	1020	1120–1170	1180–1220	3
Grass (Austria)	890–980	960–1020	1040–1100	1140–1170	3
Grass (Germany)	830–1130	950–1230	1030–1280	1100–1330	9
Grass (Switzerland)	–	960	1040	1120	n.s.

5.6.3 Vlastní vývoj laboratorního přístroje

Z důvodu potřeby zjišťovat množství popela v připravovaném biopalivu byl na našem pracovišti, ve spolupráci s firmou Rumler, vyvinut funkční vzorek „TGTest“ [KLEPÁRNÍK, 2010b]. Přístroj se svým principem podobá laboratorním termogravimetrům. Lze tedy zjišťovat nejen obsah popelovin v testovaném vzorku, ale i množství prchavé hořlaviny, fixního uhlíku a obsah vody. Stanovení obsahu popela lze provádět podle DIN 51719 i podle ČSN EN 14775. V současné době není možné provádět žhání vzorku ve zvláštní atmosféře.



Obr. 55 Funkční vzorek přístroje „TGTest“. [KLEPÁRNÍK, 2010b]

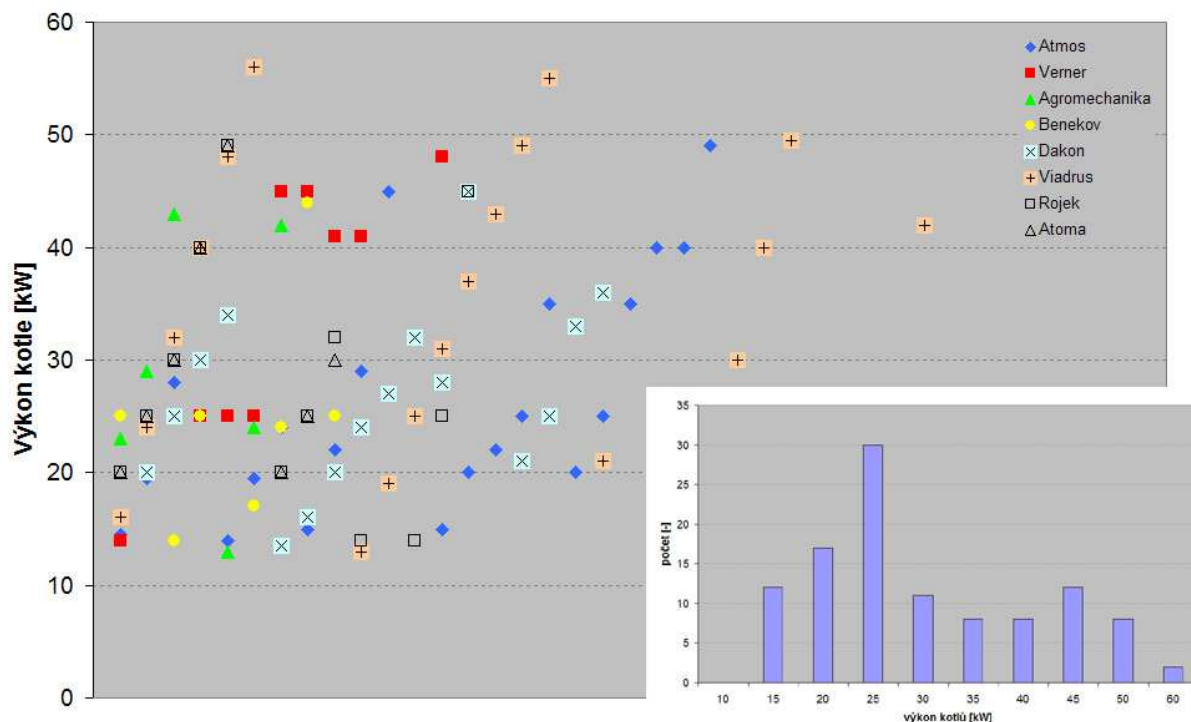
6 Využití tuhých biopaliv

6.1 Přehled vhodných technologií a dostupných paliv

Na celkové náklady na vytápění má vliv cena a výhřevnost paliva, účinnost a náklady na údržbu technologie, výše investice do technologie a životnost jednotlivých komponent. Často opomíjeným faktorem je vlastní spotřeba energie nutná pro chod technologie.

6.1.1 Technologie zdrojů tepla

Na obr. 56 je znázorněn výsledek průzkumu trhu s kotli na tuhá biopaliva o výkonu do 60 kW. Výkonově tyto kotle spadají do kategorie vytápění rodinných domů (typicky do 30kW), zemědělských usedlostí a drobných provozoven. Účelem průzkumu je zmapovat situaci na českém trhu s kotli malých výkonů. Průzkum si neklade za cíl nahradit kompletní seznam všech výrobců. Do průzkumu jsou zahrnuty běžné kotle s prohoříváním i odhoříváním paliva, pyrolytické i automatické kotle. Nejvíce je vyráběno kotlů s výkonem kolem 25kW. Tomu odpovídá i tepelná ztráta starších nezateplených domů. Další početnou skupinu tvoří kotle o výkonu 20, 30 a 45 kW. V poslední době, s poptávkou na vytápění současných novostaveb splňujících požadavky či dokonce doporučení normy [ČSN 730540-2:2011], se objevily kotle se jmenovitým výkonem kolem 15 kW. Zatímco u starší výstavby před zateplením je typická tepelná ztráta rodinných domů 20 až 30 kW, u současných novostaveb dosahuje hodnoty 10 až 15 kW – tedy poloviční. Navíc je stále populárnější výstavba energeticky úsporných, nízkoenergetických či pasivních domů, kde tepelná ztráta dosahuje hodnoty 8 až teoreticky 0 kW. Provozování běžných kotlů s výkonem 25 (15) kW je v této kategorii velice problematické až nemožné. Podrobnosti o jejich využití jsou zpracovány v kapitole „6.1.1.4.3 Zapojení kotle s akumulacním zásobníkem“ Dále uvádím přehled technických vlastností jednotlivých konstrukcí kotlů a základní způsoby zapojení do otopných soustav.



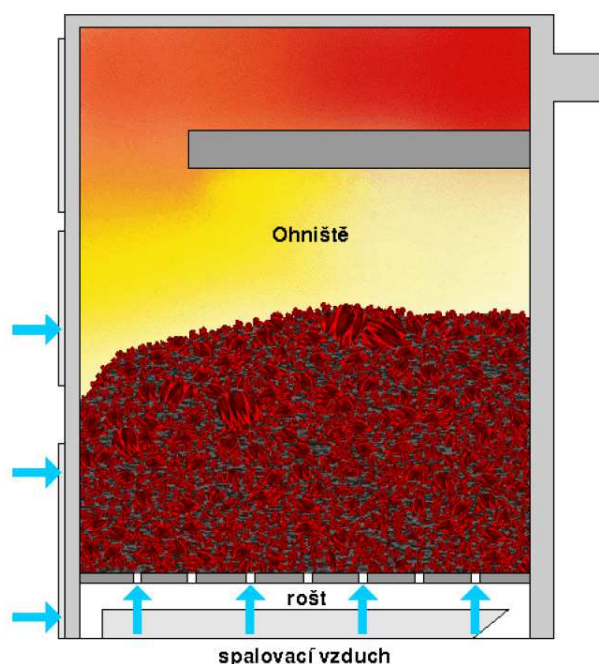
Obr. 56 Průzkum trhu s kotli na tuhá biopaliva do 60 kW, rozdělení podle výrobců a výkonu

6.1.1.1 Kotle na kusová tuhá biopaliva o výkonu do 60 kW

Jako palivo těchto kotlů se používá kusové dříví zkrácené a našťipané na požadovaný rozměr nebo dřevěné brikety. Provoz kotle nelze automatizovat, vyžaduje dohled obsluhy. Po rozhoření je třeba naložit násypku a po jejím vyhoření je třeba opět přítomnost obsluhy aby mohl být kotel znovu naložen. Čím větší je velikost násypky, tím větší jsou přestávky mezi zásahem obsluhy. Vzhledem k tomu, že je palivo přikládáno přerušovaně ve velkých dávkách, kotel lze regulovat pouze škrcením přívodu spalovacího vzduchu. Tím je ale porušen stechiometricky optimální poměr paliva a okysličovadla jehož důsledkem je snižování účinnosti spalování a zároveň zvýšení zátěže životního prostředí emisemi škodlivin. V současné době se na území ČR nejvíce využívá kotlů s odhoříváním paliva na roštu nebo s prohoříváním paliva. Rovněž se prosazuje modernější varianta spalování kusového dříví v podobě pyrolytických kotlů.

6.1.1.1.1 Kotle s prohoříváním paliva

Jde o konstrukčně nejjednodušší a investičně nejlevnější kotle podobné konstrukce jako na obrázku 57, ze kterého zároveň vyplývá princip funkce. U tohoto typu kotle dochází k hoření celé násypky prakticky ve stejném čase. Primární spalovací vzduch se obvykle přivádí pod rošt a sekundární vzduch nad dávku paliva do prostoru uvolňování prchavé hořlaviny. Palivo se přikládá horními dvířky a popel se vybírá spodními dvířky. Kotel je provozován s přirozeným komínovým tahem. Emise nespálených uhlovodíků jsou vysoké jestliže je kotel provozován s nízkým koeficientem přebytku vzduchu (typické škrcení příliš vysokého výkonu kotle v přechodném období a nebo celoročně při předimenzování výkonu oproti tepelné ztrátě domu). Kotel není vybaven žádným typem kontinuální regulace přiváděného vzduchu. Během procesu hoření dochází k extrémnímu kolísání rychlosti hoření zatímco množství přiváděného vzduchu je stále stejné. Logicky tak dochází ke stavům, kdy je vzduchu nedostatek – při plném rozhoření dávky paliva (ztráty chemickým nedopalem) a ke stavům, kdy je vzduchu přebytek – při dohořívání (ztráty komínové). Kotel má tedy nízkou účinnost (pro dřevo na hranici 60 %).



Obr. 57 Kotel s prohoříváním paliva [OCHODEK et al., 2007]

Díky svojí konstrukci tyto kotle dosahují nízkých tlakových ztrát na straně spalin a jsou proto vhodné pro komíny s malým tahem, typicky do 15 Pa. Při volbě komína je třeba počítat s tím, že se teplota spalin při spalování suchého dřeva může dlouhodobě pohybovat v rozsahu 300 až 400 °C. Tyto kotle, v zapojení bez akumulární nádrže, dosahují obvykle pouze emisní třídy 1 dle ČSN EN 303-5.

Z environmentálního a ekonomického důvodu je třeba tento typ kotlů provozovat pouze na jmenovitý výkon. Toho lze dosáhnout příkládáním menších dávek častěji (asi po jedné hodině) a používat výhradně velké kusy dřeva (naštípaná polena). Ve skandinávských zemích jsou tyto zdroje tepla připojovány k akumulacím nádržím [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008, s. 120-121]. V ČR je použití akumulacích nádrží téměř raritou, což pravděpodobně vychází z ekonomické situace. V ČR jsou tyto kotle vyráběny především v provedení litinovém, například firmou Dakon [DAKON, 2013] a Viadrus [VIADRUS, 2013]. Tohoto principu spalování je často využíváno u peletových automatů, které umožňují spalovat kusové dříví jako doplňkové palivo [AGROMECHANIKA, 2010].

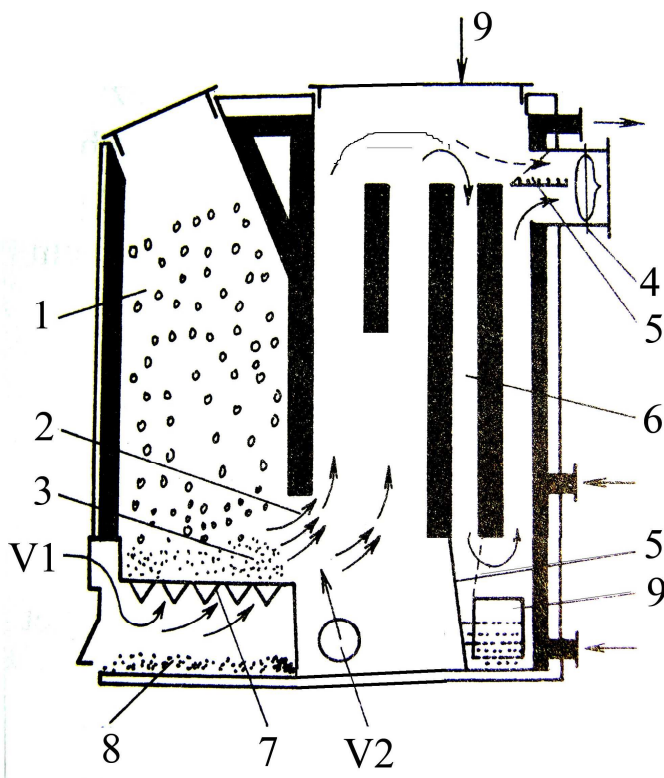
6.1.1.1.2 Kotle s odhoříváním paliva

U těchto kotlů dochází pouze k hoření malého množství paliva ve spodu celé zásoby. Zde přímo na roštu vyhořívá uhlíkový zbytek a z další vrstvy paliva je uvolňována prchavá hořlavina. Hořlavé plyny pak hoří v samostatné části spalovací komory. Primární spalovací vzduch je přiváděn pod rošt a sekundární vzduch do prostoru hoření prchavé hořlaviny. Vzhledem k tomu, že dochází k postupnému odhořívání ze zásoby paliva, lze kotel v jistých mezích regulovat pomocí změny přísávání primárního a sekundárního vzduchu. Kotle vyžadují komín s větším tahem, obvykle nad 25 Pa. Reálná účinnost kotle se pohybuje na hranici 65 %, kotle dosahují typicky 2. emisní třídy.

Dle provedení kotle lze spalovat frakce polen až štěpky, tedy mnohem menší kusy než u kotle spalujícího na principu prohořívání. Kotle využívají většinou přirozeného tahu. Investiční náklady bývají obvykle o 50 % vyšší oproti kotlům s prohoříváním. Spalování je mnohem stabilnější a tedy i s nižšími emisemi.

Kotel založený na principu spalování odhoříváním je znázorněn na obrázku 58. Palivo se nakládá horními dvířky a postupně odhořívá odspodu za přístupu primárního vzduchu pod rošt a sekundárního vzduchu do oblasti před výměník. Primární vzduch umožňuje vyhoření uhlíkového zbytku na roštu, zatímco sekundární vzduch slouží k oksyločení prchavé hořlaviny které, je u dříví až 80 % hmotnosti. Prchavá hořlavina je tvořena především oxidem uhelnatým, který díky vysoké teplotě a kyslíku sekundárního vzduchu oxiduje na oxid uhličitý za uvolnění energie o hodnotě $283,26 \text{ MJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$ [RÉDR & PŘÍHODA, 1991]. To představuje 69,7 % z celkového množství $406,29 \text{ MJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$ energie uvolněné dvoufázovým spalováním uhlíku. Při spalování dříví tedy většina spalovaného materiálu hoří v plynné podobě a hovoříme o tzv. „dlouhém plameni dříví“. Z těchto důvodů bývají spalovací komory kotlů na dříví výrazně objemnější než spalovací komory kotlů na černé uhlí (podíl prchavé hořlaviny pouze 20 %). Pro spalování dříví tak z hlediska účinnosti i ekologie hraje velký význam optimální množství sekundárního vzduchu přivedeného do správného místa v kotli. Pokud je přivedeno nedostatečné množství vzduchu, proces hoření je utlumován a do ovzduší uniká velký podíl nevyhořelých plynů. To způsobuje nižší účinnost kotle díky vyšší ztrátě chemickým nedopalem a zároveň znečištění ovzduší jedovatými plyny. Při nadměrném přebytku vzduchu dochází opět ke snížení účinnosti kotle, tentokrát však narůstající komínovou ztrátou. Každý kotel je třeba nastavit tak, aby docházelo k optimálnímu spalování při co nejnížší komínové ztrátě. Toho lze v praxi dosáhnout při určitém přebytku vzduchu oproti stechiometrickému množství. Optimální umístění trysek sekundárního vzduchu pak napomáhá účinnému promíchání paliva a kyslíku tak aby nemusel být přebytek vzduchu

zbytečně velký. Běžné hodnoty přebytku vzduchu se pohybují v rozmezí od 1,2 až do 2,0 dle konstrukce kotle.



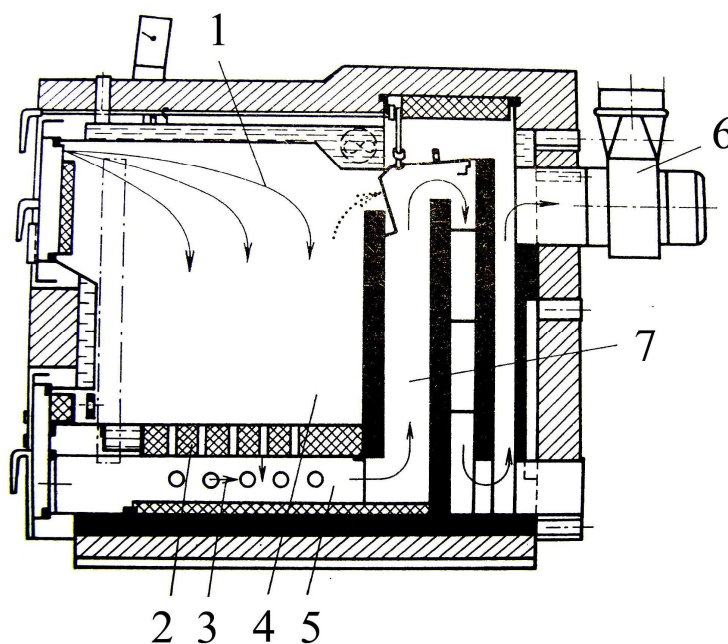
Obr. 58 Kotel s odhoříváním paliva [LÁZŇOVSKÝ et al., 1996].

1 – dávka paliva, 2 – hořící prchavá hořlavina, 3 – hořící uhlíkový zbytek, 4 – komínová klapka, 5 – zkratová klapka při zátopu, 6 – výměník tepla, 7 – rošt, 8 – popelník, 9 – čistící otvor výměníku tepla, V1 – primární vzduch, V2 – sekundární vzduch

6.1.1.1.3 Pyrolytické kotle

U kotlů se spalováním odhoříváním paliva na roštu nelze dodržet vysoké parametry čistoty spalin a případnou regulovatelnost výkonu. Z těchto důvodů je třeba přistoupit ke zcela oddělenému spalování plynné a pevné složky paliva. To umožňuje konstrukce pyrolytických kotlů (obr. 59). Takové kotle jsou vybaveny dvěma komorami umístěnými obvykle vertikálně, které jsou odděleny keramickou vložkou s tryskami. V horní komoře je naložena zásoba paliva ze kterého se uvolňuje prchavá hořlavina, jež odchází tryskou v keramické vložce do spodní komory. V oblasti keramické vyzdívky je pomocí speciálně tvarovaných kanálků přiváděn sekundární vzduch tak, aby se optimálně promísil s dřevoplynem. Směs dřevoplynu se vzduchem pak hoří ve spodní komoře a spaliny odcházejí přes stěny výměníku do komína. Pro dosažení optimálních parametrů spalování bývají tyto kotle vybaveny ventilátorem. Starší konstrukce kotlů mají ventilátor v oblasti přiváděného vzduchu, takže celý kotel je v přetlaku oproti okolí. Nevýhodou je kouření kotle do prostoru kotelny v případě otevření dvířek nebo netěsností obvodového pláště kotle. Výhodou této koncepce je jednodušší konstrukce rotoru ventilátoru, protože ten není tepelně namáhán. Novější konstrukce kotlů je již vybavena odtahovým ventilátorem na straně spalin u výstupního hrdla spalin z kotle. Celý prostor kotle je tak udržován v oblasti podtlaku proti okolí a nehrozí kontaminace kotelny spalinami. Rovněž vybírání popela při zapnutém odtahovém ventilátoru je méně prašné. Množství spalovacího vzduchu lze řídit škrcením klapkou na přívodu vzduchu nebo u lépe vybavených variant řízením otáček ventilátoru elektronicky (frekvenčním měničem či PWM). Lze tak ve spojení s řídicí elektronikou kotle

udržovat stáložárny provoz až po dobu dvanácti hodin (dle typu kotle). Toho lze s výhodou využít k novému rychlému zátopu čímž se zvyšuje komfort obsluhy. Stáložárny provoz se aktivuje snížením počtu otáček na minimum, nebo úplným odpojením ventilátoru až poté, co vyhoří veškerá prchavá hořlavina a na roštu již dohořívá uhlíkový zbytek. Snížený počet otáček ventilátoru znamená snížené množství přiváděného kyslíku ke spalování. Pokud bychom snížili množství přiváděného kyslíku v době přítomnosti prchavé hořlaviny, výrazně by stoupla tepelná ztráta chemickým nedopalem a zhoršily by se ekologické parametry kotle. Snížení přebytku vzduchu zvyšuje rosný bod spalin a tak způsobuje problémy s nízkoteplotní korozí kotlového výměníku. Z těchto důvodů není vhodné pyrolytické kotle na tuhá paliva regulovat snižováním množství spalovacího vzduchu obvykle pod 50 % jmenovitého výkonu. Řešením uvedené situace je použití akumulčních nádrží.



Obr. 59 Pyrolytický kotel [LÁZŇOVSKÝ et al., 1996]. 1 – přívod primárního vzduchu, 2 – šamotová deska s tryskami pro přívod plynu, 3 – přívod sekundárního vzduchu, 4 – zóna zplyňování paliva, 5 – spalovací komora, 6 – spalinový ventilátor, 7 – výměník tepla

Vzhledem k tvarově náročné konstrukci pyrolytických kotlů se zde obvykle nepoužívá litiny. Kotel je tak ocelovým svařencem. Uvnitř spalovací komory kotlů je využíváno žáru odolných keramických materiálů v různém množství a kvalitě. Levnější pyrolytické kotle mají této keramiky mnohem méně. Keramické obložení tvoří tepelně izolační vrstvu, čímž chrání ocelovou konstrukci před vysokými teplotami, a umožňuje dosažení vysokých teplot v oblasti spalovací komory. Keramika funguje jako katalyzátor hoření, což se příznivě projevuje na snížení koncentrace organických uhlovodíků ve spalinách. Při splyňování dřeva vznikají organické kyseliny, které kondenzují na stěnách příkladací komory a způsobují chemickou korozi, která velmi zkracuje životnost kotle. Nejsou-li stěny příkladací komory přímo ochlazovány vodou, mají vyšší teplotu, je zabráněno kondenzaci kyselin a životnost kotlů je mnohem vyšší. [VERNER, 2010a].

Jako palivo pyrolytických kotlů je používáno suché dřevo o vlhkosti maximálně 20%, nebo dřevní brikety. Vlhkost paliva je třeba důsledně dodržovat, protože jinak dochází k výraznému snížení životnosti kotle následkem nízkoteplotní koroze výměníku. I přesto je však nutné provozovat kotel v zapojení s akumulční nádrží, která dále zvýší životnost relativně drahého kotle. Kotle jsou o asi 30 % dražší než běžné kotle spalující na principu odhořívání. Reálná účinnost kotlů se pohybuje na hranici 75 %, výkon kotlů je dobře

regulovatelný v rozsahu 50 až 100 % jmenovitého výkonu, dosahují běžně emisní třídy 3, mnohé konstrukce i 4. třídy.

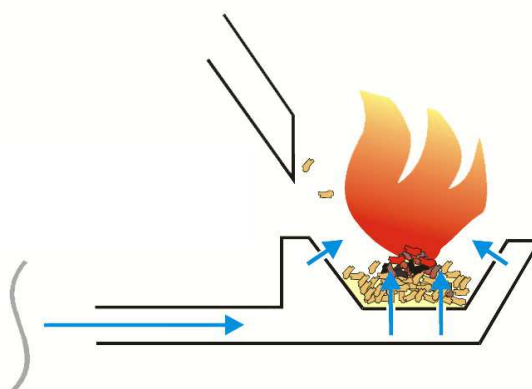
6.1.1.2 Kotle na sypká tuhá biopaliva o výkonu do 60 kW

U sypkých tuhých materiálů lze automatizovat podávání paliva z místa jeho skladování přímo do prostoru hořáku. Uvedeným opatřením lze dosáhnout kvalitativně vyšší úrovně regulace procesu spalování a tedy nižších emisí. Pro uživatele technologie je pak zcela zásadní zvýšení komfortu obsluhy omezením či dokonce úplným odstraněním ruční manipulace s palivem. Dle typu použitého biopaliva lze tuto skupinu zdrojů rozdělit na automatické kotle spalující pelety, štěpku, piliny či obilí. Použití obilí jako paliva je však ze společenského hlediska diskutabilní, osobně jej považuji za opodstatněné pouze u nepotravinářské části produkce především u samotných producentů. V analýze zdrojů se spalováním obilí neuvažuji.

6.1.1.2.1 Automatický kotel na pelety

Pelety mají konstantní rozměry a relativně vysokou mechanickou pevnost. Díky tomu je lze dopravovat pomocí šnekových dopravníků s minimální spotřebou energie (na rozdíl od štěpky). Uvedeného principu se využívá u automatických hořáků jimiž mohou být vybaveny stávající kotle určené pro spalování pevných paliv, nebo speciálně vyvinuté teplovodní kotle navržené pro dosažení optimálních parametrů spalování ve spojení s peletovým hořákem. Pokud je plamen předčasně vychlazen, například umístěním hořáku do kotle s nevhodným výměníkem tepla, dochází k vysokým emisím uhlovodíků a sazí, což se projevuje nízkou účinností spalování. Základní rozdělení hořáků dle způsobu dopravy paliva je uvedeno například v [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008] nebo [OBERNBERGER & THEK, 2010]

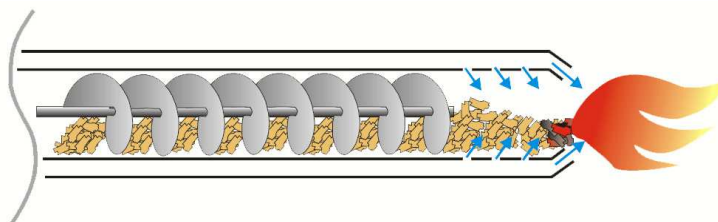
Hořák s horním přívodem paliva. (obr. 60) Palivo spadá do spalovacího prostoru tvořeného spalovací miskou (hrnec) shora gravitačně pomocí trubice usměrňující volný pád pelet. Uvedená konstrukce je jednoduchá, hořák je levný. Často se používá u interiérových topidel. Díky hrncovému tvaru hořáku nelze provádět automatické odpopelňování, hořák proto neumožňuje spalování pelet s vyšším obsahem popelovin, konstrukčně jednoduchý typ hořáku musí být periodicky odstaven a vzniklý popel ručně odstraněn. Přívod paliva shora má výhodu v přerušném přívodu paliva, což účinně zabraňuje jeho zpětnému prohoření. Existují sofistikované varianty tohoto hořáku s automatickým odpopelňováním.



Obr. 60 Hořák s horním přívodem paliva [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

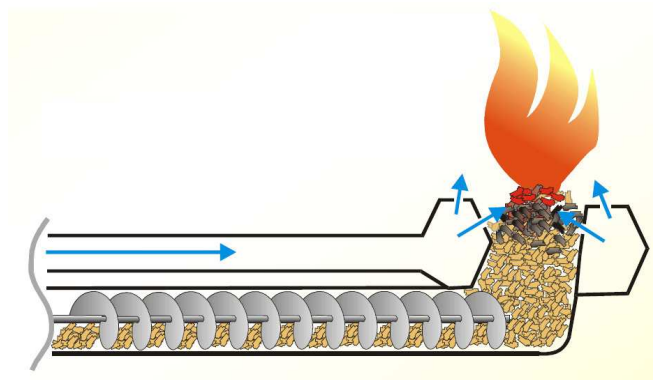
Hořák s horizontálním přívodem paliva (obr. 61) Na konci šnekového dopravníku je nejjednodušším způsobem realizována spalovací komora, jako přímé prodloužení koaxiálního pláště šnekového dopravníku. Ve spalovací komoře dochází k uvolňování prchavé hořlaviny, díky čemuž je geometricky jasně definována primární spalovací zóna. Uvolněná prchavá hořlavina pak hoří v následujících částech kotle. Hořák v základní verzi, bez dalších

konstrukčních úprav, umožňuje pouze spalování bílé pelety. U dokonalejších verzí hořáku lze spalovací komoru řešit jako rotační část, tím dochází k rozrušování natavených částí vznikajícího popela, což umožňuje spalovat méně kvalitní hnědou peletu či agropelety. Uvedené konstrukční řešení je však ekonomicky efektivní od 50 až 70 kW výkonu hořáku.



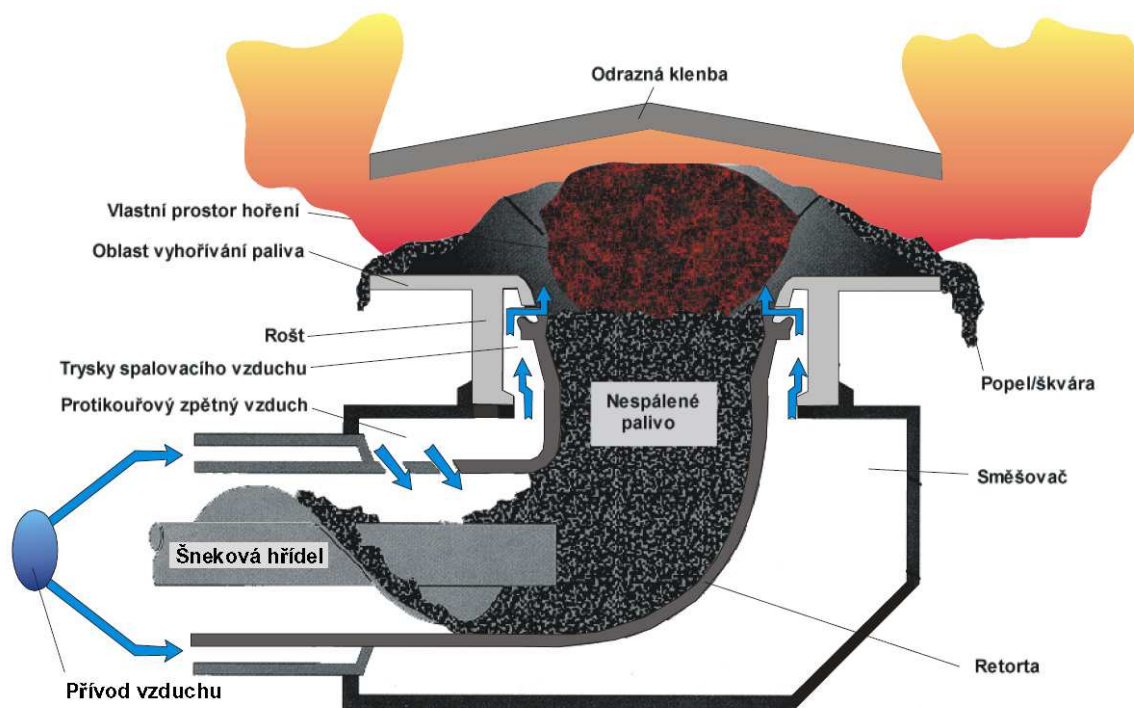
Obr. 61 Hořák s horizontálním přívodem paliva [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

Hořák se spodním přívodem paliva (obr. 62) Je také nazýván jako retortový hořák. Palivo je dopravováno horizontálně do spodní části retorty odkud je tlačeno vzhůru. Palivo se tak dostává středem do prostoru kde hoří. Současné konstrukce retortového hořáku vychází z původní konstrukce vyvinuté v šedesátých letech minulého století v Anglii pro spalování uhlí. Hořák umožňuje odpopelnění i při použití hnědých pelet či některých agropelet, a to bez použití pohyblivých komponent. Vyhořelé palivo je posunováno k okrajům hořáku pomocí další dávky paliva dopravované šnekovým dopravníkem, kde přepadává do popelníku. Retortový hořák je nejběžněji využíván v konstrukcích kotlů prodávaných na území ČR. Primární vzduch je do spalovací komory dopravován kolem vnější stěny retorty a proudí vzhůru do žhnoucí vrstvy. Sekundární vzduch je směřován do prostoru dohořivací komory.



Obr. 62 Hořák se spodním přívodem paliva [VAN LOO & KOPPEJAN, 2008]

Sjaak [Sjaak van Loo, 2008] uvádí, že k zajištění minimálních emisí je třeba udržet stabilní spalovací podmínky s minimální dobou nečinnosti hořáku, vyhnout se častému zapalování nebo činnosti v režimu se zapalovacím režimem hořáku. Mimo to lze obecně dosáhnout snížení emisí použitím elektrického zapalování místo zapalovacího režimu hořáku. Zapalovací režim hořáku je řešen útlumem na minimální výkon tak, aby byl udržen stáložárny režim. Elektrické zapalování je tvořeno horkovzdušným zapalovacím agregátem. Někteří výrobci v ČR již elektrické zapalování do svých kotlů doplnili, jiní ne. Dle ústních sdělení odborníků z druhé skupiny firem je elektrické zapalování pelet ekonomicky nevhodné z důvodu použití drahé elektrické energie. Za účelem ověření této hypotézy jsem provedl řadu testů jejichž výsledky uvádím v kapitole 7 „Automatické zapalování paliva“.



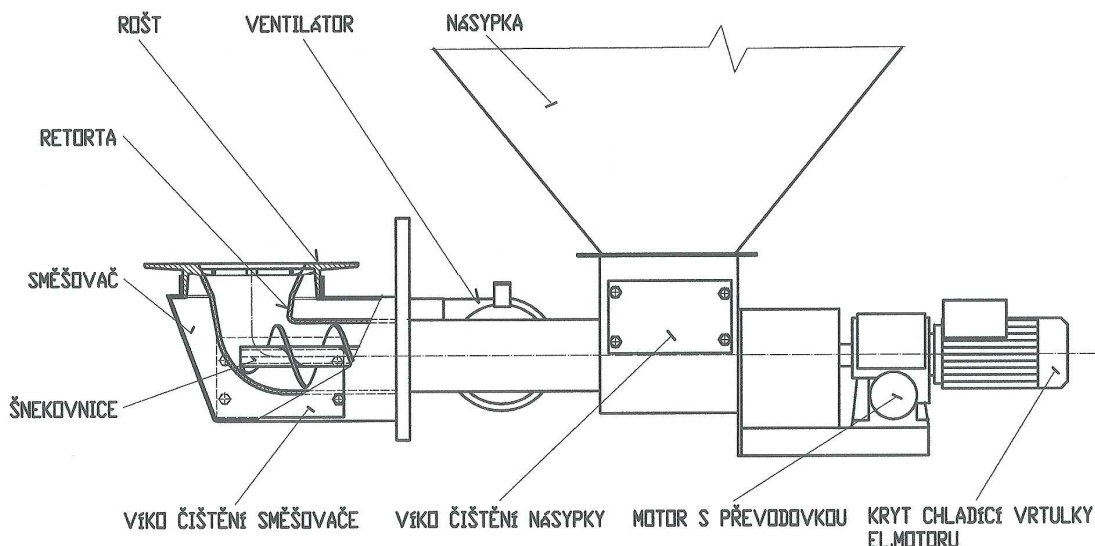
Obr. 63 Retortový hořák CRE [NOSKIEVIČ, 2004]

O tzv. retortový hořák jde, je-li oblouková tvarovka hořáku se spodním přívodem paliva tvořena materiálem, který umožňuje výrazné zahřívání paliva obsaženého uvnitř tak, aby docházelo k uvolňování prchavé hořlaviny. Retorta odolává vysokým teplotám a akumuluje teplo, takže vytváří příznivé prostředí pro dosušení a následné zplyňování paliva uvnitř retorty. K vyhrnování paliva z retorty musí docházet pomalu, v praxi tedy šnekový dopravník pracuje v cyklech, automatika hořáku reguluje požadovaný výkon změnou doby chodu šneku a doby prodlevy.

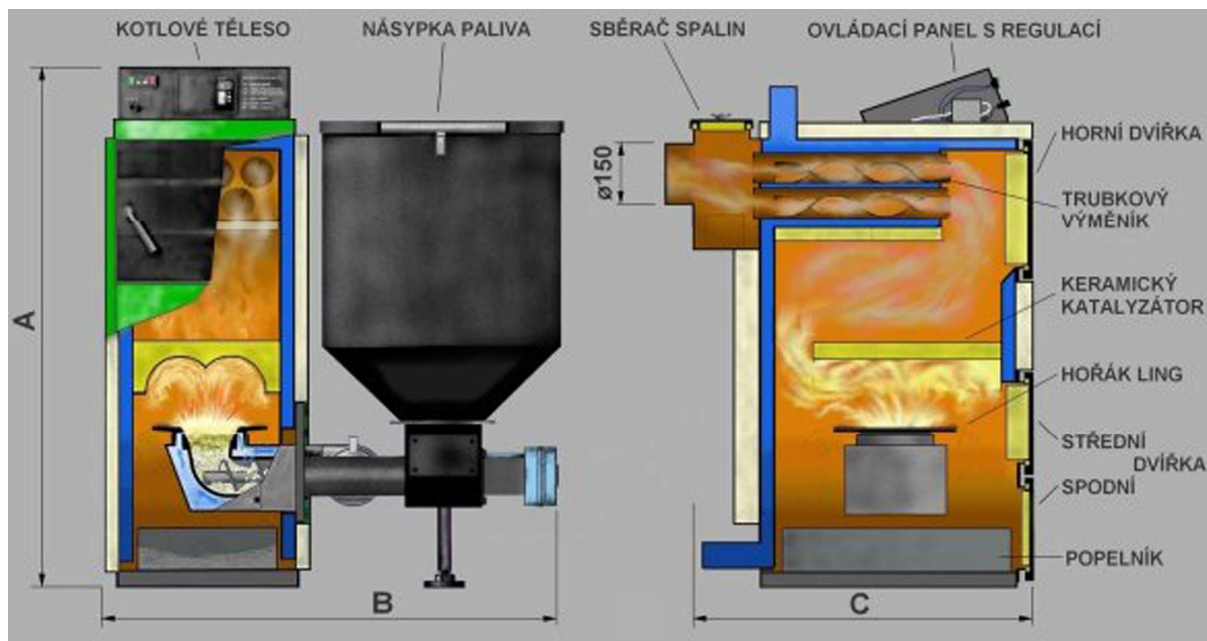
Automatické kotle s retortovým hořákem již byly masivně používány na počátku dvacátého století v Americe (původně Anglický patent), kde se v komunální sféře začalo prosazovat vytápění drobným tříděným a prachovým černým uhlím které bylo výrazně levnější než často využívaný koks. Z Ameriky se pak technologie rozšířila i v Evropě, především pak v Anglii. V ČR byl zkonstruován a zkoušen automatický kotel s retortou v letech 1960 až 1961. Kotel měl deseti článkový litinový výměník, jako retortové topeniště byl použit agregát firmy Hartley a Sugden včetně regulační jednotky, dovezený z Anglie [ŠTORKAN, 2000]. V roce 1962 byl však vývoj zastaven z důvodu masivního využívání topných olejů. Tento trend byl celosvětový a tak postupně došlo k zapomnění popsané technologie. Obrat nastal až v osmdesátých letech dvacátého století v souvislosti s rostoucí nestabilitou cen ropy a zemního plynu. V ČR obrat nastal až po revoluci. Nyní je retortový hořák nejběžnější součástí automatických kotlů vyráběných a používaných v ČR. Na rozdíl od původního Anglického hořáku firmy CRE Group Ltd. (obr. 63) spalujícího černé uhlí jsou u nás používané hořáky konstruovány pro spalování hnědého uhlí, pelet či štěpky. Uvedená paliva jsou dostupná na českém trhu, obsahují však výrazně vyšší podíl prchavé hořlaviny. Původní retortový hořák tak musel být upraven, k významným změnám muselo dojít i v konstrukci dohořívacího prostoru kotlů. Prvním sériově vyráběným retortovým kotlem na spalování hnědého uhlí a pelet v ČR byl kotel Ling 25, který byl certifikován na podzim roku 1999 [LYČKA, 2008]. V současnosti je v ČR prodáváno velké množství automatických teplovodních kotlů s retortovým hořákem, od různých výrobců, ve výkonovém rozpětí 15 až 45 kW. To svědčí o jejich dobrých technicko-ekonomických parametrech v dané kategorii. Dále popíši podrobněji

technická řešení automatického teplovodního kotle s retortovým hořákem spalujícího pelety a hnědé uhlí firmy Agromechanika Lhenice a automatický kotel na bílou peletu firmy Guntamatic (Rakousko). První kotel je typickým zástupcem dané kategorie v ČR, druhý kotel pak představuje technologickou špičku v oboru, ovšem téměř za trojnásobnou cenu. Oba kotle uvádím v níže uvedené ekonomické studii.

Automatický teplovodní kotel s retortovým hořákem Agromechanika Lhenice řady AM.



Obr. 64 Sestava retortového hořáku Ling [LYČKA, 2008]



Obr. 65 Řez kotlem Agromechanika Lhenice řady AM s retortovým hořákem Ling Krnov

Odrázná klenba původního hořáku (obr. 63) je u kotlů spalujících paliva s vysokým podílem prchavé hořlaviny nahrazena keramickým katalyzátorem ze speciálního žárobetonu (obr. 65). Vzdálenost mezi katalyzátorem a dohořivací částí roštu je výrazně větší. Keramický katalyzátor tvoří stříška, která přehrazuje prostor nad hořákem v celém jeho půdorysu. Je umístěna v takové výšce, aby se plamen vycházející z hořící vrstvy odrazil zpět nad dohořivací část roštu. Nad hořákem je tedy vytvořen dohořivací prostor, ve kterém je díky schopnosti katalyzátoru akumulovat velké množství tepla udržována v celém průběhu hoření

vysoká teplota. Veškerý spalovací vzduch je vháněn tryskami do hořící vrstvy. Ta část spalovacího vzduchu, která není využita při procesu primárního hoření, se již značně přehřátá dostává do dohořivacího prostoru, kde se po smísení s plamenem odraženým od katalyzátoru účastní sekundárního dohořívání spalitelných plynů. Část paliva, která nestačila vyhořet v hořící vrstvě, je vytlačována novým palivem na okraje kruhového roštu, kde přichází do kontaktu s odraženým plamenem a dále dohořívá. Díky rotaci plamene nad hořákem se z něj odděluje značná část pevných úletů. Plamen je pak štěrbinou umístěnou v zadní části katalyzátoru směřován do další sekce dohořivací komory a poté do výměníku tepla. Tato koncepce umožňuje zdržení dlouhého plamene prchavé hořlaviny dostatečnou dobu v prostoru vysokých teplot bez nutnosti velkých objemů dohořivacího prostoru.

Hořák je doplněn malým integrovaným zásobníkem pelet, který umožňuje pouze několikadenní provoz. Zásobník lze doplňovat manuálně, nebo automaticky ze sezónního zásobníku šnekovým dopravníkem nebo pneumaticky. Šnekový dopravník vyžaduje přímé propojení s kotelnou (nejlépe vedlejší místnost) a je méně hlučný. Pneumatická doprava umožňuje variabilnější umístění sezónního skladu paliva od kotelny, dosahuje vyšší hlučnosti při provozu, běží ale kratší dobu (5 až 10 minut denně), má menší spotřebu energie.

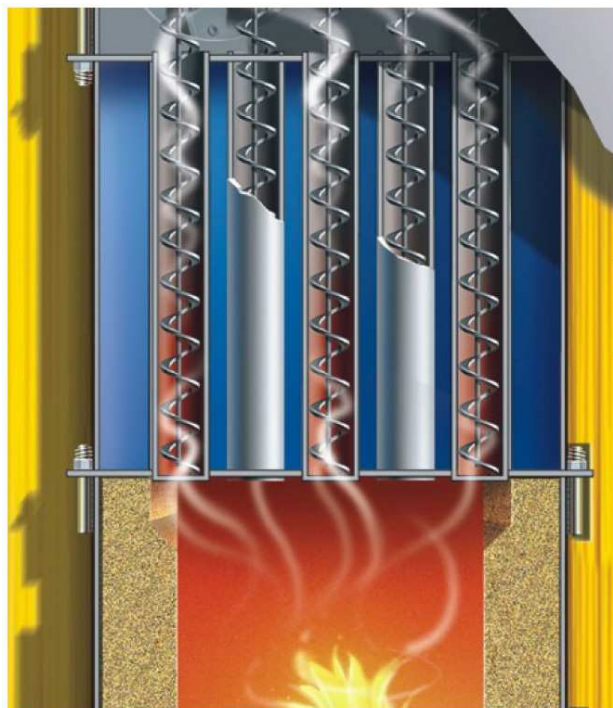
Automatický teplovodní kotel Guntamatic řady Biostar.



Obr. 66 Hořák Guntamatic Biostar [GUNTAMATIC, 2008]

Kotel je vybaven hořákem (obr. 66) s horním přívodem paliva. Hořák je integrován do spalovací komory a tvoří tak jeden celek. Spalovací komora je rozdělena na dvě části. V malé „komůrce“ dochází k vlastnímu spalování pelet na roštu. Pod rošt je přiváděn pouze primární vzduch, ve spalovací komůrce tak dochází k tvorbě dřevoplynu, který se přes trysku ve tvaru dutého toroidního prstence dostává do prostoru sekundární spalovací komory. Při průchodu dřevoplynu toroidním prstencem dochází ke smíchání se sekundárním vzduchem, který je přiváděn tangenciálně vyústěnými tryskami uvnitř toroidu. Směs paliva a vzduchu se tak intenzivně směšuje, což následně vede k dokonalému vyhoření prchavé hořlaviny. Celý prostor sekundární spalovací komory je vyložen žáru odolnou keramikou, která plní funkci

katalyzátoru hoření (udržuje vysokou teplotu zabráněním ochlazování plamene). Spalinami unášený popílek padá na rošt v minimálním množství díky vhodné geometrii spalovacích komor. To zlepšuje kvalitu spalování. Dokonale vyhořené spaliny předávají teplo až v prostoru nad keramickým katalyzátorem, kde je umístěn výměník tepla spaliny – voda (obr. 67). Výměník tepla má minimalizovaný vodní objem, což vede k rychlejšímu zahřátí výměníku při studeném startu kotle (eliminace nízkoteplotní koroze). Jde o nízkoteplotní kotel, který lze provozovat plynule v rozsahu teplot 38 až 80 °C. Není zde tedy nutné zapojení trojcestného ventilu zabraňujícímu nízkoteplotní korozi kotle (obr. 69). Uvnitř trubek tvořících spalinové cesty výměníku tepla jsou umístěny turbulátory sloužící k zvýšení přestupu tepla ze spalin do vody. Spalinové cesty jsou automaticky čištěny pomocí servomechanismu, který vybavuje vertikální pohyb turbulátorů. Turbulátory tak mají dvojí funkci, přičemž obě slouží ke zlepšení sdílení tepla výměníkem a tak minimalizují komínovou ztrátu. Rošt primární spalovací „komůrky“ je rovněž automaticky čištěn servomechanismem tak, že se v určitém intervalu sklopí směrem do popelníku a do otvorů roštu se zasunou čistící hřebce. Po navrácení roštu do původní polohy je nadávkováno malé množství pelet ze zásobníku a horkovzdušně automaticky zapáleno. Vzhledem k dokonalému spalování a použití výhradně bílých pelet vzniká malé množství popela, které obsluha vynáší jen několikrát za sezónu. I to lze vylepšit automatickým pneumatickým odpopelňováním. Kotel lze ovládat dálkově pomocí GSM brány pomocí mobilního telefonu. Tato technologie je z hlediska komfortu obsluhy naprosto srovnatelná se spalováním zemního plynu.



Obr. 67 Výměník tepla kotle Guntamatic Biostar [GUNTAMATIC, 2013]

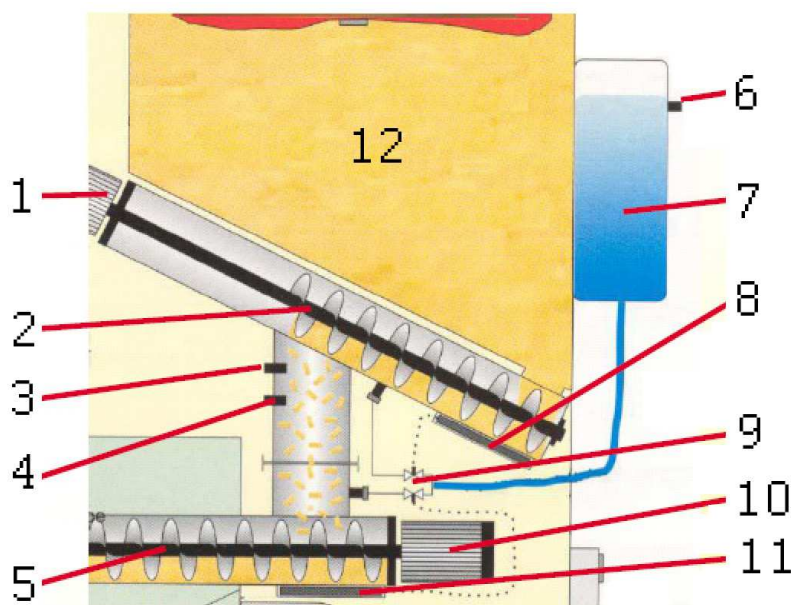
6.1.1.2 Automatický kotel na štěpku.

Principiálně má podobná řešení hořáku jako u hořáku s horizontálním či spodním přívodem pelet. S ohledem na různorodé vlastnosti štěpek, především tvar, jsou hořáky rozměrnější a dopravníkové cesty robustnější. Výsledkem jsou větší příkony instalovaných elektromotorů a vyšší výkony hořáků. Automaty spalující štěpku se tak používají až od výkonů nad 25 kW. Díky až 5x nižšímu energetickému obsahu štěpky na jednotku objemu ve srovnání s bílou

peletou je použití limitováno potřebou velkých skladovacích prostorů. Vzhledem k vyšší vlhkosti štěpky ve srovnání s peletou je nebezpečí biologické degradace paliva a výskytu plísní, jež mohou mít vliv na zdravotní stav obsluhy. Štěpku proto není vhodné vyrábět více než měsíc dopředu. Literatura dokládá úbytek hmoty dlouhodobě skladované štěpky v množství 2 až 5% za měsíc [SIMANOV, 1995]. Výskyt plísní souvisí s vyšší vodní aktivitou biomasy [ŠTENCL et al., 2010]. Této problematice je věnováno více informací v kapitole 5.1 „Vlastnosti tuhých biopaliv – obsah vody“. Použití štěpky pro vytápění rodinných domů je tedy z výše uvedených důvodů problematické a lze se s ním setkat pouze ojediněle.

6.1.1.2.3 Pomocné technologie automatických kotlů

Celoroční zásobník paliva se z požárně bezpečnostních důvodů musí nacházet v jiné místnosti než je kotel, za požár dělící stěnou s minimální požární odolností stěny F90 a dveří T30. Technologický prostup stěny v podobě dopravníku paliva musí být rovněž vybaven požár dělící konstrukcí v podobě klapky, šoupátka či turniketu.



Obr. 68 Hasící zařízení. 1 a 10 – elektromotory šnekových dopravníků, 2 – hřídel vyhrnovacího šnekového dopravníku, 3 – snímač hladiny paliva v gravitační šachtě, 4 – termočlánek gravitační šachty, 5 – hřídel šnekového dopravníku hořáku, 6 – snímač hladiny vody, 7 – nádržka s hasící vodou (objem 10 l), 8 - teplotní snímač ochrany zpětného prohoření zásobníku, 9 – ventily, 11 - teplotní snímač ochrany zpětného prohoření hořáku, 12 zásobník paliva

Přímo u kotle je zásobník tvořící technologickou zásobu paliva pro provoz kotle na několik dní (obr. 68). Z tohoto zásobníku je palivo vyhrnovacím šnekovým dopravníkem (2) dávkováno do gravitační šachty, kde tvoří velmi malou zásobu paliva. Vhodná velikost zásoby pelet v šachtě je řízena snímačem hladiny paliva (3), který ovládá elektromotor vyhrnovacího šnekového dopravníku (1). Palivo je ze šachty už přímo odebíráno šnekovým dopravníkem hořáku (5). Výkon hořáku je moderován cyklováním jeho šnekového dopravníku (doba pomalého otáčení střídá dobu v klidu). V případě hořáku s horizontálním nebo spodním přívodem paliva je reálné nebezpečí prohoření paliva z prostoru spalovací komory až do zásobníku v době nečinnosti dopravníku. Minimalizace tohoto rizika je řešena vlastními konstrukčními úpravami hořáku. Jestliže přesto k této situaci dojde, zvýší se teplota v oblasti teplotních snímačů (8, 11), které vybaví příslušný ventil (9) a dojde k zaplavení ložiska požáru vodou. Tato činnost je nezávislá na dodávce elektrického proudu, snímače (8 a 11) jsou s ventily (9) propojeny kapilárou. Systém je naplněn parokapalinovou směsí,

kteřá při zahřátí zvýší tlak na kuželku ventilu a ten se otevře. Kotel je pak odstaven z činnosti, u technologií s vysokým stupněm automatizace může být tato informace zaslána formou SMS přes GSM bránu majiteli či obsluze.

6.1.1.3 Ostatní zdroje tepla spalující tuhá biopaliva

Do této kategorie lze zahrnout především různé konstrukce křbových vložek, křbových a kachlových kamen s výkony typicky pod 15 kW. V těchto zdrojích lze, dle různé konstrukce, spalovat jak kusová, tak sypká tuhá biopaliva. Jde však o zdroje, které zásobují teplem jednu či několik místností, obvykle nikoliv celý dům či byt. Komfort obsluhy, regulovatelnost a emisní parametry těchto zdrojů jsou různé, díky velmi rozdílné technické úrovni výrobku. Za zmínku stojí především kategorie kachlových kamen, především pak těžkých kachlových kamen s velkou akumulací, které výše uvedené parametry splňují. Kachlová kamna se vyznačují vysokou účinností a nízkými emisemi, což potvrzují výsledky měření, které uskutečnil Testovací a výzkumný ústav Hafner Rakouského kachlářského svazu v topné sezóně 1999/2000 [KOLONIČNÝ et al., 2009]. Dalším zajímavým zdrojem tepla jsou špičkové interiérové kotle s výměníkem tepla a se sníženým podílem sdílení tepla do instalované místnosti Verner 13/10 a vylepšená verze Verner 13/10.2 [VERNER, 2011]. U těchto zdrojů je výrazně zvýšen výkon odevzdávaný do vody proti výkonu odevzdávaného přímo do instalované místnosti. U většiny běžných interiérových kotlů a křbových kamen s výměníkem tepla na trhu (2010) je tento poměr 1:1 až 3:1 (místnost:voda), což naprosto nerespektuje poměr tepelných ztrát jednotlivých místností.

Vzhledem k rozsahu této práce se však uvedenými zdroji, i přes jejich zajímavost, nebudu zabývat.

6.1.1.4 Zapojení kotlů do okruhu otopné soustavy

6.1.1.4.1 Základní zapojení kotle

Na obrázku 69 je znázorněno základní zapojení kotle na tuhá biopaliva. Jde o v praxi často používanou, technicky minimalizovanou a investičně nenáročnou alternativu zapojení. Kotel je zde prakticky přímo připojen na otopnou soustavu s nuceným oběhem. Další příslušenství (pozice 2 až 7) jsou nezbytnou součástí kotle, a to z důvodu bezpečnosti provozu a nebo z důvodu ochrany výměníku kotle před předčasným znehodnocením. O jednotlivých součástech se nyní ve stručnosti zmíním.

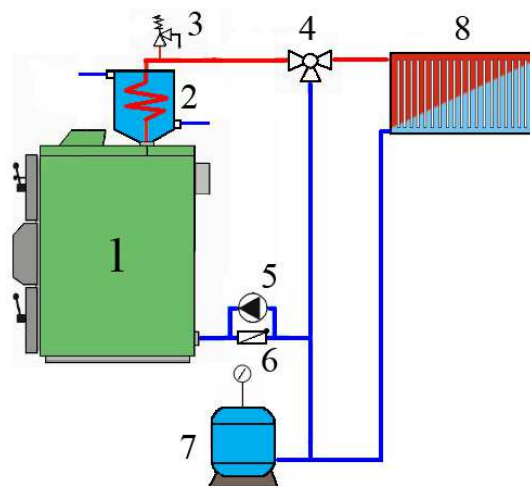
Ochlazovací smyčka kotle (2) slouží k vychlazení kotle až do doby vyhoření paliva v případě poruchy čerpadla teplovodního okruhu kotle (5) nebo při uzavření termostatických hlavic na otopných tělesech. Pokud kotel není vybaven ochlazovací smyčkou, hrozí nebezpečné zvýšení tlaku v otopné soustavě vedoucí až k možnému destruktivnímu poškození kotlového výměníku. Nezbytnou součástí je však samotížný cirkulační okruh přes zpětnou klapku (6). Technicky je ochlazovací smyčka řešena jako výměník tepla, podobně jako na obrázku 69. Další možností technického řešení je samostatný ochlazovací kotlový výměník integrovaný do vlastního kotlového tělesa. Takové řešení má samostatný hydraulický okruh a není nutná podmínka samotížné cirkulace vodní náplně kotle. Obě řešení ale vyžadují připojení na zdroj tlakové studené vody a na kanalizaci. Spuštění průtoku studené vody je ovládáno termoventilem. Konceptně zcela jinou možností je zapojení jednoho otopného tělesa dostatečného výkonu samotížně, mimo větve čerpadla. Tato možnost je mnohými topenáři velice oblíbená.

Pojišťovací tlakový ventil (3) zabraňuje nadměrnému zvýšení tlaku v kotli svým otevřením. Je nebezpečné se domnívat, že nová povinnost zapojovat ochlazovací smyčku do okruhu kotle

zbavuje topenáře povinnosti instalovat pojišťovací ventil! V případě odstávky zdroje tlakové vody či poruchy na vlastním okruhu ochlazovací smyčky není kotel chráněn proti zvýšeným tlakům v soustavě jinak než pojišťovacím ventilem.

Expanzní nádoba (7) vyrovnává objemové změny teplotnosného média při různých teplotách. Tím nedochází ke vzniku tlakových pulsů, které by negativně ovlivňovaly chování regulačních prvků otopné soustavy. Její objem je přímo úměrný celkovému objemu otopné soustavy.

Trojcestný ventil (4) slouží jako ochrana výměníku kotle před nízkoteplotní korozí. Při roztápění uzavírá malý kotlový okruh tak, aby bylo dosaženo v co nejkratším čase požadované nejnižší teploty na povrchu kotlového výměníku, která je bezpečně nad rosným bodem spalin. Po zahřátí malého kotlového okruhu je postupně otevírán velký okruh přes otopnou soustavu. Bezpečná teplota je definována na základě teploty vody vracející se do kotle, kde je také umístěno čidlo trojcestného ventilu. Za bezpečnou teplotu je obecně považována teplota 55 až 65 °C.



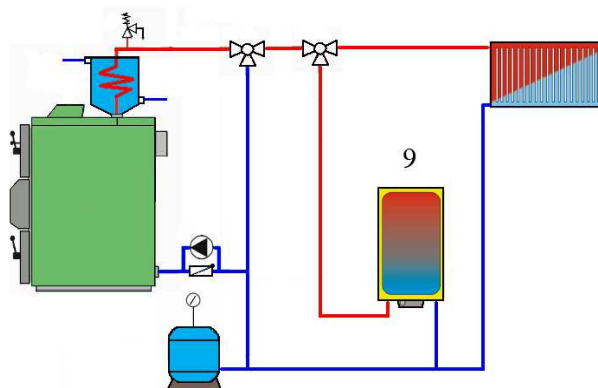
Obr. 69 Základní zapojení kotle na kusové dříví. 1 – kotel na dříví, 2 – ochlazovací smyčka, 3 – pojišťovací ventil, 4 – trojcestný ventil, 5 – čerpadlo, 6 – zpětná klapka, 7 – expanzní nádoba, 8 – otopná soustava (tělesa)

V mnohých starších domech se setkáváme se samotížnou otopnou soustavou s otevřenou expanzní nádobou. Tato soustava je však již technicky zastaralá a v moderních stavbách či při rozsáhlejších rekonstrukcích ji nelze doporučit. Důvodem je nutnost potrubí velkých dimenzí, obvykle viditelně umístěných, velký vodní obsah, špatná regulovatelnost, nižší životnost rozvodů díky většímu nebezpečí koroze, vyšší teploty v soustavě, celkově pak i vyšší pořizovací náklady kompletně nové instalace. V případě připojení nového kotle na stávající samotížnou soustavu s otevřenou expanzní nádobou odpadá nutnost instalace ochlazovací smyčky a pojistného ventilu.

6.1.1.4.2 Zapojení kotle s přípravou teplé vody

Při využívání kotle na tuhá biopaliva jako primárního zdroje je ekonomicky výhodné tímto způsobem také ohřívat teplou vodu. Jednou z možností zapojení zásobníku teplé vody do okruhu kotle je znázorněno na obrázku 70. Mimo vlastní zásobník je zde instalován trojcestný ventil, který v případě nízké teploty vody v zásobníku uzavře přívod do otopné soustavy a veškerý výkon kotle je pak přeměřován do zásobníku. Po dosažení požadované teploty v zásobníku (50 až 60 °C) dojde k přestavení trojcestného ventilu do původní polohy. Tento ventil není regulační, přepíná pouze plný průtok do dvou směrů. Doba natápění akumulací

nádrže je závislá na jejím objemu a na výkonu kotle, obvykle dosahuje 20 minut až jedné hodiny.

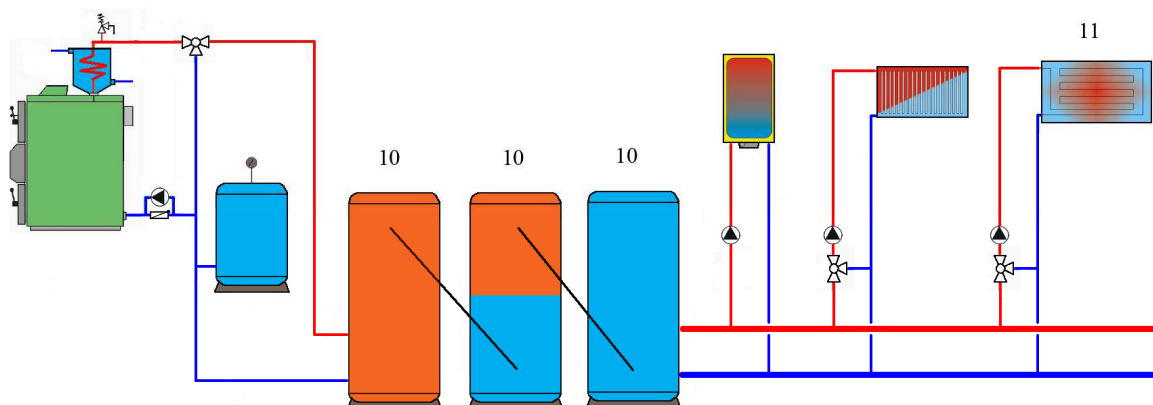


Obr. 70 Zapojení zásobníku TV do okruhu kotle. 9 – zásobník teplé vody

6.1.1.4.3 Zapojení kotle s akumulčním zásobníkem

Z důvodu vyššího komfortu obsluhy, dobré regulovatelnosti, použití v objektech s nízkou tepelnou ztrátou, zvýšení životnosti kotle a nízkých emisí se doporučuje zapojovat kotle na tuhá biopaliva v součinnosti s akumulční nádrží. Problematika akumulace je podrobně rozebrána v kapitole 6.2.1 „Návrh zdroje tepla s akumulčním zásobníkem“. Zde uvádím pouze základní schéma zapojení (obr. 71).

Objem nádrží je závislý na výkonu a typu kotle, tepelné ztrátě objektu, počtu požadovaných zátopů. Z hlediska typu kotle má největší nároky na objem nádrží zdroj se špatnou regulovatelností výkonu.



Obr. 71 Kotel na kusové dříví v součinnosti s akumulčními zásobníkem
10 – akumulční nádrže, 11 – podlahová soustava

Na straně spotřeby je znázorněna možnost přípravy topné vody o různých teplotách za použití trojcestných směšovacích ventilů. To umožňuje použití podlahové otopné soustavy (11) jako doplňku k deskovým otopným tělesům za předpokladu nezávislého řízení výkonu každé větve. Příprava teplé vody je řešena v nepřímě ohřívaném akumulčním zásobníku připojeném přes samostatné čerpadlo. Toto zapojení zásobníku TV proti verzi na obrázku 70 je tlakově nezávislé na ostatních částech OS. Délka připojovacího potrubí (a jeho hydraulická ztráta) může být proto mnohem větší. To umožňuje optimální umístění zásobníku TV i

v rozsáhlejších objektech. Zásobník TV by měl být umístěn co nejbližší velkým spotřebičům teplé vody, jako jsou sprchy a vany v koupelně, případně dřez v kuchyních z důvodu úspory pitné vody. V případě požadavku ohřevu vody v zásobníku je čerpadlo v chodu, jinak se netočí a představuje dostatečný hydraulický odpor zabraňující proudění topné vody.

Varianta na obrázku 71, doplněná bivalentním zdrojem tepla je nejdokonalejším řešením umožňující vysoký komfort obsluhy. Technicky nejsnadnější a investičně nejlevnější volba bivalentního zdroje tepla je doplnění elektrických topných patron do prostoru akumulčních zásobníků. Další zvýšení komfortu obsluhy až na plně bezobslužný provoz je možno pouze za předpokladu kontinuálního přísunu paliva do kotle.

Pro všechny zdroje tepla je zásadním parametrem regulovatelnost a vliv kvality paliva na provozní parametry. Jde o parametry mající zásadní vliv na komfort obsluhy, životnost technologie, ekologii a ekonomiku provozu. Vliv kvality paliva je rozebrán v kapitole 5 „Vlastnosti tuhých biopaliv“. Dále provedu analýzu regulovatelnosti výkonu.

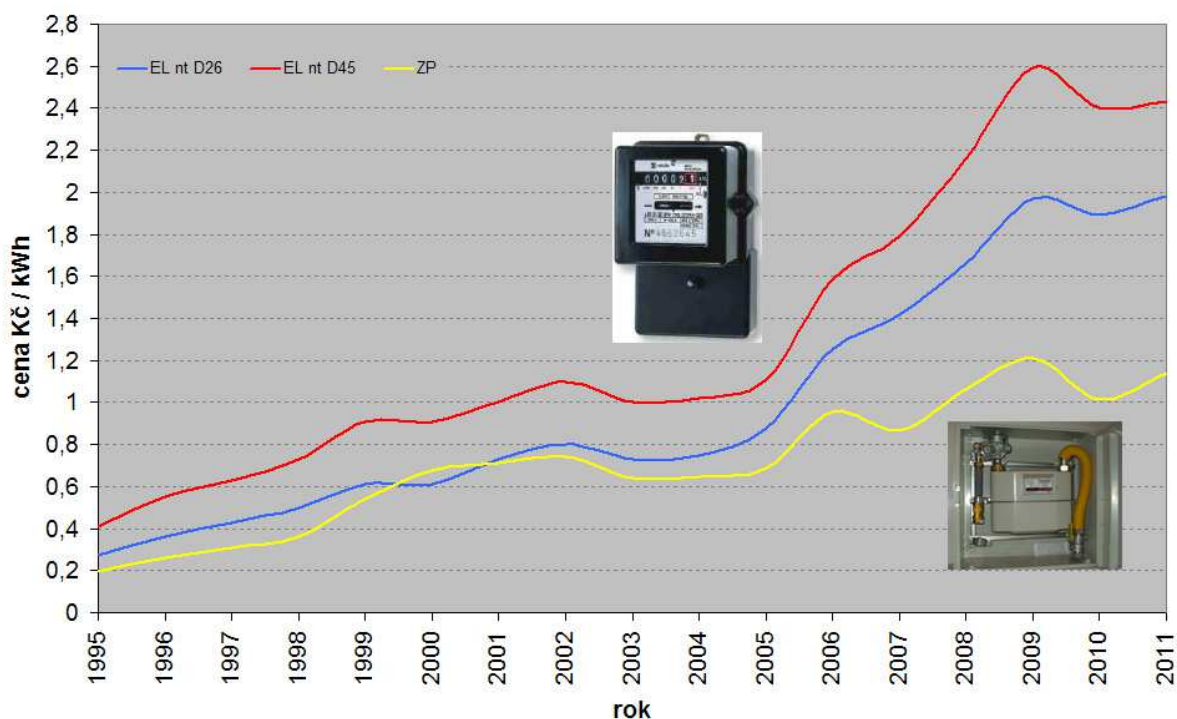
6.1.1.5 Emisní limity pro kotle spalující tuhá paliva

Všechny uvedené automatické kotle se vyznačují vynikajícími emisními limity, jejich emise škodlivin jsou až několikanásobně nižší než limity stanovené třetí emisní třídou dle [ČSN EN 303-5:2000]. Tyto zdroje tepla se v ČR prosazují teprve v posledních letech. Naproti tomu dnes nejběžněji používanou kategorii tvoří kotle na kusové dříví spalující palivo na principu odhořívání či prohořívání. Takové kotle běžně splňují pouze první či druhou emisní třídu dle výše zmiňované normy. Významnou změnou v této oblasti je platnost nového zákona o ochraně ovzduší [ZÁKON č. 201/2012 Sb]. Od 1.1.2014 nabývá účinnosti část I, příloha 10: „Minimální emisní požadavky na spalovací stacionární zdroje o jmenovitém tepelném příkonu 300 kW a nižším, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění, pro účely uvádění výrobků na trh“. S tím souvisí nahrazení původní normy: „Kotle pro ústřední vytápění. Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém výkonu nejvýše 300 kW. Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.“ [ČSN EN 303-5:2000], současně platnou normou: „Kotle pro ústřední vytápění. Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém výkonu nejvýše 500 kW. Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.“ [ČSN EN 303-5:2013]. Kotle emisní třídy 1 a 2 podle původní normy není možné na trhu ČR prodávat (od 1.1.2014). V nové normě je původní emisní třída 3 doplněna nově definovanou třídou 4 a 5 s vyššími požadavky na emise CO, OGC a prach. Současná nabídka (prosinec 2013) výrobců kotlů spalujících tuhá biopaliva splňuje v převážné většině emisní třídu 3, u mnohých výrobců i třídu 4. Technika splňující emisní třídu 5 je zatím výjimka.

V praxi to znamená, že kotle spalující tuhá biopaliva na principu odhořívání či prohořívání budou postupně nahrazovány kotli pyrolytickými, kterých je v současných domácnostech menšina. Automatické kotle představují z hlediska ochrany ovzduší ještě lepší variantu než pyrolytické kotle.

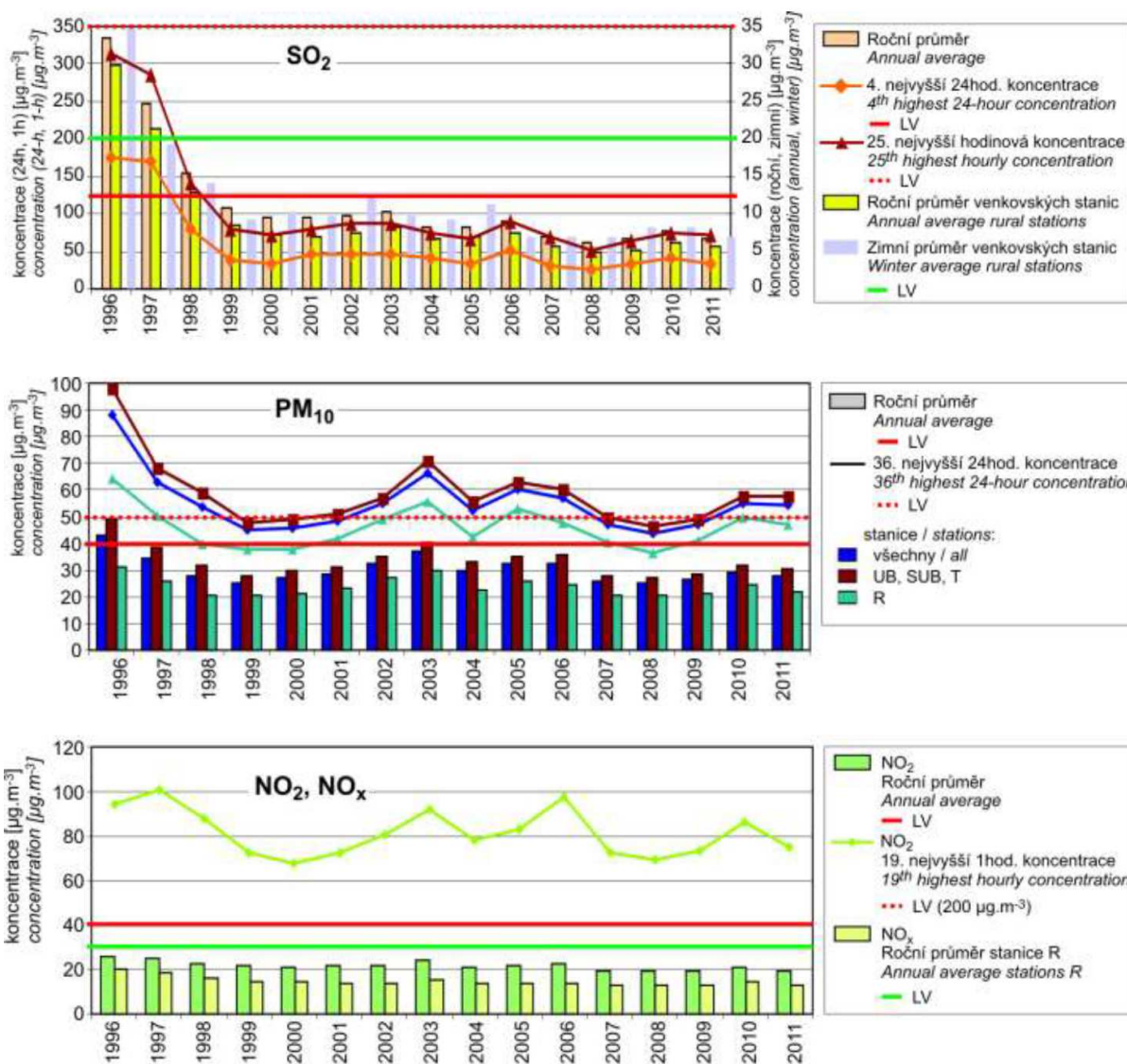
6.1.2 Paliva a energie

Cena paliva zásadním způsobem ovlivňuje jeho využívání. Na obr. 72 uvádím přehled vývoje cen energií konkurujícím tuhým palivům. Využití zemního plynu díky masivní plynofikaci území ČR a dlouhodobě přijatelným provozním i investičním nákladům při zachování velmi vysokého komfortu obsluhy je velmi běžné. Tuto alternativu považují za největšího konkurenta moderního způsobu využívání tuhých biopaliv. Nízký tarif sazby D26 elektrické energie je využíván v případě akumulárního vytápění objektu (osmihodinová akumulární sazba pro vyšší využití energie). Typickým způsobem vytápění byly až do roku 2005 často realizované rekonstrukce s akumulací do vody. U novostaveb bylo velmi časté využití vlastní masivní konstrukce stavby v podobě podlahového či stěnového vytápění s elektrickými topnými kabely. Nízký tarif sazby D45 je využíván u elektrických přímotopů. Jejich výhodou je ve velmi nízkých investičních nákladech, snadné instalaci a výborné regulovatelnosti.



Obr. 72 Vývoj cen zemního plynu a elektrické energie. Sledováno na jižní Moravě.
(sazba D45 – dříve BP, sazba D26 – dříve BV)

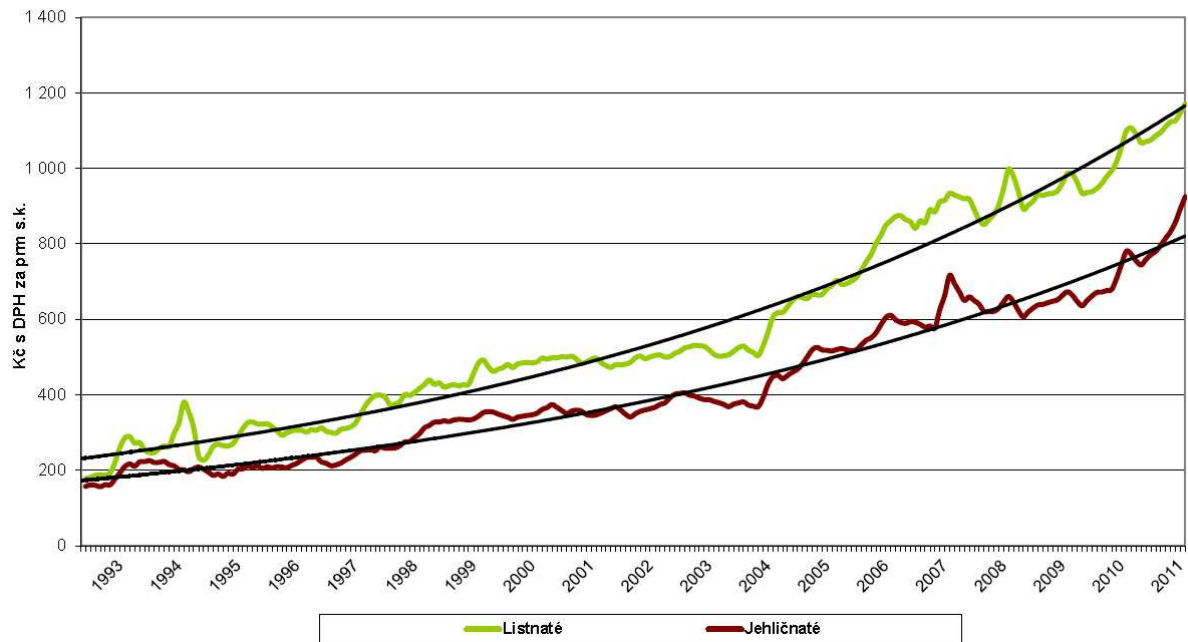
Z obrázku je patrné větší zdražování v období 1995 až 2000 a pak větší míra zdražování v období 2005 až 2009. Uvedený trend má za následek masivní orientaci obyvatelstva na levnější zdroje energie jako je uhlí a dřevo. Bohužel většina v současnosti instalovaných zdrojů spalujících tuhá paliva je koncepčně zastaralá, což se projevuje vysokým stupněm emisí. V 90. letech 20. století došlo v České republice k poklesu znečištění ovzduší řadou látek (SO_2 , prашnými částicemi PM_{10} , NO_x). Na přelomu tisíciletí však došlo k zastavení klesajícího trendu a do roku 2003 koncentrace uvedených znečišťujících látek naopak vzrostly, v případě oxidu siřičitého však jen velmi mírně. V roce 2004, který byl velmi příznivý, pokud hodnotíme rozptylové podmínky, byl zaznamenán pokles koncentrací těchto látek, ale poté byl opět obnoven vzrůstající trend. Uvedené závisí zejména na množství emisí z dopravy a lokálních topenišť a samozřejmě na aktuálních rozptylových podmínkách. Např. v roce 2003 byla situace pro rozptyl nepříznivá, proto si můžeme povšimnout vysokých koncentrací znečišťujících látek v grafu na obr. 73 [MATOUŠKOVÁ, 2012].



Obr. 73 Vývoj koncentrací SO₂, PM₁₀ a NO_x v letech 1996 až 2011 [MATOUŠKOVÁ, 2012]

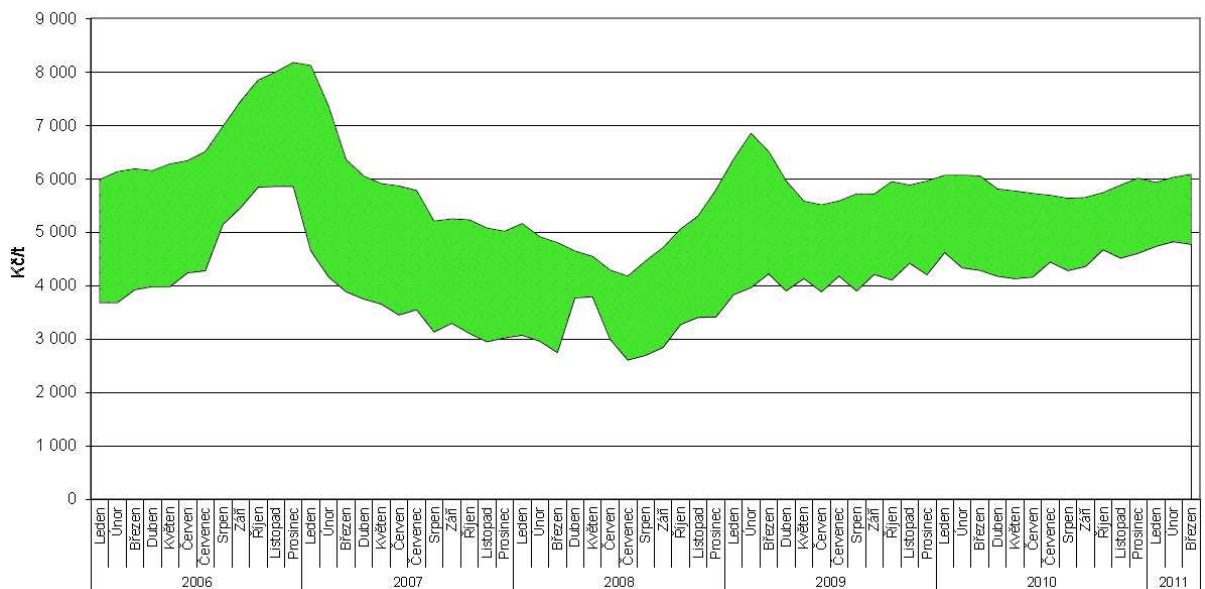
Vývoj cen palivového dříví je znázorněn na obr. 74. Pouhým pohledem na grafy obr.72 a obr.74 lze konstatovat, že cena palivového dříví má podobný vývoj jako cena elektrické energie. Důvodem je pravděpodobně velký zájem o toto palivo daný zvyšováním cen zemního plynu a propagací spalování biomasy v médiích. Obrázek 75 znázorňuje odhad vývoje cen dřevěných pelet. Pelety vykazují stabilnější ceny ve srovnání s cenou kusového dříví.

Odhad vývoje ceny palivového dříví - konečné ceny metrové štěpiny
(Kč/prm s.k. s DPH; data ČSÚ, dopočet MPO na index DŘEVOPAL 12/2010)



Obr. 74 Odhad vývoje ceny palivového dříví [BUFKA, 2011]

Orientační odhad tuzemských cen dřevěných pelet (Kč/t včetně DPH)
Horní hranice: průměrné ceny dodávky v Německu přepočtené na Kč a české DPH
Dolní hranice: průměrné tuzemské vývozní ceny povýšených o aktuální výši DPH



Obr. 75. Orientační odhad tuzemských cen dřevěných pelet [BUFKA, 2011]

6.2 Materiál a metodika

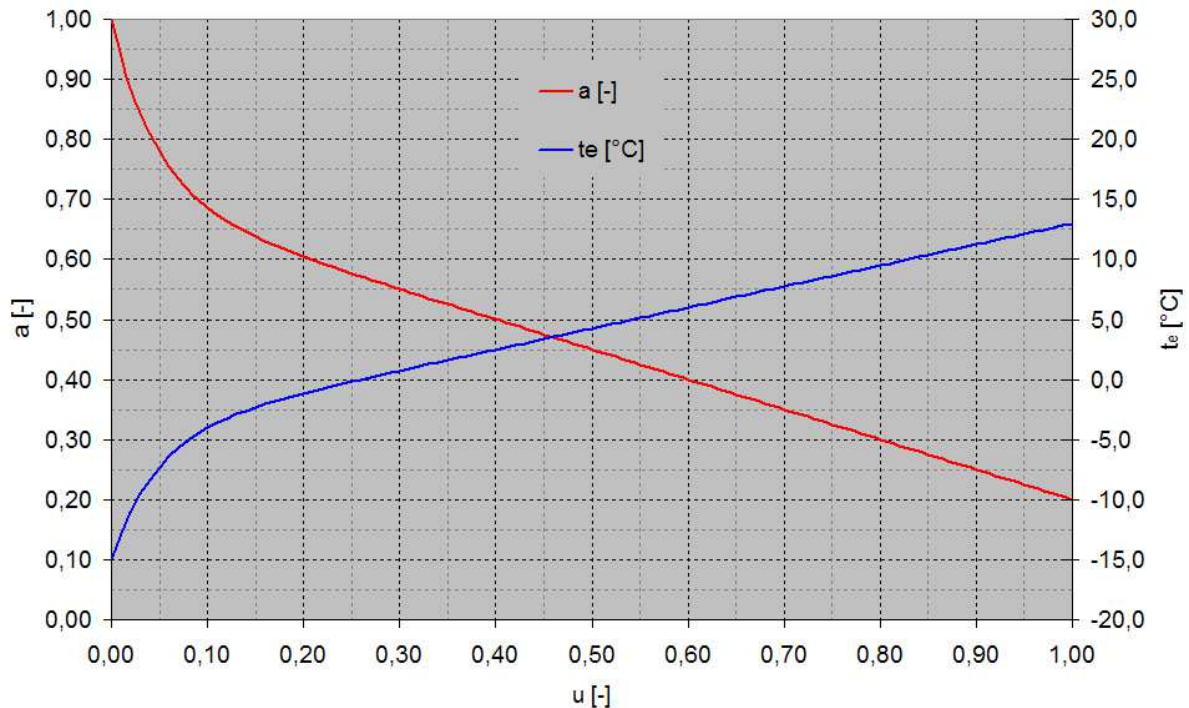
6.2.1 Návrh zdroje tepla s akumulacním zásobníkem

Důvody, vedoucí k zapojování akumulacních zásobníků popíšu na konkrétním případě domu ve střední klimatické oblasti ČR, na příkladě pro Blansko. Začátek a konec otopné sezóny definujeme pro exteriérovou teplotu 13 °C (obvyklá hodnota pro zděné stavby). Na základě toho lze sestavit graf na obr.76, který znázorňuje poměrnou dobu trvání exteriérových teplot t_e během otopné sezóny (modrá křivka). Z grafu lze například odečíst, že podnulové teploty trvají jen 27% z celkové doby takto definované otopné sezóny. Vzhledem k tomu, že tepelná ztráta objektu za stacionárních podmínek sdílení tepla je dána především venkovní teplotou (rovnice 18, součinitelé tepelné ztráty a vnitřní teplota jsou pro danou stavbu konstantní), lze graf doplnit o červenou křivku poměrné tepelné ztráty, která musí být kryta použitým zdrojem tepla. Tepelná ztráta se dělí na tepelnou ztrátu prostupem, která je dána sdílením tepla přes stavební konstrukce a tepelnou ztrátu větráním způsobenou teplem dodaným přiváděnému čerstvému vzduchu do objektu. Používání součinitelů tepelné ztráty (H , viz rovnice 18) je v českých výpočtech nové díky zavedení normy [ČSN EN 12831:2005], která s platností od 1.9.2008 nahrazuje původní v praxi často používanou normu [ČSN 060210:1994]. Porovnání obou metodik výpočtu je zpracováno Ryšavým v [RYŠAVÝ, 2006a] a [RYŠAVÝ, 2006b]. Součinitelé tepelné ztráty (H) umožňují jednoduchý přepočítání tepelné ztráty projektované stavby do jiné klimatické oblasti. Z křivky $a=f(u)$ na obr. 76 lze například zjistit, že po dobu více než 85 % otopné sezóny vystačíme se 2/3 celkového výkonu zdroje.

$$\Phi = \Phi_T + \Phi_V; \quad \Phi_T = \sum_{j=1}^n H_{T,j} \cdot (t_i - t_e); \quad \Phi_V = H_V \cdot (t_i - t_e) \quad (18)$$

kde	Φ	je celková tepelná ztráta [W],
	Φ_T	je tepelná ztráta prostupem [W],
	Φ_V	je tepelná ztráta větráním [W],
	H_T	je součinitel tepelné ztráty prostupem [W/K],
	H_V	je součinitel tepelné ztráty větráním [W/K],
	t_i	je teplota interiéru [°C],
	t_e	je teplota exteriéru [°C].

Budeme-li uvažovat o vytápění objektu tuhými biopalivy a jmenovitý výkon kotle bude odpovídat výpočtové tepelné ztrátě objektu, pak automatický kotel s regulovatelností 30 až 100 % jmenovitého výkonu bude pracovat v přijatelném režimu po dobu 80% otopné sezóny, to je od venkovních teplot 9 °C. Pokud použijeme pyrolytický kotel o regulovatelnosti 50 až 100 % bude pracovat v přijatelném režimu pouze po dobu 40% otopné sezóny, tedy od teploty 2,5 °C. To je ovšem ideální případ, kdy je přesně stanovena tepelná ztráta objektu a té odpovídá zvolený kotel svým výkonem. Je naprosto běžnou praxí, že místo kotle 25 kW je pro daný objekt použit kotel 30 kW. To je však posun v regulovatelnosti do rozsahu 60 až 100 %, takže kotel poběží v přijatelném režimu pouze po dobu 20% otopné sezóny! Mimo tuto dobu bude regulace zdroje problematická, objekt bude přetápěn a regulace teploty v interiéru bude řešena intenzivním větráním „otevřenými okny“. V opačném případě (dovolí-li to konstrukce kotle) bude výkon kotle uměle snížen škrcením přívodu spalovacího vzduchu za zvýšené emise oxidu uhelnatého a dalších škodlivin, což vede opět k nárůstu nákladů na vytápění díky zvýšení ztráty chemickým nedopalem a snížení životnosti kotle. Při montáži kotle pouze na základě „odhadu“ tepelné ztráty, po zateplení stávajícího objektu při zachování zdroje tepla nebo při použití kotlů na tuhá paliva v novostavbách s nižší tepelnou ztrátou než 15 kW (dříve 20 kW) tak dochází k ještě větším nesouladům. Dalším příkladem vedoucím ke stejným problémům je použití nevhodného druhu paliva či jeho frakce. Například kotel s prohoříváním paliva a drobné truhlářské odřezky.

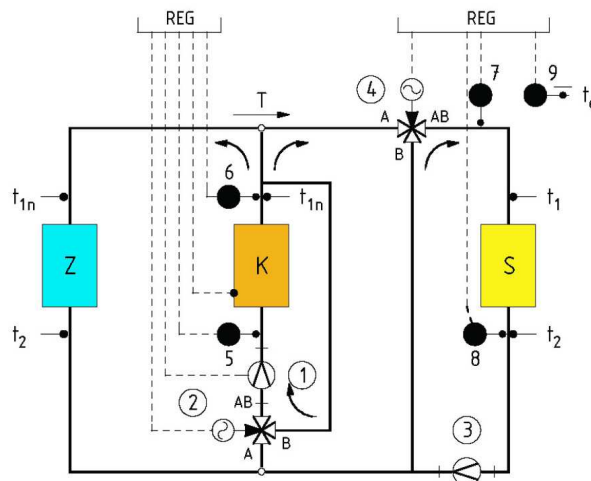


Obr. 76 Poměrná doba u výskytu teplot t_e a nižších, poměrná doba u požadavku na poměrný výkon a (poměrná tepelná ztráta) a nižší.

Řešením výše uvedeného, samozřejmě za dodržení vhodného paliva, je použití akumulčního zásobníku. To je schematicky znázorněno na obrázku 71. Principem je časové oddělení doby přípravy a spotřeby paliva. Výhodou je i hydraulické oddělení zdroje od spotřebiče.

Nevýhodou je zvýšení investice do technologie zdroje a zvýšené prostorové nároky, je ale zachována regulovatelnost, vyšší účinnost, životnost a ekologie provozu. Hydraulické řešení je naznačeno na obr. 77.

Kotel (K) se zapojuje paralelně k zásobníku (Z) a spotřebiči (S). V sekci zásobníku nejsou potřebná čerpadla a regulační armatury. Sekce kotle je vybavena kotlovým oběhovým čerpadlem (1), které se spouští při dosažení teploty vody v kotli 80 °C (snímač teploty 6). Kolem kotle je proveden obtok s trojcestným směšovacím ventilem s elektrickým pohonem (2). Obtok se směšovacím ventilem zajišťuje, aby teplota vstupní vody do kotle dosahovala alespoň 60 °C (ochrana kotle před nízkoteplotní korozi). Další funkcí je uzavření sekce kotle, když je mimo provoz. Regulátor výkonu kotle musí udržovat teplotu výstupní vody z kotle (nabíjecí voda) na výši alespoň 80 °C (snímač teploty 6), aby vycházela přijatelná velikost zásobníku. Spotřebič tepla, realizovaný jako soustava otopných ploch, je vybaven oběhovým čerpadlem (3) a obtokem se směšovacím ventilem s elektrickým pohonem (4). Jejich účelem je zajistit ekvitermické řízení teploty přívodní vody do spotřebiče (snímač teploty 7) v závislosti na venkovní teplotě (snímač teploty 9). Jedná se o kvalitativní řízení dodávky tepla pro spotřebič změnou teploty přívodní vody. Pro najíždění otopné soustavy je ještě potřebný snímač teploty (8) na výstupu vody ze spotřebiče. V případě více sekcí spotřebiče má čerpadlo (3) a obtok s trojcestným ventilem (4) každá sekce zvlášť. Lze tak dosáhnout rozdílných ekvitermických křivek, v rodinných domech typicky při kombinaci otopných těles a podlahových otopných ploch (viz. obr. 71).



Obr. 77 Princip hydraulického zapojení kotle (K) s akumulčním zásobníkem (Z) do spotřebiče (S) [VALENTA, 2007]

Tab. 14 Přehled provozních fází zapojení na obr. 77 [VALENTA, 2007]

fáze provozu		průtoky v trojcestném bodě	čerpadlo 1	směšovač 2	čerpadlo 3	směšovač 4
1.	výchozí stav		klid	zavřen	klid	-
2.	zátop v kotli		klid, běh	zavřen	klid	zavřen
3.	normální provoz		běh	otevřen	běh	otevřen
4.	provoz do soustavy		běh	otevřen	běh	otevřen
5.	chladnutí		běh	otevřen	běh	otevřen
6.	vybití zásobníku		klid	zavřen	běh	otevřen

Poznámky: - zavření a otevření se týká cesty A,
 - velikost otevření směšovačů je dána řídicím systémem.

Při provozu vytápěcí soustavy se zásobníkem tepla nastávají postupně různé provozní fáze. Každá fáze se vyznačuje určitým typem proudění vody v trojcestném bodě T. Typ proudění vody je uveden v popisu provozních fází (tab. 14). Typ fáze je závislý na ustáleném nebo na neustáleném čili přechodovém teplotním stavu. Většina provozních fází probíhá v teplotně ustáleném stavu. Když kotel má jmenovitý tepelný výkon Q_{ki} , jedná se o normální provoz. Když kotel po plném nabití zásobníku musí snížit výkon na hodnotu $Q_k = Q_s$ a dodávat teplo pouze do vytápěcí soustavy, jedná se o provoz do soustavy. Když má kotel výkon nulový, a to při nabitém zásobníku, jedná se o vybití zásobníku. Naopak dvě provozní fáze probíhají v teplotně neustáleném (přechodném) stavu. Jde o fázi náběhu (při zátopu) a o fázi chladnutí celé soustavy (při vyhasínání kotle).

Výchozí stav Ve výchozím studeném stavu, kdy kotel není v provozu a zásobník tepla je vybit, musí být vypnuto kotlové oběhové čerpadlo (1) a uzavřena cesta A směšovače (2). Také musí být vypnuto oběhové čerpadlo soustavy (3). Může být vypnuto ekvitermické řízení soustavy.

Náběh celé soustavy Náběh probíhá tak, že po dosažení požadované teploty nabíjecí vody (snímač teploty 6), kterou udržuje regulátor výkon kotle, se spustí oběhové čerpadlo (1) a začne se přepouštěcí spojkou přepouštět výstupní voda z kotle do vstupu vody do kotle (do zpátečky). Zátop v kotli trvá do okamžiku dosažení požadované teploty vstupní vody do kotle, což je 60 °C.

Normální provoz Tento provoz se vyznačuje tím, že kotel vybavuje jmenovitý tepelný výkon Q_k , který je vyšší než výkon potřebný pro vytápěcí soustavu Q . Při dosažení požadované teploty vstupní vody do kotle začne směšovač (2) otevírat cestu A ze společného zpětného potrubí, takže kotel začne dodávat teplo do společného přívodního potrubí, přičemž přebytek tepla přechází do zásobníku. Současně se musí spustit oběhové čerpadlo vytápěcí soustavy (3) a zapnout ekvitermické řízení soustavy. Nastává stav, při kterém se dodává teplo do vytápěcí soustavy i do zásobníku. Podmínkou je, aby tepelný výkon kotle byl vyšší než potřebný výkon do soustavy. Při nesplnění této podmínky by nastalo „studené“ vybíjení zásobníku s nežádoucím průtokem do zásobníku zespoda a tím ke ztrátě výkonu pro vytápěcí soustavu. Na počátku této fáze se musí současně provést řízení najíždění vytápěcí soustavy. Řízené najíždění je nutné proto, aby také nedošlo ke „studenému“ vybíjení zásobníku. To by nastalo v případě, pokud by se ke kotlové sekci naplno připojila studená vytápěcí soustava tak, že by směšovač (4) zcela otevřel cestu A. Soustava by se pak prohřívala zbytečně dlouho. Zabránit tomuto stavu je možné dvěma způsoby. První způsob tzv. najíždění vytápěcí soustavy může být realizován využitím již osazeného ekvitermického řídicího systému. Jeho činnost spočívá v tom, že před dosažením požadované teploty přívodní vody dané topnou křivkou, bude systém přednostně udržovat rozdíl teplot oběhové vody ve vytápěcí soustavě na hodnotě $t_1 - t_2 = t_{1j} - t_{2j} = \text{konst.}$ Např. pro soustavu 80/60 °C je $t_{1j} - t_{2j} = 80 - 60 = 20$ K. Je-li teplota zpětné vody na počátku najíždění soustavy 20 °C, musí být na počátku najíždění teplota přívodní vody 40 °C. Tím se sníží průtok do vytápěcí soustavy. Druhý způsob vychází z osazení uzavírací armatury s elektrickým pohonem do sekce zásobníku, která by byla uzavřena v době, kdy teplota přívodní vody ve vytápěcí soustavě je nižší než požadovaná teplota přívodní vody daná topnou křivkou.

Provoz do soustavy Nabíjení zásobníku je ukončeno v případě dosažení jeho plného nabití. Jedná se o provoz pouze do vytápěcí soustavy, kdy proudí voda o nabíjecí teplotě ze zásobníku společnou zpátečkou ke kotli, kde se směšuje se zpětnou vodou ze soustavy. Tím dojde k nárůstu teploty vody vstupující do kotle a regulátor kotle začne pracovat s výkonem sníženým na hodnotu $Q_k = Q$.

Chladnutí kotle Po fázi, kdy kotel pracoval pouze do vytápěcí soustavy dojde k fázi chladnutí z důvodu vyhasínání kotle vlivem dohořívání paliva. Při chladnutí je výkon kotle menší než výkon vytápěcí soustavy, čili $Q_k < Q$. Řídicí systém se potom snaží udržet nabíjecí teplotu (snímač 6) na nastavené hodnotě přepouštěním části průtoku vody kotlem do jeho vstupu. Tím se snižuje průtok ze sekce kotle do společného přívodu. Tento průtok se ale okamžitě doplní průtokem ze zásobníku na hodnotu vstupního průtoku potřebného pro vytápěcí soustavu, takže nastává jakési prvotní vybíjení zásobníku tepla při sníženém výkonu kotle.

Vybíjení zásobníku Vybíjení zásobníku nastane, když kotel přestane zcela dodávat teplo. Při vybíjení musí být vypnuto kotlové oběhové čerpadlo (1) a uzavřena cesta A směšovače (2). Vybíjení bude ukončeno tehdy, když teplota výstupní vody ze zásobníku poklesne pod teplotu přívodní vody do soustavy, která je dána nastavenou topnou křivkou. Po ukončení vybíjení musí být vypnuto oběhové čerpadlo soustavy (3) a může být vypnuto ekvitermické řízení soustavy.

Návrh otopných ploch

Každá otopná plocha (těleso, podlaha) má stanoven jmenovitý teplotní spád uváděný ve tvaru 80/60/20-1,3 (viz. obr. 78). První tři čísla, oddělená lomítkem, udávají výpočtovou (jmenovitou) teplotu vody na přívodu do otopné plochy (t_{1j}) a výpočtovou teplotu vody na výstupu z otopné plochy (t_{2j}), výpočtovou teplotu vzduchu v okolí otopné plochy (v místnosti) (t_{ij}). Číslo za pomlčkou je teplotní exponent (n) otopné plochy, který charakterizuje vlastnosti změny výkonu při změně výše uvedených teplot (viz rovnice 20). Teplotní exponent je závislý na konstrukci otopné plochy, pro mnohé z nich je uveden v tabulce 15. Ekvitermická regulace spočívá v tom, že měníme skutečný teplotní spád na otopné ploše v závislosti na aktuální venkovní teplotě, tedy v závislosti na požadovaném výkonu jednotlivých otopných ploch (viz obr. 76 a rovnice 19). Pro každou otopnou soustavu v dané lokalitě a objektu tak lze sestavit otopné křivky, které předepisují změnu teplotního spádu. Pro lokalitu specifikovanou v úvodu kapitoly jsou vypočítané ekvitermické křivky zobrazeny na obr. 78).

$$Q = Q_j \cdot \left(\frac{\Delta t_{\ln}}{\Delta t_{j,\ln}} \right)^n \quad (19)$$

kde Q je požadovaný tepelný výkon otopné plochy [W] při skutečném logaritmickém teplotním spádu Δt_{\ln} [°C],
 Q_j je tepelný výkon otopné plochy [W] při jmenovitém logaritmickém teplotním spádu $\Delta t_{j,\ln}$ [°C].

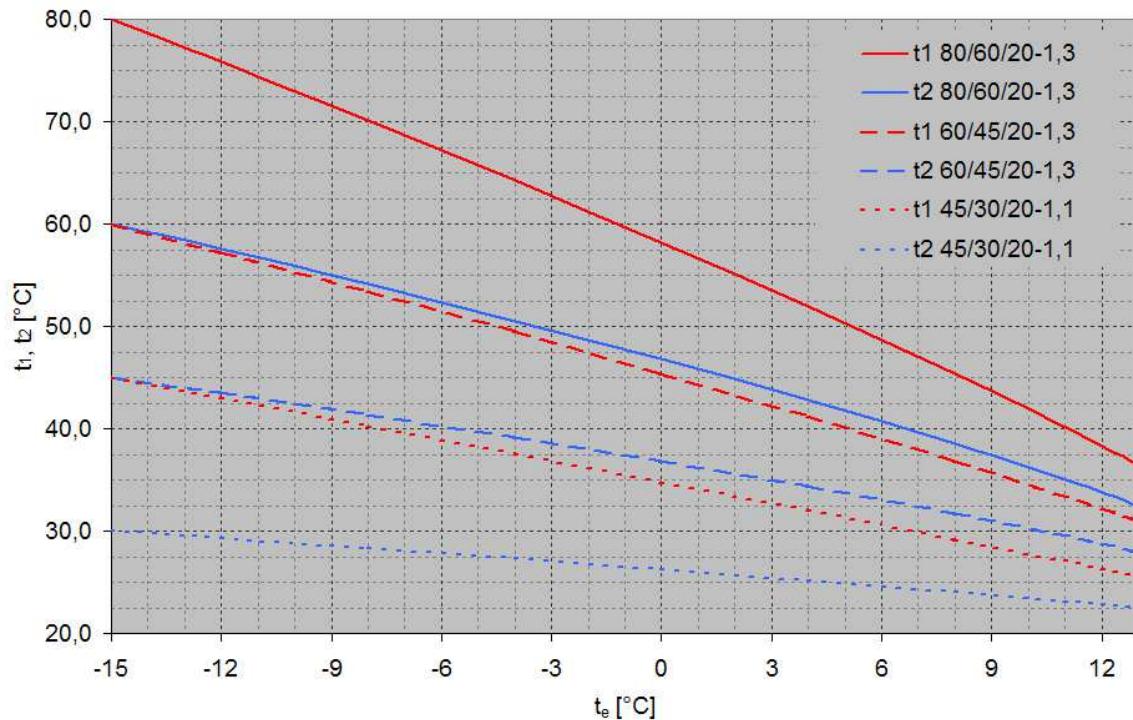
Střední logaritmický teplotní spád je dán vztahem:

$$\Delta t_{\ln} = \frac{(t_1 - t_{ij}) - (t_2 - t_{ij})}{\ln \frac{t_1 - t_{ij}}{t_2 - t_{ij}}} \quad (20)$$

kde t_1 je teplota přívodní vody do otopné plochy [°C],
 t_2 je teplota vratné vody z otopné plochy [°C],
 t_{ij} je teplota vzduchu v interiéru návrhová [°C].

Tab. 15 Teplotní exponent n otopných ploch [BAŠTA, 2001]

typ otopné plochy	n [-]
podlahová otopná plocha	1,1
desková otopná tělesa	1,26 až 1,33
trubková otopná tělesa	1,20 až 1,30
tělesa dle DIN 4703	1,3
konvektory	1,30 až 1,50
konvektory s ventilátorem	1,05 až 1,20



Obr. 78 Ekvitermické křivky pro Blansko a počátek otopného období 13 °C.

Křivky 80/60/20/-1,3 jsou pro běžnou otopnou soustavu s deskovými otopným tělesy, křivky 60/45/20-1,3 jsou určeny pro nízkoteplotní soustavu s deskovými otopnými tělesy a křivky 45/30/20-1,1 jsou použity pro podlahové otopné plochy. Akumulační zásobník nabíjíme pokud možno na co největší teplotu. Požadované množství akumulovaného tepla udává kalorimetrická rovnice (21) a je závislé na hmotnosti akumulací látky (velikost zásobníku), schopnosti této látky akumulovat teplo (měrná tepelná kapacita) a na teplotní diferenci (teplota nabitého a vybitého zásobníku). Obvykle používanou akumulací látkou je voda. Měrnou tepelnou kapacitu lze pro využívaný rozsah teplot považovat za konstantní. Teplota nabitého zásobníku je dána maximální provozní teplotou použitého kotle a obvykle dosahuje hodnoty 80 °C. Teplota vybitého zásobníku je dána teplotou vratné větve otopných ploch. Pohledem na obr. 78 je jasné, že v období nižšího požadavku na výkon je kapacita akumulátoru vyšší. To umožňuje u velkých zásobníků zapojených na kotel spalující kusové dříví až několikadenní provoz bez zátopu v přechodných obdobích otopné sezóny. Hmotnost zásobníku je dána součinem hustoty a objemu, který určuje velikost nádrže při jmenovitém teplotním spádu.

$$Q_z = m \cdot c \cdot (t_n - t_v) = V \cdot \rho \cdot c \cdot (t_n - t_v) \quad (21)$$

kde

Q_z	je množství energie uložené do zásobníku [kWh],
m	je hmotnost vody v zásobníku [kg],
c	je měrná tepelná kapacita vody [kWh/kg.K],
t_n	je teplota nabíjecí vody [°C],
t_v	je teplota vybíjecí vody [°C],
V	je objem vody v zásobníku [m ³],
ρ	je střední hustota vody při daných teplotách [kg/m ³].

Na základě výše uvedeného rozboru jsem provedl výpočet akumulací nádrží podle metodiky [VALENTA, 2007]. Akumulační zásobník je součástí otopné soustavy s kotlem na tuhá biopaliva cihlového rodinného domu situovaného v Blansku. Vstupní údaje nutné pro výpočet jsou uvedeny v tabulce 16. Zásobník je navržen variantně pro čtyři různé zdroje tepla

definované v tabulce 17 a tři různé otopné plochy definované v tabulce 18. Celkem je tak vyhodnoceno dvanáct variant.

Tab. 16 Vstupní údaje rodinného domu

Rodinný dům v Blansku			
výpočtová tepelná ztráta dle [ČSN EN 12831, 2005]	Q _s	12	kW
výpočtová vnitřní teplota	t _{ij}	20	°C
venkovní výpočtová teplota	t _{ej}	-15	°C
venkovní teplota počátku a konce vytápění (start - stop teplota)	t _{e0}	13	°C
počet otopných dní	d	241	-
střední teplota v otopné sezóně	t _{em}	3,7	°C

Tab. 17 Vstupní údaje zdrojů tepla

kotel	automatický kotel s retortovým hořákem		
	výpočtová teplota nabíjecí vody	t _{nj}	80 °C
	doba vybíjení zásobníku při výpočtových parametrech	t _{vj}	4 h
	maximální doba provozu kotle	t _{nj}	4 h
	kotel na kusové dříví 12/12		
	výpočtová teplota nabíjecí vody	t _{nj}	80 °C
	doba vybíjení zásobníku při výpočtových parametrech	t _{vj}	12 h
	maximální doba provozu kotle	t _{nj}	12 h
	kotel na kusové dříví 8/16		
	výpočtová teplota nabíjecí vody	t _{nj}	80 °C
	doba vybíjení zásobníku při výpočtových parametrech	t _{vj}	16 h
	maximální doba provozu kotle	t _{nj}	8 h
	kotel na kusové dříví 6/18		
	výpočtová teplota nabíjecí vody	t _{nj}	80 °C
	doba vybíjení zásobníku při výpočtových parametrech	t _{vj}	18 h
	maximální doba provozu kotle	t _{nj}	6 h

Tab. 18 Vstupní údaje otopných ploch

otopná plocha	desková otopná tělesa Korado Radik VKM (klasika)		
	teplota přívodní větve	t _{1j}	80 °C
	teplota vratné větve	t _{2j}	60 °C
	teplotní exponent	n	1,3 -
	desková otopná tělesa Korado Radik VKM (nízkoteplotní)		
	teplota přívodní větve	t _{1j}	60 °C
	teplota vratné větve	t _{2j}	45 °C
	teplotní exponent	n	1,3 -
	podlahová otopná plocha Revel-PEX		
	teplota přívodní větve	t _{1j}	45 °C
	teplota vratné větve	t _{2j}	30 °C
	teplotní exponent	n	1,1 -

Automatický kotel má navrženu maximální dobu provozu 4 hodiny a dobu vybíjení při výpočtové tepelné ztrátě také 4 hodiny. Celkem jde tedy o osmi hodinový cyklus, tedy 3 starty kotle při venkovní teplotě -15 °C (viz tab. 17). Základní funkcí zásobníku ve spojení

s automatickým kotlem je omezení počtu startů a tím omezení nízkoteplotní koroze kotle. Pyrolytický kotel má v základní variantě navrženu maximální dobu provozu na 8 hodin a ve variantě se zvýšeným komfortem na 6 hodin. Doba vybíjení zásobníku je volena tak, aby tvořila doplněk do celodenního cyklu, tedy 16 a 18 hodin. Takové nastavení výrazně zvýší komfort obsluhy kotle. Základní funkcí zásobníku ve spojení s kotlem na kusové dříví je zvýšení komfortu obsluhy prodloužením zátopového cyklu. Minimalizace počtu startů je zde samozřejmostí. Jak již bylo uvedeno, nižší teplota vody vratné větve otopné plochy má za následek menší velikost zásobníku. Na druhé straně nízkoteplotní otopná tělesa znamenají vyšší investici do rozměrnějších těles, jejichž umístění v interiéru může být problematické. Podlahová otopná plocha pak znamená několikanásobně vyšší investici, navíc s hrubým zásahem do stavby (platí pro rekonstrukce). V některých případech je toto řešení dokonce technicky nemožné z důvodů statiky (podkroví stávajících objektů) nebo z důvodů tepelně – technických (nedostatečný výkon podlahových ploch). Pro výše uvedené zdroje tepla byly na straně spotřeby navrženy 2 typy deskových otopných těles Korado Radik VKM se standardním teplotním spádem 80/60 °C a jako nízkoteplotní varianta se spádem 60/45 °C [KORADO, 2013]. Poslední variantou je podlahová otopná plocha provedená v systému Revel-PEX a s teplotním spádem 45/30 °C, bifilární vinutí [REVEL, 2012; REVEL, 2013].

6.2.2 Investiční náklady na vytápění se zásobníkem

Při pohledu na obr. 82 lze zjistit, že pro kotel na kusové dříví ve verzi s maximální dobou provozu 12 hodin, je doba jeho provozu pro 50 % dní otopného období pod 8 hodin. Tento fakt nyní hodnotím jako dostatečný komfort obsluhy vzhledem k prokazatelně vyšším investičním nákladům dalších variant (kotel na kusové dříví v režimu 8/16 a 6/18). Porovnání investic proto provedu pouze pro technologii automatického kotle a kotel na kusové dříví v režimu 12/12. Je však mnoho možností použití kotlů na kusové dříví z hlediska technického. Proto zvolím variantu levnou, s průměrnou cenou ocelových kotlů spalujících na principu prohořívání a variantu s kvalitním pyrolytickým kotlem. Jako automatický kotel je zvolen kotel s retortovým hořákem první generace, nejčastěji zastoupen v nabídce více výrobců. Všechny ceny jsou stanoveny jako střední cena vybraných domácích výrobců s 10% DPH (rok 2011).

Akumulační zásobníky jsou realizovány sériovým zapojením tlakových akumulčních nádob NAD 1000 V1 o objemu 1m³ a jednotkové ceně 30 518 Kč. Zvolené řešení je sice nákladnější než jedna velká nádrž, ale pro domovní kotelny běžně realizované z důvodu průchodnosti technologie dveřmi bez nutnosti stavebních úprav. Zde je třeba počítat s dveřmi o světlé šířce alespoň 100 cm, obvykle realizovaných jako dvoukřídlé. Tato varianta je výrazně levnější než použití běžných dveří o skladebné šířce 90 cm a pak nádrží o objemu jen 750 litrů.

Otopné plochy jsou voleny v podobě deskových otopných těles Korado, řady Radik VKM, rozvod horizontální, nucený, s tlakovou expanzní nádobou, provedený ve dvou okruzích – přízemí a podkroví. Tělesa Radik představují nejběžněji používaný výrobek této kategorie, verze ventil kompak se středovým připojením, jenž výrazně zjednodušuje montáž (úspora nákladů) a umožňuje bezproblémovou změnu délky tělesa při budoucí změně v parametrech otopné soustavy [KORADO, 2013]. Výpočet jednotlivých rozměrů těles a následné nacenění bylo provedeno pro rodinný dům definovaný v tab. 16 s podrobnostmi získanými z projektové dokumentace. Výpočet je proveden pro teplotní spád na tělesech 80/60 °C a 60/45 °C jako standardní a nízkoteplotní varianta. Výsledná cenová kalkulace je uvedena v tab. 19 a 20.

Tab. 19 Investiční náklady – otopná tělesa, teplotní spád 80/60 °C

číslo	místnost	P OT [kW]	typ tělesa	cena [Kč]
1.01	chodba 1NP	0,86	10-090090-G0-VKM	3 246
1.02	koupelna 1NP	0,69	20-060080-G0-VKM	3 223
1.03	WC	0,17	11-060040-G0-VKM	2 366
1.04	kuchyň	1,03	20-060100-G0-VKM	3 568
1.05	jídelna	1,89	22-060120-G0-VKM	4 950
1.06	pokoj1	1,54	20-060160-G0-VKM	4 595
1.07	pokoj2	1,54	22-090070-G0-VKM	4 982
2.01	chodba 2NP	0,51	11-060060-G0-VKM	2 648
2.02	koupelna 2NP	0,51	20-060060-G0-VKM	2 879
2.03	ložnice1	1,11	20-060110-G0-VKM	3 741
2.04	ložnice2	1,11	20-060110-G0-VKM	3 741
2.05	ložnice3	1,03	11-060110-G0-VKM	3 361
Celkem		12,00		43 300

Tab. 20 Investiční náklady – otopná tělesa, teplotní spád 80/60 °C

číslo	místnost	P OT [kW]	typ tělesa	cena [Kč]
1.01	chodba 1NP	0,86	10-090160-G0-VKM	4 270
1.02	koupelna 1NP	0,69	20-090110-G0-VKM	4 879
1.03	WC	0,17	11-060040-G0-VKM	2 366
1.04	kuchyň	1,03	21-060160-G0-VKM	5 163
1.05	jídelna	1,89	33-060160-G0-VKM	8 234
1.06	pokoj1	1,54	21-060230-G0-VKM	6 478
1.07	pokoj2	1,54	33-090090-G0-VKM	7 965
2.01	chodba 2NP	0,51	11-060100-G0-VKM	3 220
2.02	koupelna 2NP	0,51	21-060090-G0-VKM	3 851
2.03	ložnice1	1,11	21-060160-G0-VKM	5 163
2.04	ložnice2	1,11	21-060160-G0-VKM	5 163
2.05	ložnice3	1,03	21-060160-G0-VKM	5 163
Celkem		12,00		61 915

Třetí variantou řešení otopných ploch je použití podlahového vytápění v systému Revel PEX, trubka PEX-Al-PEX 16x2 s teplotním spádem 45/30 °C [REVEL, 2013]. U podlahového vytápění je stanovena dvojitá jednotková cena za m². První je cena čistě hydraulických komponent včetně montáže – 725 Kč/m², druhá včetně stavební části konstrukce podlahy – 1875 Kč/m². Zde je zahrnuta cena tepelné izolace pod trubkou a betonu nad trubkou včetně práce. Není zahrnuta cena hydroizolace a vrstev pod ní a cena finálních vrstev podlahy.

Ostatní komponenty, které nezbytně doplňují kompletní technologii otopné soustavy jsou prvky MaR (regulátory, čidla teploty vzduchu a vody, servopohony ventilů), hydraulické prvky (uzavírací a regulační armatury, čerpadla, klapky, filtry, jímky čidel, automatické odplynění), měděné potrubí a fitinky propojující jednotlivé technologické celky a otopná tělesa a kompletní samostatný okruh přípravy TV. Ze stavební části technologie je kalkulován pouze komín, vlastní prostor kotelny již ne. Všechny položky, uvedené jako ostatní, jsou stejné pro všechny analyzované varianty. Jejich přehled je uveden v tab. 21.

Tab. 21 Investice v položce ostatní.

položka	investice [Kč]
okruh TV	33 643
prvky hydraulických okruhů zdroje, regulace	20 700
prvky hydraulických okruhů spotřebiče, regulace	28 900
komín	75 000
Cu potrubí	13 550
Celkem	171 793

6.2.3 Modelový objekt

V následujících grafech je prezentována provedená analýza nákladů na vytápění pro dům o vytápěné ploše 160 m² a rozdílné měrné spotřebě energie na vytápění která dopovídá různému energetickému standartu domu. Podrobnosti jsou uvedeny v tabulce 16 jako typické či horní hraniční hodnoty podle [HUMM, 1999] a [TYWONIAK, 2005].

Tab. 22 Přehled posuzovaných energetických standartů (kategorií) domů

kategorie domu	měrná spotřeba tepla na vytápění		roční spotřeba tepla na vytápění pro dům 160m ²	
	kWh/(m ² a)	hodnota	kWh/a	GJ/a
do roku 1970	265	typická	42 400	152,6
1970 až 1994	190	typická	30 400	109,4
1994 až dnes	120	typická	19 200	69,1
energeticky úsporný dům	70	hraniční	11 200	40,3
nízkoenergetický dům	50	hraniční	8 000	28,8

Tím je umožněno porovnání jednotlivých technologií zdroje tepla, ale i rozdílného stupně zateplení pro dům o stejné vytápěné ploše. Uvedená skutečnost je vhodná z toho důvodu, že stejnou úsporu nákladů může přinést změna technologie vytápění, nebo zateplení objektu.

Analýza nákladů na vytápění je dále doplněna o analýzu nákladů na všechny energie. Zde je mimo vytápění uvažováno s energií na ohřev teplé vody (TV) pro čtyřčlennou domácnost a se spotřebou elektrické energie na ostatní elektrospotřebiče, jako je osvětlení, bílá technika, televize a počítače. Je kalkulováno se spotřebou TV 50 litrů na osobu a den při ohřevu z 10 na 60 °C. Zvolená technologie je závislá na použitém palivu. Uvedená hodnota spotřeby TV odpovídá reálné spotřebě zjištěné vlastním dlouhodobým měřením a je v souladu s [ČSN EN 15316-3-1:2010]. Ostatní spotřeba elektrické energie je uvažována v množství 3 MWh za rok, což odpovídá střední spotřebě čtyřčlenné domácnosti, za nízkou spotřebu lze považovat 1,5 MWh za rok, za velmi vysokou pak 6 MWh za rok. Využitelný tarif elektrické energie ovlivňuje především technologie vytápění a přípravy TV. Náklady na ostatní spotřebu elektrické energie jsou minimalizovány především za použití tarifu D56, což je podmíněno využitím tepelného čerpadla pro vytápění.

Otopná soustava je realizována jako horizontální, dvoutrubková v mědi, s využitím deskových otopných těles Korado řady Radik VKM. Pouze při vytápění elektrickou energií jsou otopné plochy jiné. Při použití tepelného čerpadla (sazba D56) je instalována podlahová otopná plocha z důvodu dosažení vyššího topného faktoru zdroje. Akumulační elektrické vytápění (sazba D26) je realizováno za použití podlahové otopné plochy s elektrickými topnými kabely. V případě měrné spotřeby energie na vytápění nad 100 až 120 kWh/(m²a) je

třeba podlahovou otopnou plochu doplnit o otopná tělesa. Přímotopné elektrické vytápění (sazba D45) je realizováno přímotopy.

6.2.3.1 Základní technologie zdrojů tepla

Jde o zdroje tepla využívající tuhá paliva. Jsou porovnány automatické kotle s retortovým hořákem umožňující spalování bílé pelety a vybraných druhů agropelet. Hořáky s výkonem kolem 25 W a více navíc umožňují spalování hnědého uhlí frakce ořech 2. Přestože se nejedná o obnovitelné biopalivo, je tento způsob vytápění rovněž analyzován. Uvedený typ kotlů je posuzován ve dvou variantách – s akumulací nádrží a bez akumulace nádrže. Kotle Guntamatic umožňují spalování pouze bílé pelety, zato však dosahují vysoké životnosti a účinnosti. Mají vysoký stupeň regulovatelnosti a umožňují nízkoteplotní provoz výměníku tepla, což umožňuje jejich nasazení bez akumulacích nádrží. Posuzované technologie levných kotlů na kusové dříví s ručním přikládáním splňují emisní třídu 3, pyrolytické kotle třídu 3 nebo 4 a automatické kotle třídu 3 až 5 podle přílohy 10, zákona [ZÁKON 201/2012 Sb]. Přehled základních technicko-ekonomických parametrů uvedených technologií je v tabulce 23.

Tab. 22.1 Emisní limity nově instalovaných kotlů platné od 1.1.2014, emisní limity odpovídají emisní třídě č. 3, nižších hodnot dosahuje třída 4 a 5 podle [ČSN EN 303-5:2013].

Dodávka Paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný příkon (kW)	Mezní hodnoty emisí ¹⁾		
			CO	TOC ^{2),3)}	TZL
			mg.m ⁻³		
Ruční	Biologické	≤65	5 000	150	150
		>65 až 187	2 500	100	150
		>187 až 300	1 200	100	150
	Fosilní	≤65	5 000	150	125
		>65 až 187	2 500	100	125
		>187 až 300	1 200	100	125
Samočinná	Biologické	≤65	3 000	100	150
		>65 až 187	2 500	80	150
		>187 až 300	1 200	80	150
	Fosilní	≤65	3 000	100	125
		>65 až 187	2 500	80	125
		>187 až 300	1 200	80	125

¹⁾ Vztahuje se k suchým spalínám, teplotě 273,15 K, tlaku 101,325 kPa a k referenčnímu obsahu kyslíku 10 %; pro sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti, se hodnoty vztahují k referenčnímu obsahu kyslíku 13 %.

²⁾ TOC = celkový organický uhlík, kterým se rozumí úhrnná koncentrace všech organických látek s výjimkou methanu vyjádřená jako celkový uhlík.

³⁾ Nevztahuje se na sálavé spalovací stacionární zdroje, určené pro připojení na teplovodní soustavu ústředního vytápění a k instalaci v obytné místnosti.

Tab. 23 Přehled základních technicko – ekonomických parametrů kotlů na tuhá paliva

parametr	typ kotle a paliva				
	automatické kotle, retortový hořák			Guntamatic	kotel na ks drv
	bílá peleta	agropeleta	HU - O2	bílá peleta	kusové dřevo
životnost kotle	15	10	15	20	15
životnost akumulace	20	20	20	-	20
životnost otopných těles	20	20	20	20	20
účinnost zdroje tepla	0,82 až 0,84*	0,8	0,80 až 0,82*	0,86	0,6 až 0,7**
cena paliva Kč/kg	4 až 6	3	2,6	4 až 6	2,4
výhřevnost paliva kWh/kg	4,7	4,2	4,7	4,7	3,8 až 4,2***

poznámky: proškrtnuté technologie nejsou součástí daného zdroje, akumulace je nezbytná pouze pro retortový hořák spalující agropeletu, * větší účinnost platí pro kotel s akumulací nádrží, **větší účinnost platí pro kotel pyrolytický, menší pro odhořivací a prohořivací kotle, *** větší výhřevnost platí pro palivo pyrolytických kotlů o předepsané vlhkosti u ostatních kotlů odpovídá nižší výhřevnost reálné praxi v používání dříví o vyšší vlhkosti

Životnost potrubí, hydraulických prvků a systému MaR odpovídá životnosti příslušných celků, tedy kotle, akumulace a otopných těles, s výjimkou životnosti potrubních rozvodů otopných těles, která je

6.2.3.1.1 Vytápění kusovým dřívím levným kotlem

Označení v legendě grafů – *drv lvn* a *drv lvn aku*. Jde o variantu, která se co nejvíce podobá současnému běžnému způsobu využívání tuhých paliv. Je třeba poznamenat, že uvedená technologie nezakládá nádrže (*drv lvn*) již nespĺňuje současné požadavky na emisní limity [ZÁKON č. 201/2012 Sb.]. Investiční náklady jsou stanoveny jako průměrná hodnota dle výkonu kotlů prohořivacích i odhořivacích u výrobců uvedených v grafu na obr. 56. TV je připravována celoročně ve stacionárním akumulacním zásobníku OKC 300 NTR/PB, který je nepřímým ohříván zvoleným kotlem [DZ DRAŽICE, 2013]. Varianta *drv lvn aku* navíc obsahuje zapojení akumulacních zásobníků s cyklem 24 hod., který je rozdělen na 12 hod. nabíjení a 12 hod. vybíjení. Akumulátor je realizován pomocí série tlakových akumulacních nádob NAD 1000 V1 [DZ DRAŽICE, 2012]. Spotřeba elektrické energie je kalkulována v sazbě D02.

6.2.3.1.2 Pyrolytické kotle

Označení v legendě grafů – *drv plyn* a *drv plyn aku*. Jde o variantu podobnou předchozí, jen s použitím pyrolytického kotle [VERNER, 2010a; AGROMECHANIKA, 2009]. Pyrolytické kotle je nutno z důvodu životnosti provozovat vždy se zásobníkem. Varianta *drv plyn* uvažuje s malým vyrovnávacím zásobníkem, varianta *drv plyn aku* pak uvažuje s akumulacním zásobníkem v režimu 12/12 [Verner, 2005]. Tato technologie splňuje emisní limity třídy 3 dle ČSN EN 303-5. Investiční náklady jsou stanoveny jako průměrná hodnota kvalitnějších pyrolytických kotlů. Důvodem jsou vysoká účinnost, nízké emise a dobrá regulovatelnost.

6.2.3.1.3 Automatické kotle s retortovým hořákem

Označení v legendě grafů – *Ax a Ax aku*. Písmeno *x* je v označení nahrazeno číslem, které určuje kalkulovanou cenu 1 kg pelet. Cena bílé pelety je zvolena dle skutečnosti na obr. 75, tedy 4 a 6 Kč/kg. Agropeleta stojí 3 Kč za kilogram. Tento typ kotlů umožňuje spalovat hnědé uhlí frakce ořech 2 o ceně 2,60 Kč/kg (označení A2) [AGROMECHANIKA, 2010; BENEKOV, 2012; BENEKOV 2013a; BENEKOV 2013b]. TV je připravována celoročně ve stacionárním akumulacním zásobníku OKC 300 NTR/PB, který je nepřímým ohříván [DZ DRAŽICE, 2013]. Spotřeba elektrické energie je kalkulována v sazbě D02. Varianta *Ax aku* na rozdíl od základní varianty obsahuje zapojení akumulacních zásobníků s cyklem 8 hod., který je rozdělen na 4 hod. nabíjení a 4 hod. vybíjení. Akumulátor je realizován pomocí série tlakových akumulacních nádob NAD 1000 V1 [DZ DRAŽICE, 2012]. Spotřeba elektrické energie je kalkulována rovněž v sazbě D02. TV je připravována celoročně ve stacionárním akumulacním zásobníku OKC 300 NTR/PB, který je nepřímým ohříván kotlem. Při spalování agropelet je uvažováno pouze s variantou zdroje tepla s akumulacní nádrží. Chemické složení agropelet i přes toto opatření snižuje životnost kotle o 1/3. Investiční náklady jsou stanoveny jako průměrná hodnota dle výkonu automatických kotlů s retortovým hořákem výrobců uvedených v grafu na obr. 56. Jako alternativa stojí za zmínku automatické kotle, které nemají retortový typ hořáku. Při nedostatku místa pro zdroj tepla a v případě využití pouze bílé pelety je vhodnou alternativou technika firmy Ponast [PONAST, 2013]. Naopak velmi univerzální kotel, spalující bílou i hnědou peletu, většinu agropelet i nativní obilí či kukuřici vyrábí firma Verner. Kotel je vybaven roštem s mechanickým odpopelňováním, které eliminuje napékání mnohých agropelet [Verner, 2010b].

6.2.3.1.4 Automatické kotle Guntamatic

Označení v legendě grafů – G_x . Písmeno x je v označení nahrazeno číslem, které určuje kalkulovanou cenu 1 kg pelet. Vzhledem k tomu, že ve vybraných kotlích lze spalovat jen bílou peletu, byly stanoveny dvě ceny pelet – G_6 a G_4 – tedy 6 a 4 Kč za kilogram pelet. To odpovídá situaci na obrázku 75. Vzhledem k tomu, že kotle umožňují moderování výkonu hořáku v širokých mezích a kotel je řešen jako nízkoteplotní, není uvažováno s akumulací nádrží [GUNTAMATIC, 2008], [GUNTAMATIC, 2010] a [GUNTAMATIC, 2013]. TV je připravována celoročně ve stacionárním akumulacím zásobníku Guntamatic Akkutherm 1600 PS, který je nepřímo ohříván. Spotřeba elektrické energie je kalkulována v sazbě D02. Investiční náklady jsou stanoveny dle [ESEL, 2011].

6.2.3.2 Alternativní technologie zdrojů tepla

V této práci považuj za alternativní technologie ty, které využívají jiných nosičů energie než jsou tuhá biopaliva. Jde tedy o využití zemního plynu jako velmi rozšířeného způsobu vytápění a elektrické energie v podobě akumulacím a přímotopné sazby. Poslední variantou je použití tepelného čerpadla. Přehled základních technicko-ekonomických parametrů uvedených technologií je v tabulce 24.

Tab. 24 Přehled základních technicko – ekonomických parametrů alternativních zdrojů tepla

parametr	typ zdroje a paliva			
	kotel na ZP	přímotopy	podlahové kabely	tepelné čerpadlo
	zemní plyn	el. en. D45	el. en. D26	el. en. D56
životnost zdroje	15	-	-	15
životnost akumulace	-	-	50	-
životnost otopných ploch	15	15	50	15
účinnost zdroje tepla	0,9	0,95	0,95	2,7*
cena paliva Kč/kWh	1,14072	2,4313	1,9813	2,4313
poznámky: proškrtnuté technologie nejsou součástí daného zdroje, u přímotopů a podlahového vytápění elektrickými kabely je zdrojem tepla vlastní otopná plocha, * topný faktor				

6.2.3.2.1 Vytápění zemním plynem

Označení v legendě grafů – $ZP + D02$ a $ZP + D25$. Vytápění zemním plynem je posuzováno ve dvou variantách, dle způsobu přípravy TV. Varianta $ZP + D02$ předpokládá přípravu TV v nepřímo ohříváném zásobníku připojeném na plynový kotel. Varianta $ZP + D25$ předpokládá ohřev TV v elektrickém ohříváči vody zásobníkovém, závěsném, svislém DZ Dražice, objem 200 l, typ OKCE200. Pro vytápění jsou použity kotle Junkers uvedené v tabulce 25 [JUNKERS, 2007; JUNKERS, 2013].

Tab. 25 Přehled použitých plynových kotlů

Kotle Junkers s ohřevem vody, 120 l zásobník		
řada	typ	P [kW]
Ceraclass	ZS 12-2 DH KE + ST 120-1Z/C1	4,0 - 12,0
Ceraclass	ZS 24-2 DH KE + ST 120-1Z/C1	8,0 - 23,6
CeraclassExcellence	ZSC 28-3 MFK + ST 120-2E	8,6 - 28,1
Kotle Junkers bez ohřevu vody		
řada	typ	P [kW]
Ceraclass	ZS 12-2 DH KE	4,0 - 12,0
Ceraclass	ZS 24-2 DH KE	8,0 - 23,6

6.2.3.2 Vytápění elektrickou energií

Označení v legendě grafů – *EL pmt* a *EL kab*. Vytápění elektrickou energií je rovněž osazováno ve dvou variantách. První variantou označenou jako *EL pmt* je přímotopné vytápění (sazba D45) za použití elektrických přímotopů Ecoflex EL [ECOFLEX, 2007; ECOFLEX, 2012]. Druhou variantou označenou jako *EL kab* je akumulční vytápění s akumulací tepla do hmoty stavby (podlahové topení) realizované pomocí kabelů Kablo Elektro a.s. Vrchlabí. Ohřev TV je u obou variant řešen zásobníkovým ohřívačem DZ Dražice OKCE200.

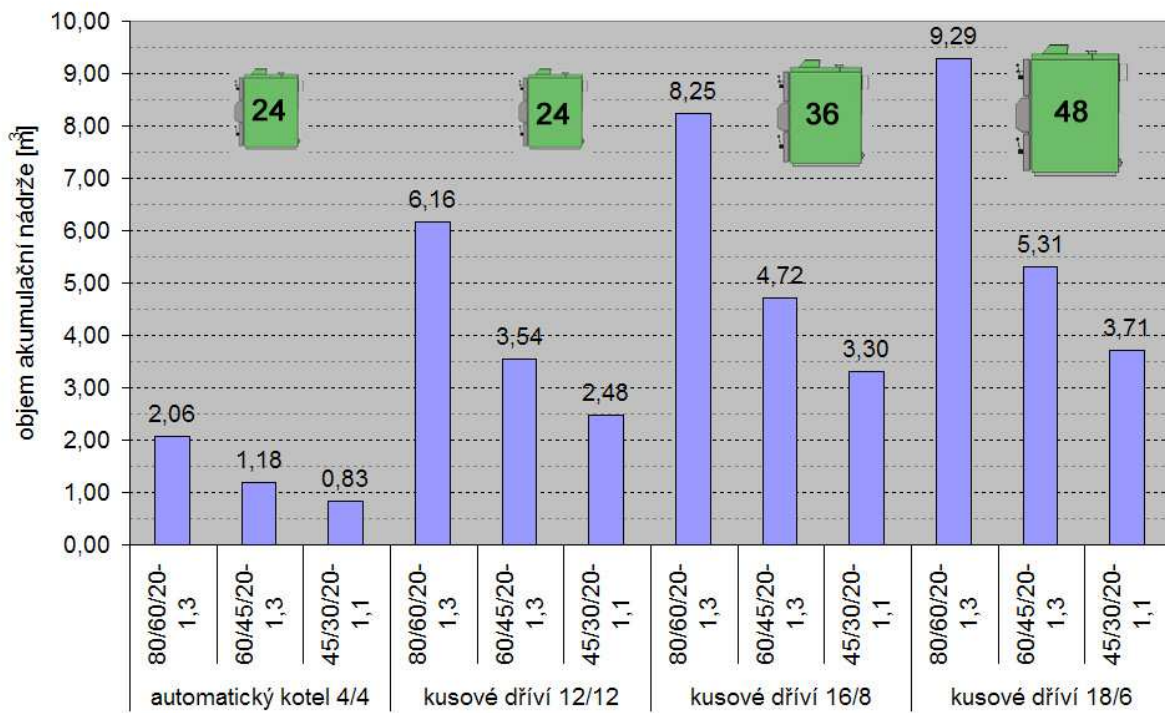
6.2.3.3 Vytápění tepelným čerpadlem

Označení v legendě grafů – *TC*. Je použito tepelné čerpadlo vzduch – voda, investiční náklady jsou stanoveny jako průměrná hodnota dle výkonu pro kompaktní provedení čerpadel na trhu ČR (integrováný výparník) dle ústního sdělení zástupců firem TC Mach, s.r.o., PZP Heating, a.s. a Buderus. Pro návrh bylo využito podkladů firmy Buderus [BUDERUS, 2013a; BUDERUS, 2013b]. Tepelné čerpadlo tvoří celkový plně funkční komplet včetně el. kotle, zásobníku TV a regulátoru. Spotřeba elektrické energie v sazbě D56. Zvolený topný faktor 2,7 a životnost tepelného čerpadla 15 let.

6.3 Výsledky a diskuse

6.3.1 Návrh akumulčního zásobníku

Na obrázku 79 je znázorněn výsledek výpočtu velikosti akumulčních zásobníků pro výše stanovené technologie vytápění a okrajové podmínky.



Obr. 79 Objem zásobníku jednotlivých variant v m³ (číslo nad modrým sloupcem) a odpovídající výkony kotlů v kW (číslo na symbolu kotle).

Z obrázku 79 vyplývá, že použití nízkoteplotních spotřebičů má velký význam na redukci velikosti zásobníku. Tato skutečnost je zvláště patrná při použití kotlů na kusové dříví. Zkrácení doby provozu kotle z dvanácti na šest hodin při venkovní teplotě -15 °C vede k výraznému navýšení výkonu zdroje. To předpokládá vyšší nároky na komín (dimenzování spalinových cest), na druhé straně při výkonu 48 kW jsou k dispozici kotle s možností přikládání metrových polen. Tím je výrazně zvýšen komfort obsluhy.

Tab. 26 Objem zásobníku V, výkon kotle P, celkový počet cyklů kotle za otopnou sezónu n_a a doba jednoho cyklu při průměrné teplotě otopné sezóny t_{em} (4,7 °C).

technologie		V [m ³]	P [kW]	n_a [-]	τ_{em} [h]
automatický kotel 4/4	80/60/20-1,3	2,06	24	321	18,5
	60/45/20-1,3	1,18		414	13,8
	45/30/20-1,1	0,83		468	12,0
kusové dříví 12/12	80/60/20-1,3	6,16	24	107	55,8
	60/45/20-1,3	3,54		138	41,4
	45/30/20-1,1	2,48		156	35,8
kusové dříví 16/8	80/60/20-1,3	8,25	36	88	70,6
	60/45/20-1,3	4,72		115	51,1
	45/30/20-1,1	3,30		131	43,6
kusové dříví 18/6	80/60/20-1,3	9,29	48	81	77,4
	60/45/20-1,3	5,31		107	55,8
	45/30/20-1,1	3,71		122	47,1

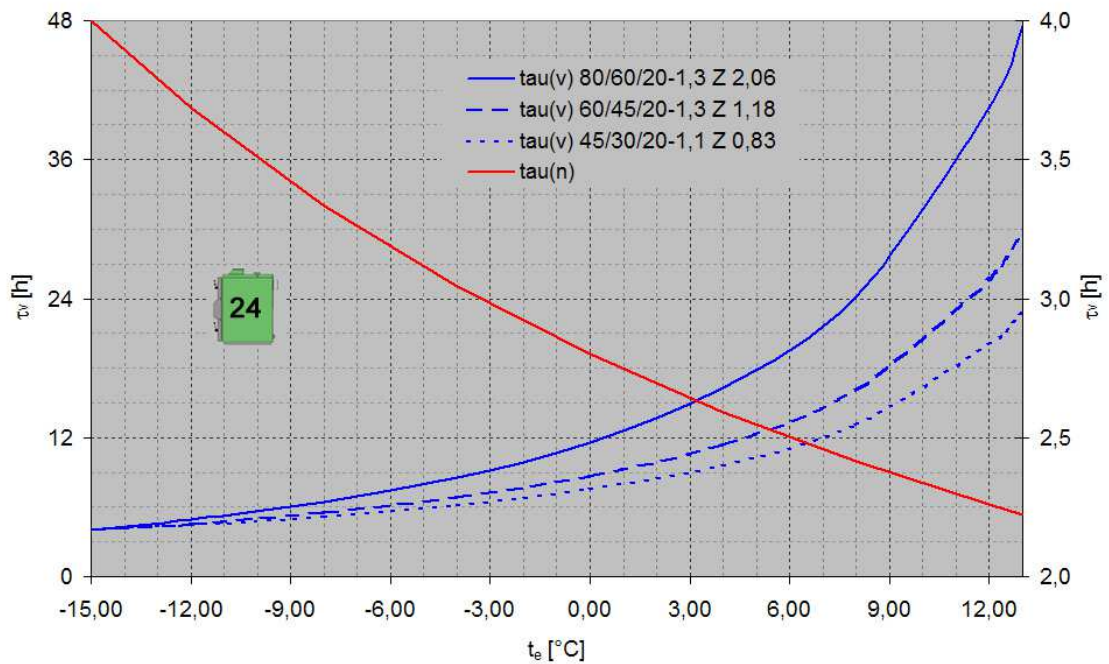
Počet startů kotle za sezónu, který je přehledně uveden v tab. 26, je díky akumulacím zásobníkům výrazně snížen. Pro porovnání [FUČÍK, 2004] uvádí počet startů špičkových kondenzačních plynových kotlů Geminox ve výši 3500 za rok, v tomto případě samozřejmě bez akumulací nádrže.

Z obr. 79 a tabulky 26 je vidět nižší požadavek na velikost zásobníků u nízkoteplotních otopných ploch. Nízkoteplotní otopné plochy jsou ale investičně náročnější, zejména pak podlahové vytápění. Které řešení je tedy nejvýhodnější z hlediska úspory investic? Na tuto otázku odpovím v analýze investičních nákladů, jejíž výsledky jsou uvedeny v kapitole 6.3.2 „Investiční náklady na vytápění se zásobníkem“.

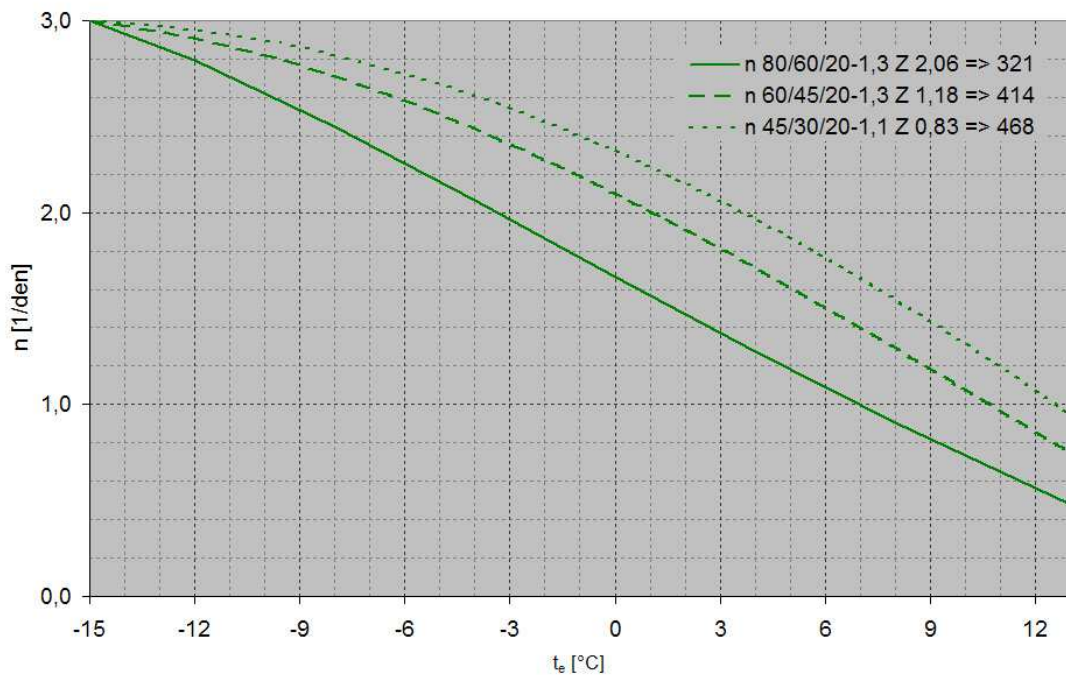
Na dalších stránkách je zobrazena nabíjecí křivka a vybíjecí křivky, vždy pro tři varianty zvolených otopných ploch. Legenda vybíjecích křivek uvádí použitý teplotní spád otopné plochy, doplněný o převažující teplotu v interiéru a teplotní exponent. Za písmenem „Z“ je uveden objem akumulacího zásobníku v m³. Obrázek je doplněn symbolem kotle, číslo uvnitř uvádí požadovaný výkon. Při $t_e = -15$ °C odpovídá nabíjecí a vybíjecí doba jmenovitým hodnotám, viz. kapitola 6.2.1 „Návrh zdroje tepla s akumulacím zásobníkem“.

Druhý obrázek posuzovaných variant uvádí závislost počtu startů kotle za 24 hodin na venkovní teplotě. Závislost je zpracována pro tři varianty zvolených otopných ploch. Legenda je doplněna o celkový počet startů kotle za otopnou sezónu (poslední číslo za šipkou). Při $t_e = -15$ °C odpovídá počet startů jmenovitým hodnotám, viz. kapitola 6.2.1 „Návrh zdroje tepla s akumulacím zásobníkem“.

Výsledky pro automatický kotel v režimu 4/4



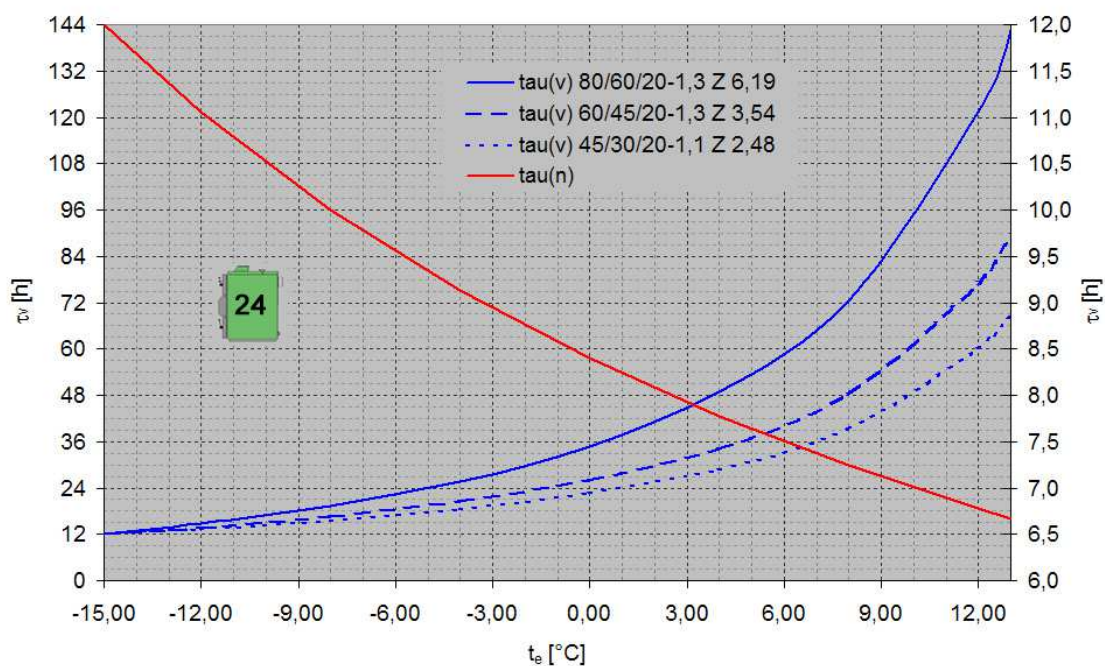
Obr. 80 Nabíjecí a vybíjecí křivky zásobníku pro automatický kotel.



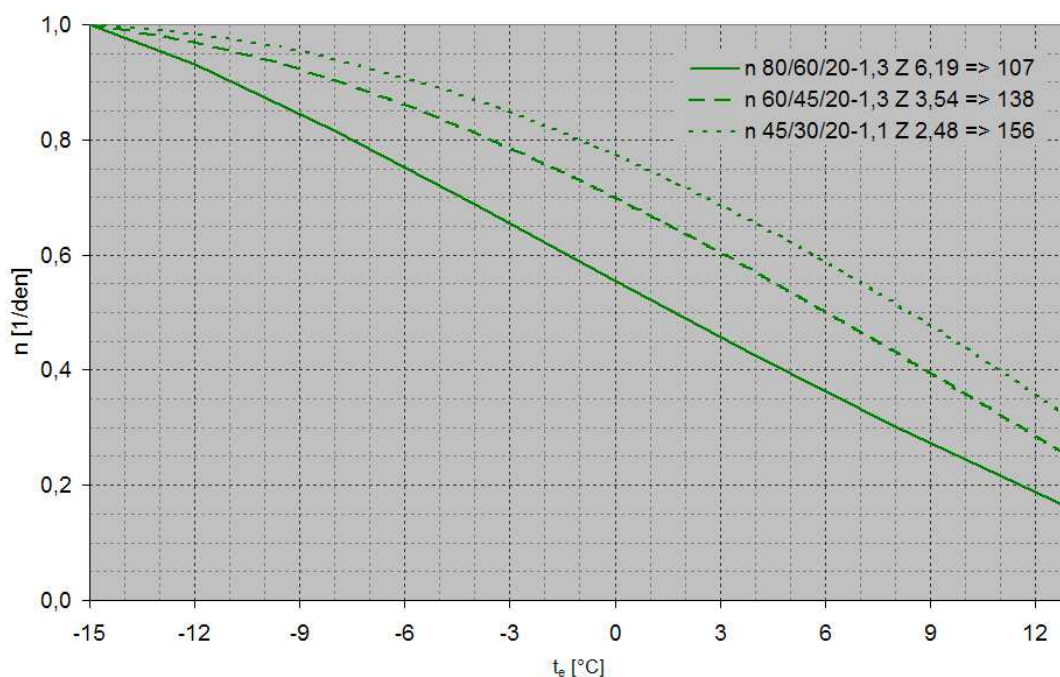
Obr. 81 Počet startů automatického kotle.

Požadovaný výkon kotle je 24 kW, tedy dvojnásobek tepelné ztráty objektu. Technologie s deskovými otopnými tělesy a teplotním spádem 80/60 °C má objem zásobníku 2,06 m³, kotel má 321 cyklů za sezónu. Technologie s podlahovým vytápěním a teplotním spádem 45/30 °C má objem zásobníku 0,83 m³, kotel má 468 cyklů za sezónu.

Výsledky pro kotel na kusové dříví v režimu 12/12



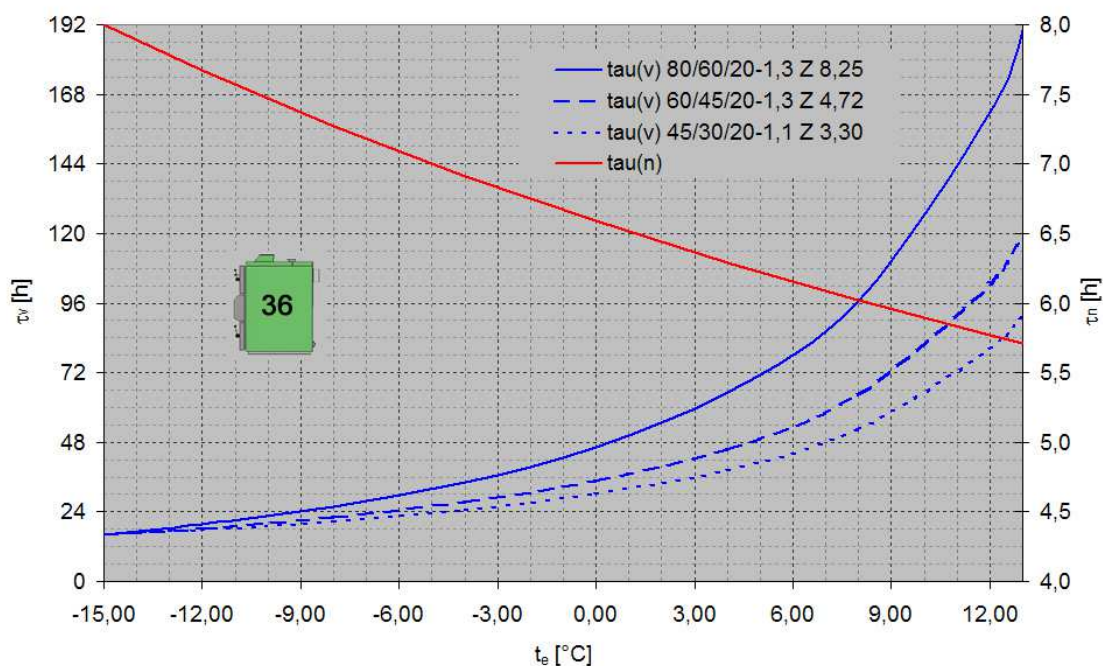
Obr. 82 Nabíjecí a vybíjecí křivky zásobníku pro kotel na kusové dříví v režimu 12/12.



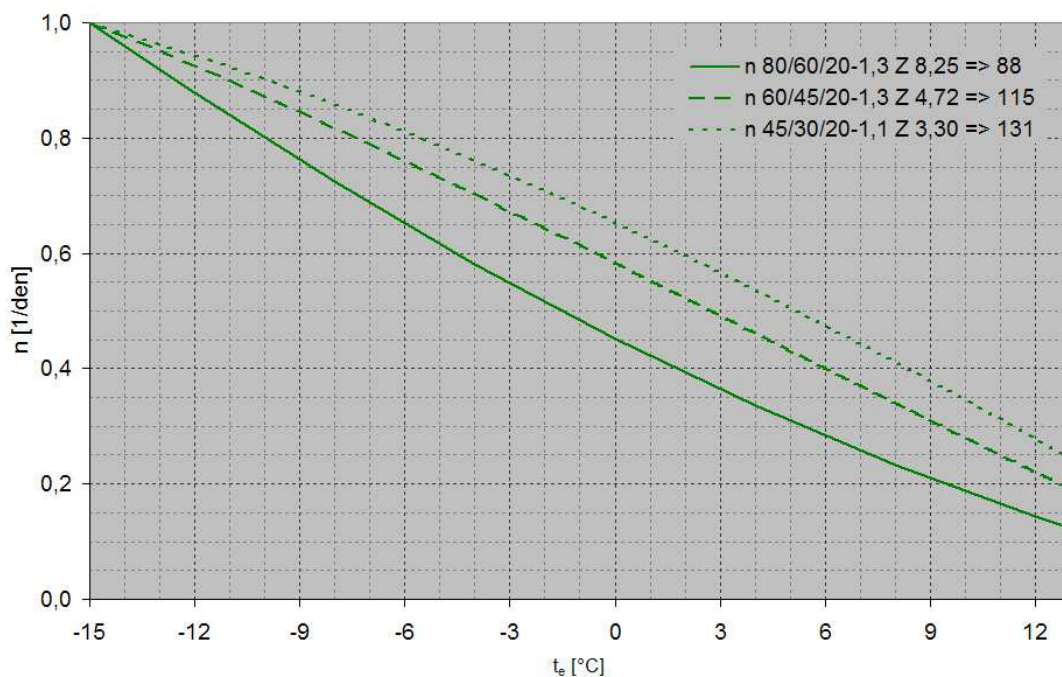
Obr. 83 Počet startů kotle na kusové dříví v režimu 12/12.

Požadovaný výkon kotle je 24 kW, tedy dvojnásobek tepelné ztráty objektu. Technologie s deskovými otopnými tělesy a teplotním spádem 80/60 °C má objem zásobníku 6,19 m³, v kotli je třeba topit 107 dní z celkových 241 otopných dní. To je 44,4 % dní. Technologie s podlahovým vytápěním a teplotním spádem 45/30 °C má objem zásobníku 2,48 m³, v kotli je třeba topit 156 dní z celkových 241 otopných dní. To je 64,7 % dní.

Výsledky pro kotel na kusové dříví v režimu 8/16



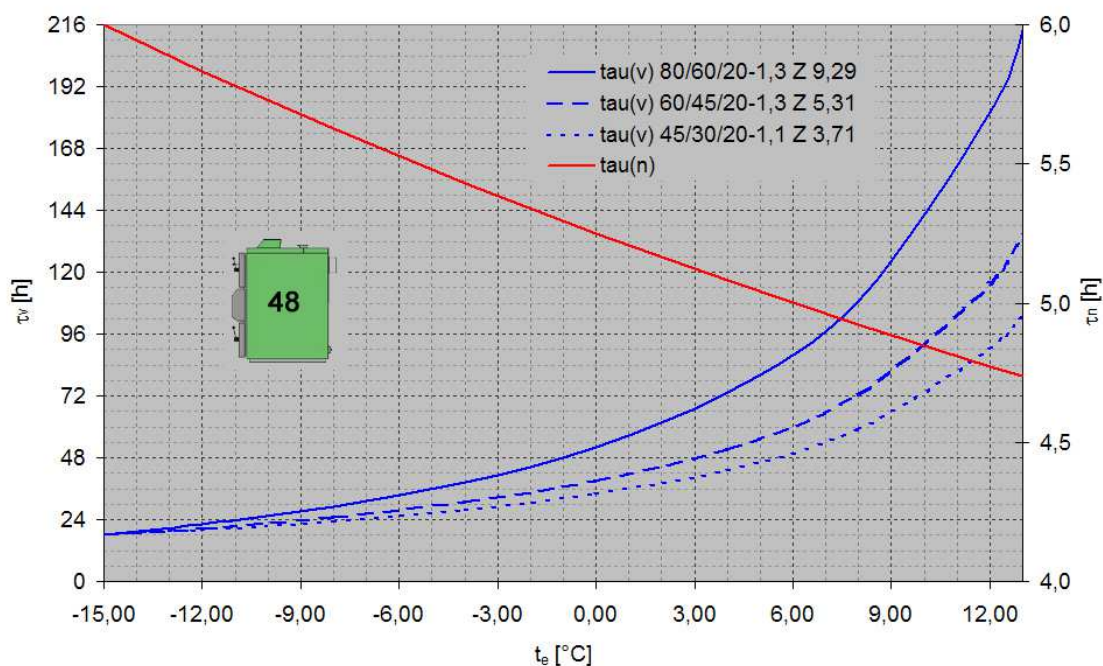
Obr. 84 Nabíjecí a vybíjecí křivky zásobníku pro kotel na kusové dříví v režimu 8/16.



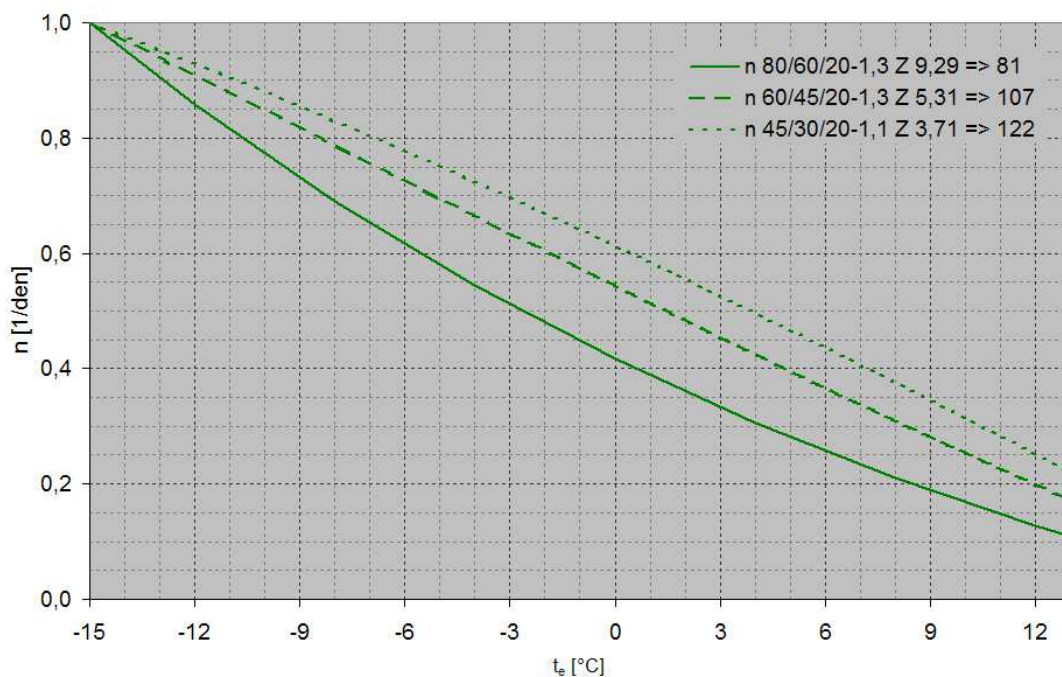
Obr. 85 Počet startů kotle na kusové dříví v režimu 8/16.

Požadovaný výkon kotle je 36 kW, tedy trojnásobek tepelné ztráty objektu. Technologie s deskovými otopnými tělesy a teplotním spádem 80/60 °C má objem zásobníku 8,25 m³, v kotli je třeba topit 88 dní z celkových 241 otopných dní. To je 36,5 % dní. Technologie s podlahovým vytápěním a teplotním spádem 45/30 °C má objem zásobníku 3,30 m³, v kotli je třeba topit 131 dní z celkových 241 otopných dní. To je 54,4 % dní.

Výsledky pro kotel na kusové dříví v režimu 6/18



Obr. 86 Nabíjecí a vybíjecí křivky zásobníku pro kotel na kusové dříví v režimu 6/18.



Obr. 87 Počet startů kotle na kusové dříví v režimu 6/18.

Požadovaný výkon kotle je 48 kW, tedy čtyřnásobek tepelné ztráty objektu. Technologie s deskovými otopnými tělesy a teplotním spádem 80/60 °C má objem zásobníku 9,29 m³, v kotli je třeba topit 81 dní z celkových 241 otopných dní. To je 33,6 % dní. Technologie s podlahovým vytápěním a teplotním spádem 45/30 °C má objem zásobníku 3,30 m³, v kotli je třeba topit 122 dní z celkových 241 otopných dní. To je 50,6 % dní.

6.3.2 Investiční náklady na vytápění se zásobníkem

Tab. 27 Investiční náklady na vytápění, levný kotel, novostavba

teplotní spád [°C]	cena kotle		cena aku. zásobníku		cena otop. ploch [Kč]	cena ostatní [Kč]	cena celkem	
	automat [Kč]	ks. dříví [Kč]	automat [Kč]	ks. dříví [Kč]			automat [Kč]	ks. dříví [Kč]
80/60	92 345	34 568	61 036	183 108	43 300	171 793	368 474	432 769
60/45	92 345	34 568	30 518	122 072	61 915	171 793	356 571	390 348
45/30	92 345	34 568	30 518	91 554	102 080	171 793	396 736	399 995
Úspora je vyjádřena pro dvě referenční technologie: automatický kotel a kotel na kusové dříví, oba ve spojení s otopnými tělesy 80/60 °C. Referenční technologie jsou zvýrazněny barevně.				teplotní spád	úspora			
				[°C]	automat [%]	ks. dříví [%]	automat [%]	ks. dříví [%]
				80/60	0,0	-17,4	14,9	0,0
				60/45	3,2	-5,9	17,6	9,8
				45/30	-7,7	-8,6	8,3	7,6

Nejnižších investičních nákladů je dosaženo u varianty automatického kotle s nízkoteplotními deskovými otopnými tělesy. Doporučuji však použít verzi automatického kotle a standardních deskových otopných těles. Navýšení ceny investice jen o 3,2 % je bohatě vynahrazeno lepšími technickými vlastnostmi uváděnými výše. Zvýšení ceny zásobníku je zde téměř shodné jako snížení ceny otopných těles. V případě levného kotle na kusové dříví je investičně nejlevnější alternativou použití deskových otopných těles provozovaných v nízkoteplotním režimu. Použití podlahového vytápění je u automatického kotle nevýhodné, v případě levného kotle na kusové dříví je dosaženo úspory 7,6 %.

Tab. 28 Investiční náklady na vytápění, kvalitní pyrolytický kotel, novostavba

teplotní spád [°C]	cena kotle		cena zásobníku		cena otop. ploch [Kč]	cena ostatní [Kč]	cena celkem	
	automat [Kč]	ks. dříví [Kč]	automat [Kč]	ks. dříví [Kč]			automat [Kč]	ks. dříví [Kč]
80/60	92 345	81 400	61 036	183 108	43 300	171 793	368 474	479 601
60/45	92 345	81 400	30 518	122 072	61 915	171 793	356 571	437 180
45/30	92 345	81 400	30 518	91 554	102 080	171 793	396 736	446 827
Úspora je vyjádřena pro dvě referenční technologie: automatický kotel a kotel na kusové dříví, oba ve spojení s otopnými tělesy 80/60 °C. Referenční technologie jsou zvýrazněny barevně.				teplotní spád	úspora			
				[°C]	automat [%]	ks. dříví [%]	automat [%]	ks. dříví [%]
				80/60	0,0	-30,2	23,2	0,0
				60/45	3,2	-18,6	25,7	8,8
				45/30	-7,7	-21,3	17,3	6,8

Situace u automatického kotle je stejná, výrazně narostly náklady na technologii spalování kusového dříví díky použití kotle s výbornými technickými parametry. Tyto alternativy automatu a kotle na kusové dříví jsou srovnatelné z hlediska ekologie provozu. V případě použití automatického kotle však ušetříme až 30 % investic.

Tab. 29 Investiční náklady na vytápění, levný kotel, rekonstrukce

teplotní spád	cena kotle		cena aku. zásobníku		cena otop. ploch	cena ostatní	cena celkem	
	automat	ks. dříví	automat	ks. dříví			automat	ks. dříví
[°C]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
80/60	92 345	34 568	61 036	183 108	43 300	171 793	368 474	432 769
60/45	92 345	34 568	30 518	122 072	61 915	171 793	356 571	390 348
45/30	92 345	34 568	30 518	91 554	264 000	171 793	558 656	561 915
Úspora je vyjádřena pro dvě referenční technologie: automatický kotel a kotel na kusové dříví, oba ve spojení s otopnými tělesy 80/60 °C. Referenční technologie jsou zvýrazněny barevně.				teplotní	úspora			
				spád	automat	ks. dříví	automat	ks. dříví
				[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]
				80/60	0,0	-17,4	14,9	0,0
				60/45	3,2	-5,9	17,6	9,8
45/30	-51,6	-52,5	-29,1	-29,8				

Při započtení nákladů na stavební část podlahových otopných ploch představující položky za extrudovaný polystyren pod a beton nad topnými hady vychází všechny varianty s podlahovým vytápěním výrazně draž, a to o 29,1 až 51,6 %. Uvedená kalkulace je typická pro rekonstrukce. Je však třeba důsledně kontrolovat, zda podlahové topení má pro tento účel dostatečný výkon. Pokud ne, muselo by se přistoupit k zateplení objektu. Stavební část podlahových otopných ploch se pak většinou stává součástí rozpočtu zateplení.

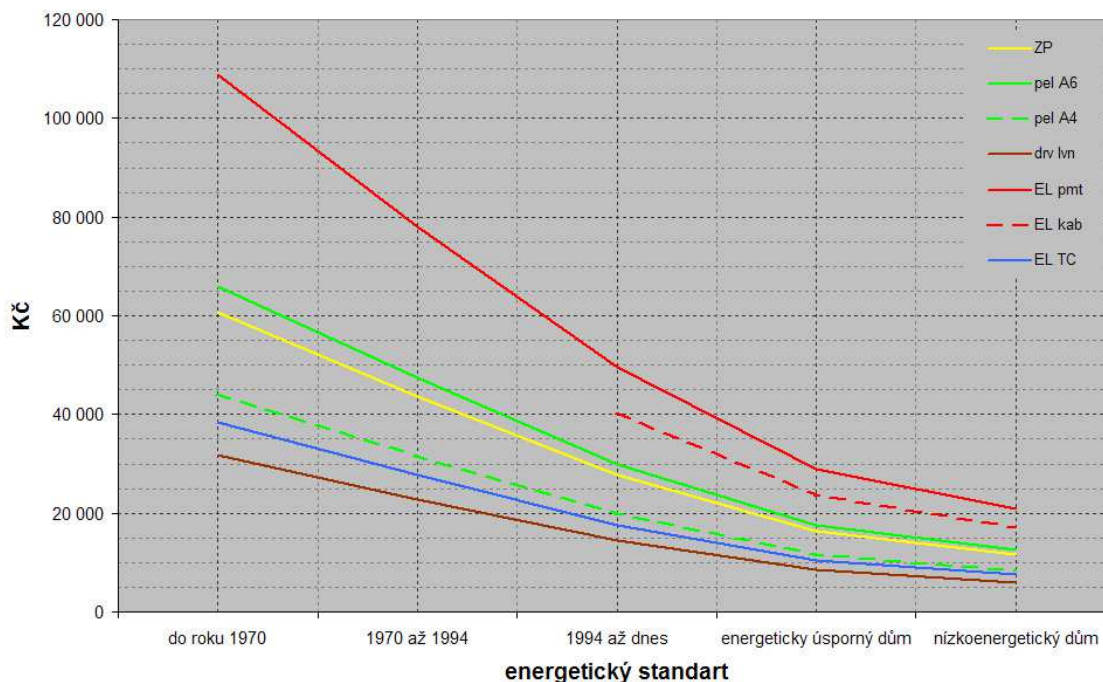
Tab. 30 Investiční náklady na vytápění, kvalitní pyrolytický kotel, rekonstrukce

teplotní spád	cena kotle		cena aku. zásobníku		cena otop. ploch	cena ostatní	cena celkem	
	automat	ks. dříví	automat	ks. dříví			automat	ks. dříví
[°C]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]	[Kč]
80/60	92 345	81 400	61 036	183 108	43 300	171 793	368 474	479 601
60/45	92 345	81 400	30 518	122 072	61 915	171 793	356 571	437 180
45/30	92 345	81 400	30 518	91 554	264 000	171 793	558 656	608 747
Úspora je vyjádřena pro dvě referenční technologie: automatický kotel a kotel na kusové dříví, oba ve spojení s otopnými tělesy 80/60 °C. Referenční technologie jsou zvýrazněny barevně.				teplotní	úspora			
				spád	automat	ks. dříví	automat	ks. dříví
				[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]
				80/60	0,0	-30,2	23,2	0,0
				60/45	3,2	-18,6	25,7	8,8
45/30	-51,6	-65,2	-16,5	-26,9				

U této varianty je největší cenový rozdíl mezi automatickým kotlem s otopnými tělesy 80/60 °C a kotlem na kusové dříví s podlahovou otopnou plochou který dosahuje 65,2 %.

Obecně lze říct, že technologie s kotlem na kusové dříví jsou investičně nákladnější (17,2 %) díky potřebě několikanásobné velikosti akumulčního zásobníku. To však částečně vyrovnává kotel asi s třetinovou cenou. Pokud se jedná o environmentálně srovnatelné technologie, je rozdíl výraznější (30,2 %). Použití podlahových otopných ploch nepřináší dostatečné zmenšení akumulčních zásobníků, toto řešení je investičně nejméně výhodné.

6.3.3 Celkové náklady na vytápění

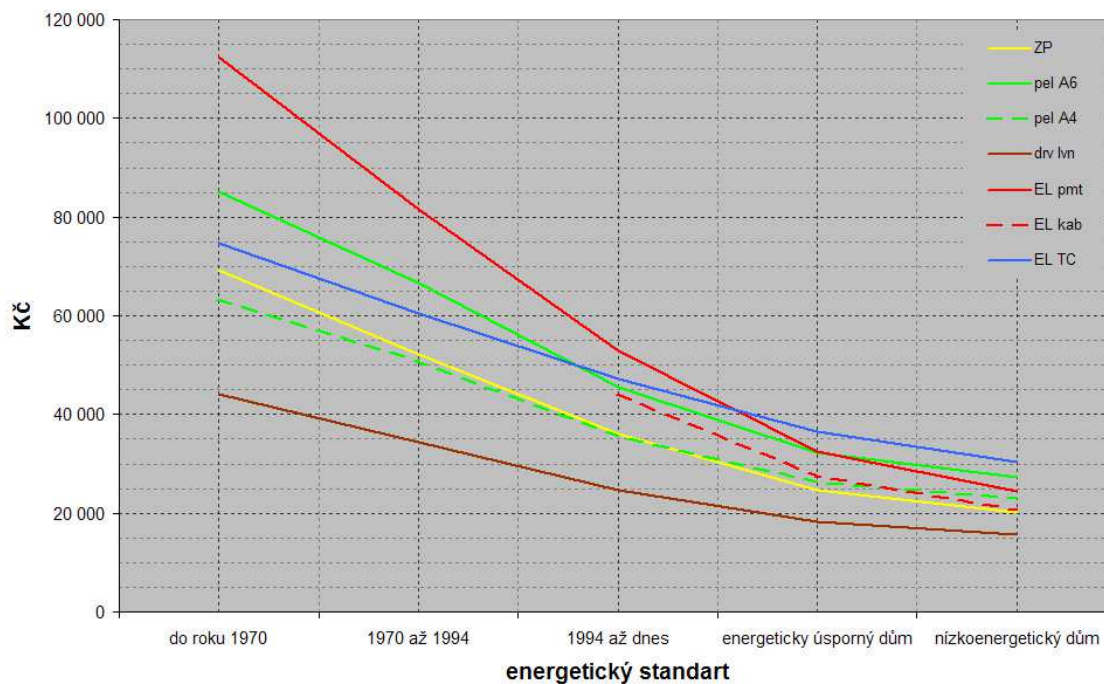


Obr 88 Provozní náklady na vytápění

Na obr. 88 jsou zobrazeny provozní náklady na paliva a energie pro vytápění. Pro všechny energetické standarty domů vychází nejvýhodněji vytápění kusovým dřívím. Další v pořadí je tepelné čerpadlo a peletový automat při ceně pelet 4 Kč/kg. Až o 100 % dražší je vytápění zemním plynem a peletami při ceně 6 Kč/kg. Vytápění elektrickou energií (sazba D26 a D45) je pak až o 250 % nákladnější ve srovnání s vytápěním kusovým dřívím.

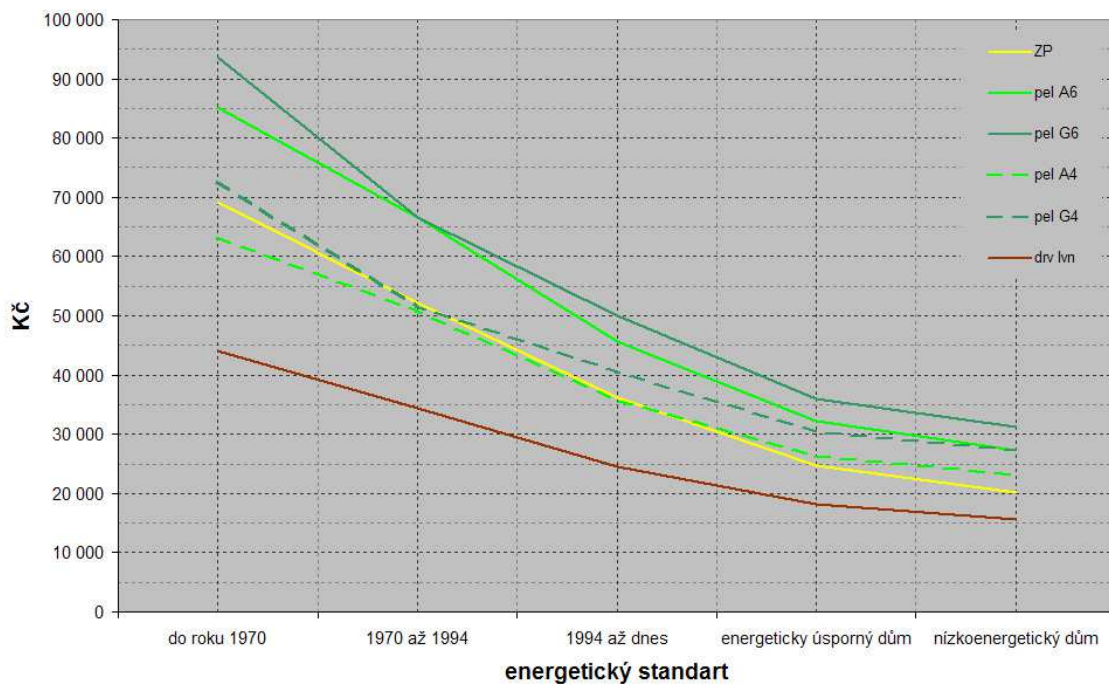
Uvedené jsou analýzy zkreslující, protože neuvažují s investičními náklady analyzovaných technologií. Tuto skutečnost napravuje až nový výstup uvedený na obr. 89 a následujících. Dále uvedené výstupy jsou rozšířením původních analýz autora [KLEPÁRNÍK, 2008a, KLEPÁRNÍK, 2008b; KLEPÁRNÍK, 2010c].

Výstup na obrázku 88 je srovnatelný s obdobnými výpočty, často publikovanými v tisku. Dokonce na webovém portálu TZB-Info existuje online kalkulačka [TZB-INFO, 2013a], často citovaná, která porovnává pouze provozní náklady na palivo jednotlivých způsobů vytápění. V poslední době došlo k nápravě a je zveřejněna, bohužel zatím méně známá, nová kalkulačka [TZB-INFO, 2013b], která umožňuje porovnání technologií z hlediska celkové spotřeby energie v domácnosti.

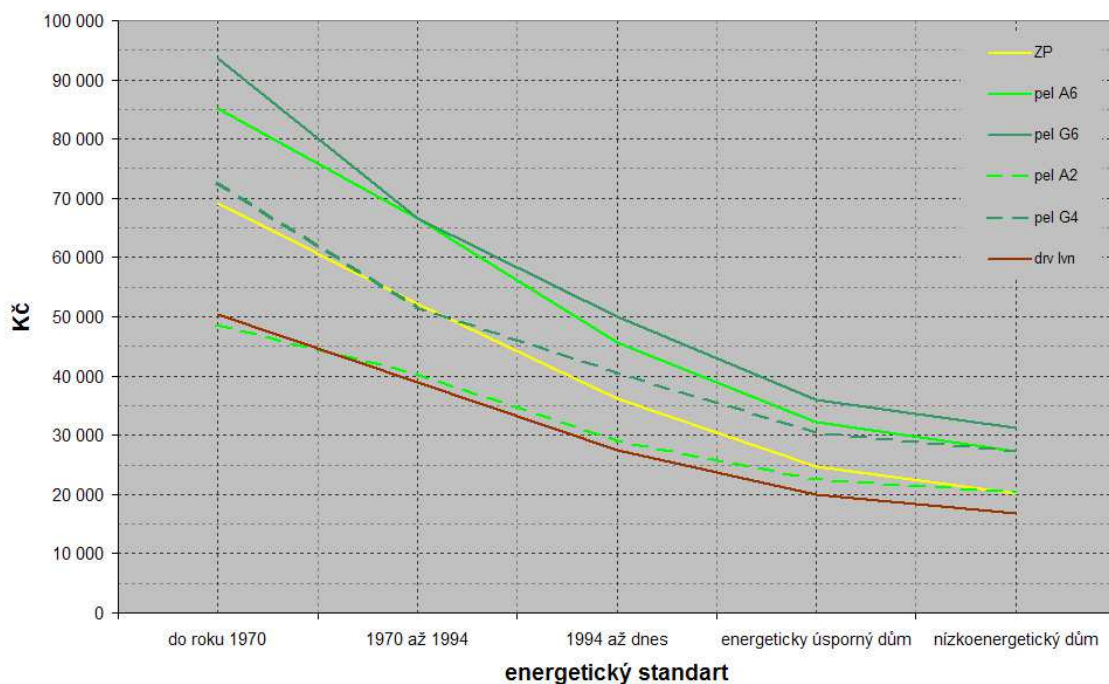


Obr 89 Celkové náklady na vytápění, kotle na biomasu bez akumulace

Zde je uvažováno s vytápěním tuhými biopalivy bez využití akumulčních nádrží. Vytápění kusovým dřívím je nejlevnější. Následuje vytápění zemním plynem s téměř shodnými náklady, jako vytápění peletami při ceně 4 Kč/kg v kotli s retortovým hořákem české výroby. Dražší pelety jsou konkurenceschopným palivem pouze v neplynofikovaných oblastech. Vytápění tepelným čerpadlem může být vhodnou alternativou k peletové kotli v objektech s velkou spotřebou energie, naopak vytápění elektřinou přímotopy nebo akumulčně je výhodné v objektech s velmi nízkou spotřebou energie. Na obr. 90 je porovnání běžného peletového automatu s kotlí Guntamatic pro cenové rozpětí paliva 4 až 6 Kč/kg. I přes vyšší investiční náklady kotle Guntamatic vychází celkové náklady obdobně jako u levných automatů, zvláště při větší spotřebě paliva. Je to dáno vyšší životností a větší účinností spalování v těchto kotlích. Nevýhodou je potřeba 2,5 až 3krát vyšší počáteční investice a nemožnost použití méně kvalitního, levnějšího paliva (agropeleta, hnědé uhlí). Tato skutečnost je zobrazena na obr. 91.



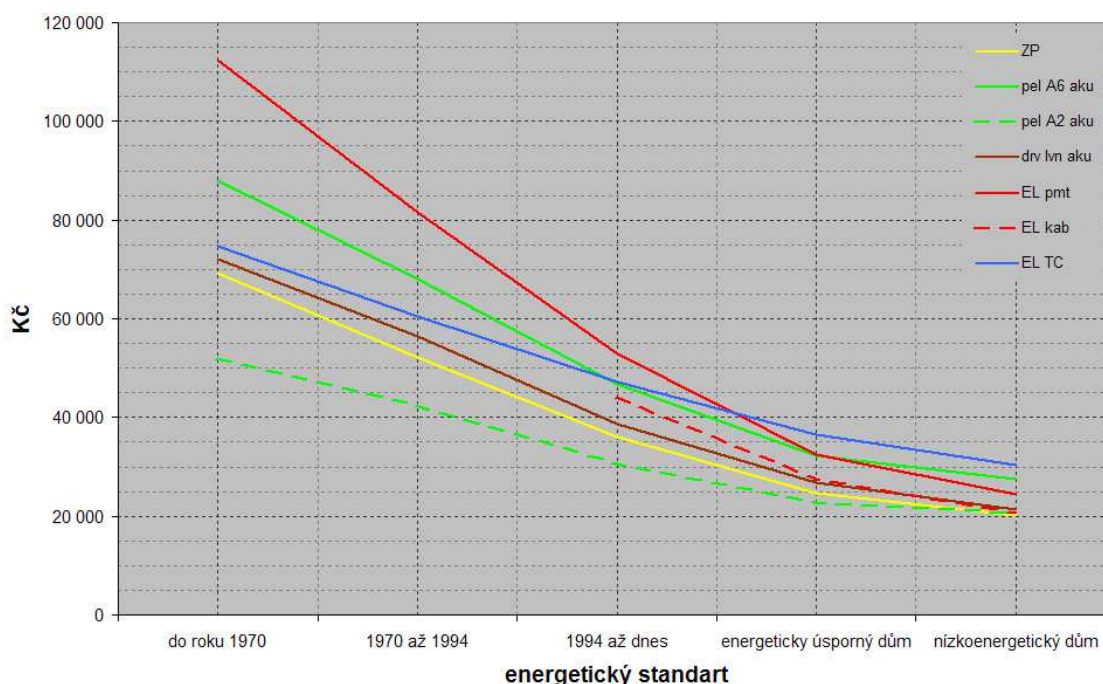
Obr 90 Celkové náklady na vytápění, bez akumulace, porovnání automatických kotlů s retortovým hořákem a kotlů Guntamatic



Obr 91 Celkové náklady na vytápění, bez akumulace, obdoba obr. 90, jen automatický kotel s retortovým hořákem využívá hnědé uhlí ořech 2 v ceně 2,60 Kč/kg

Automatický kotel s retortovým hořákem je zde použit s palivem hnědé uhlí frakce ořech 2. Celkové náklady jsou srovnatelné s vytápěním kusovým dřívím, ovšem s nesrovnatelně vyšším komfortem obsluhy. Při využití hnědé uhlí je vytápění o 35 až 80 % levnější než v kotlích Guntamatic. Pro zvýšení životnosti, účinnosti a komfortu obsluhy při současném snížení emisí škodlivin je možné použití kotlů na tuhá paliva v součinnosti s akumulací nádrží. Tím však dojde k výraznému nárůstu investice, zejména u kotlů na kusové palivo. Zde

však dojde k největšímu zvýšení komfortu obsluhy. Porovnání celkových nákladů na vytápění kotlů doplněných o akumulční nádrž spalujících tuhá paliva a alternativních zdrojů tepla je na obr. 92. Vytápění kusovým dřívím je zde srovnatelné s vytápěním zemním plynem téměř pro všechny energetické standardy. V plynofikovaných oblastech tak má tato alternativa opodstatnění pouze při nižších cenách palivového dříví, než je uvedeno na obr. 74 (soukromí vlastníci lesa, majitelé pilnic a pod.). Použití automatického kotle s retortovým hořákem je ekonomicky nejefektivnější, a to v celém rozsahu energetických standardů. Vytápění elektřinou je nejzajímavější akumulčním způsobem, a to v objektech s velmi malou spotřebou energie. Vzhledem k tomu, že tento zdroj využívá podlahové otopné plochy, nelze jej využít při vyšších měrných spotřebách energie než 100 až 120 kWh/m²a. Uvedené technické omezení lze řešit záměnou podlahové otopné plochy za stěnovou, použití tohoto způsobu vytápění ve stavbách nad uvedený limit je však ekonomicky nevýhodné.

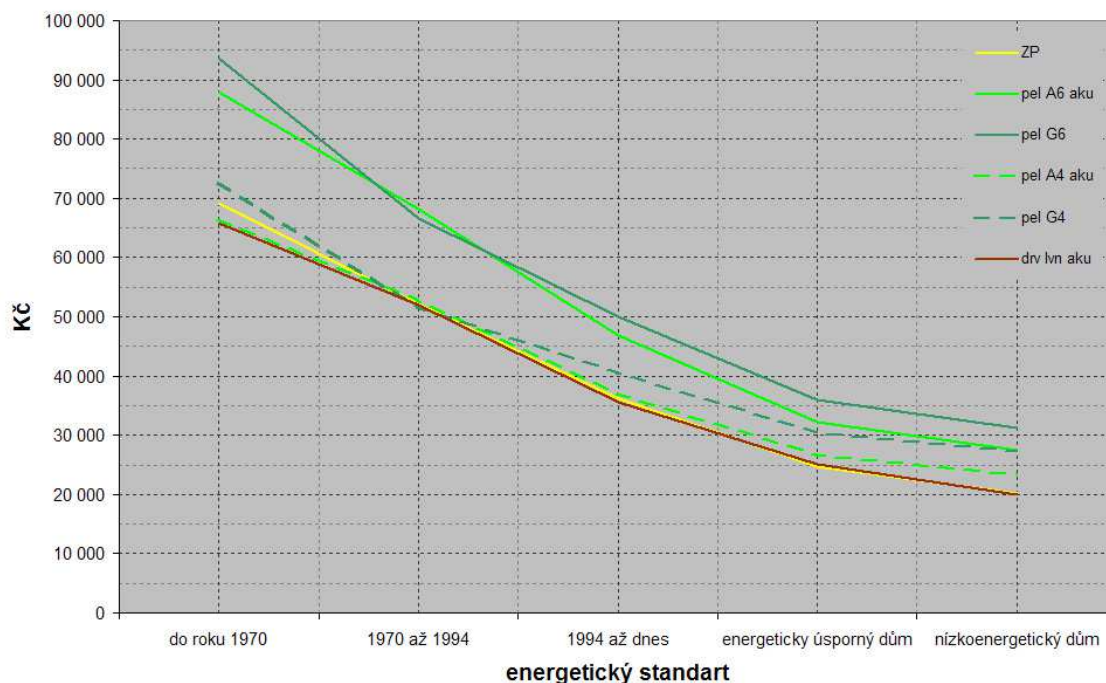


Obr 92 Celkové náklady na vytápění, kotle na biomasu s akumulací

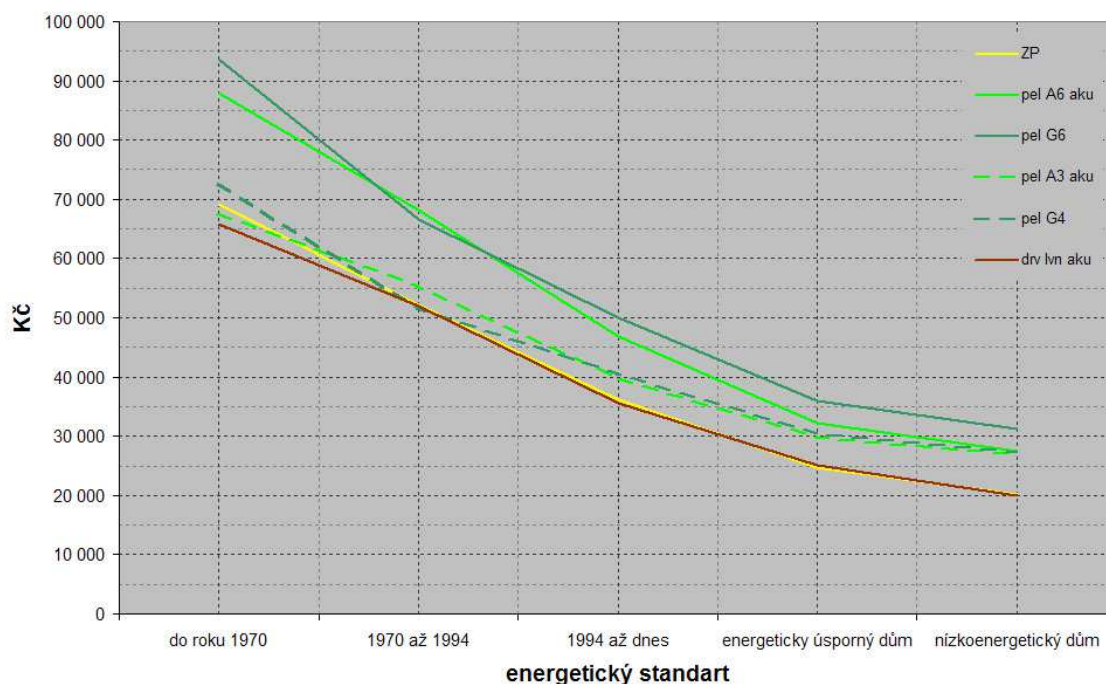
Dle firemních materiálů [GUNTAMATIC, 2010] není třeba kotle Guntamatic provozovat s akumulční nádrží i při zachování vysoké životnosti. To je dáno speciální konstrukcí spalovací komory, použitými keramickými materiály, extrémně nízkým vodním obsahem kotle a především nízkoteplotní verzí výměníku tepla. Velmi zajímavé porovnání těchto kotlů s kotli s retortovým hořákem při použití stejných paliv (bílá peleta) nabízí obr. 93.

Pro objekty s vyšší spotřebou energie jsou celkové náklady na vytápění obou technologií srovnatelné. Pro objekty s velmi nízkou spotřebou energie je o 20 % levnější použití automatu s retortovým hořákem. Guntamatic zde umožňuje použití nové technologie v podobě kompaktního závěsného kotle Therm 7, který významně šetří prostor (nevyžaduje kotelnu, pouze odpovídající výklenek). Kombinace automatu s retortovým hořákem a akumulční nádrže výrazně snižuje riziko nízkoteplotní koroze. Díky tomu je možno využít agropelety, které jsou charakterizovány vysokým podílem chlóru. Mimo to mají nižší výhřevnost a nízkou teplotu tavení popela což přispívá k nižší účinnosti spalování. Na druhé straně jsou o 30 až 50 % levnější ve srovnání s bílou peletou, lze tedy předpokládat nižší náklady na vytápění. Výsledek této analýzy je proveden na obr. 94. Předpoklad nižších nákladů se nepotvrdil (provedeno pro agropeletu z obilné slámy). Náklady jsou srovnatelné s vytápěním

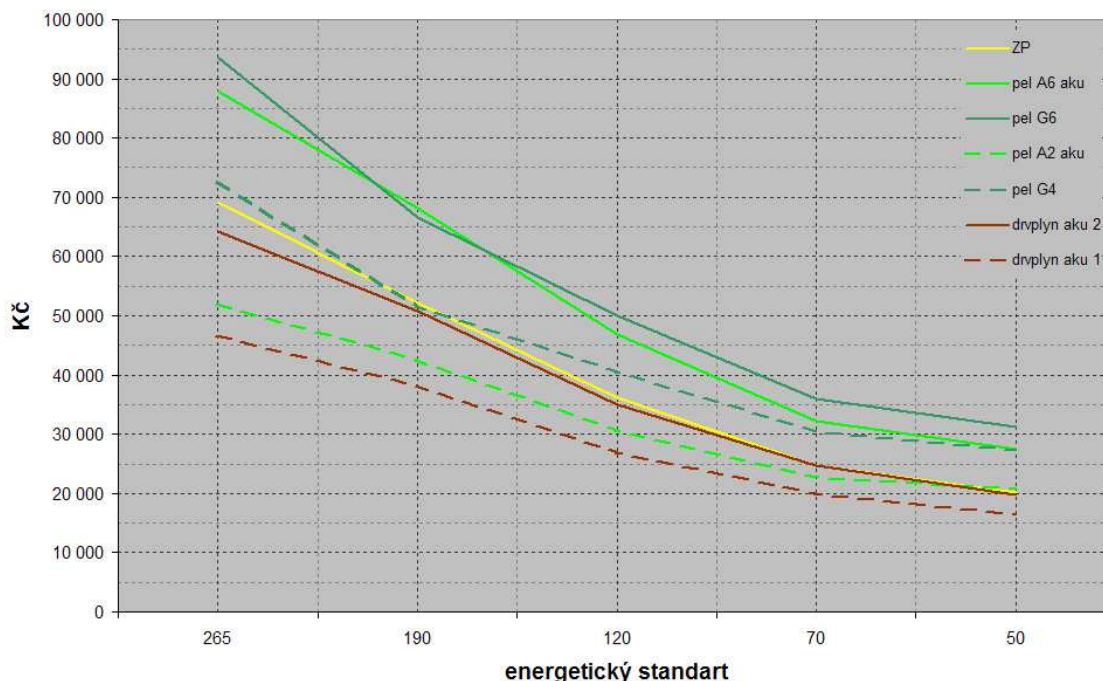
v kotlích Guntamatic za použití kvalitní bílé pelety. Využití agropelet z důvodů jejich problematických vlastností v malých zdrojích tepla není v současné době běžné. Agropeleta je však velmi široký pojem zahrnující biomasu různého původu a tedy i vlastností. Velmi perspektivně se jeví některé směsi, v této oblasti probíhá intenzivní výzkum, existují dobré předpoklady budoucího využití těchto paliv. Obdobný stav je popisován i v zahraniční literatuře, například [Oberberger, 2010].



Obr 93 Celkové náklady na vytápění, kotle na biomasu s akumulací (mimo Guntamatic), porovnání automatických kotlů s retortovým hořákem a kotlů Guntamatic pro stejné ceny paliv.

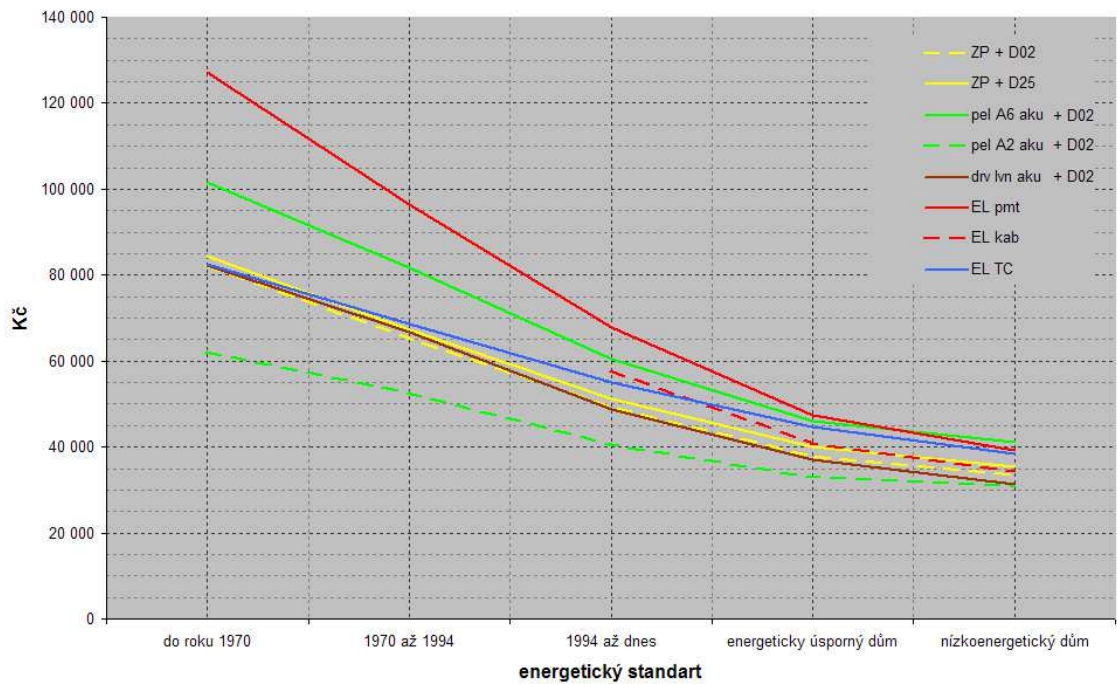


Obr 94 Celkové náklady na vytápění, kotle na biomasu s akumulací (mimo Guntamatic), porovnání automatických kotlů s retortovým hořákem a kotlů Guntamatic. Kotel s retortovým hořákem využívá agropelety v ceně 3 Kč/kg

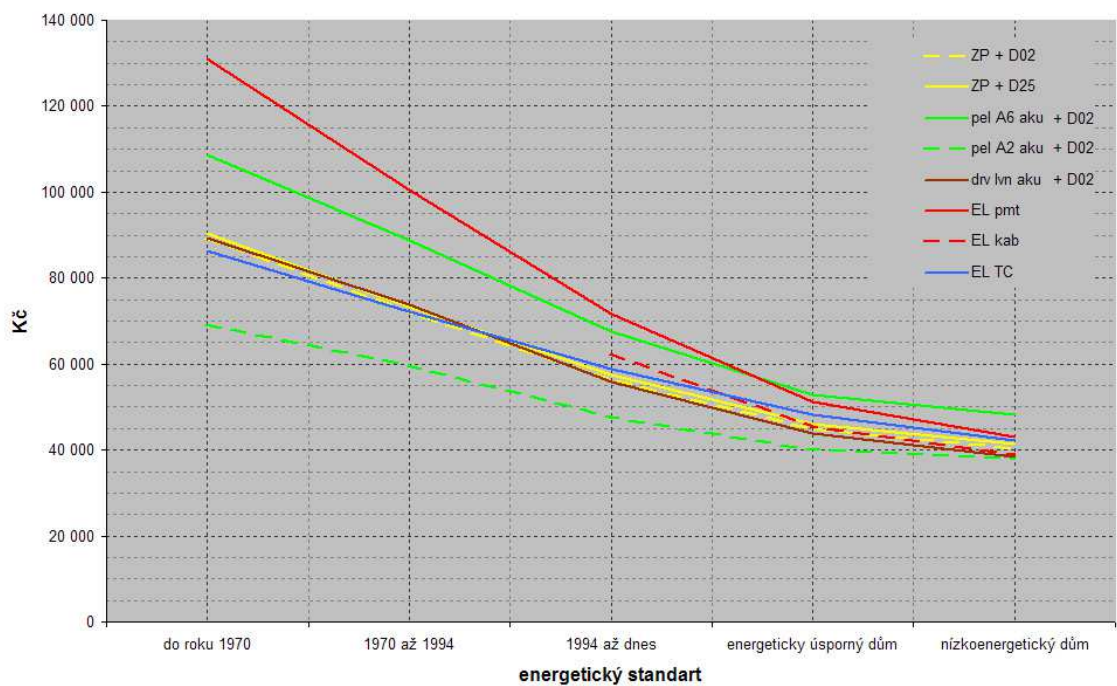


Obr. 95 Celkové náklady na vytápění, kotle na biomasu (mimo Guntamatic) s akumulací, porovnání automatických kotlů a pyrolytických kotlů při ceně dříví 2,4 Kč/kg a 1 Kč/kg, cena pelet 6 a 4 Kč/kg, cena HU O2 2,6 Kč/kg.

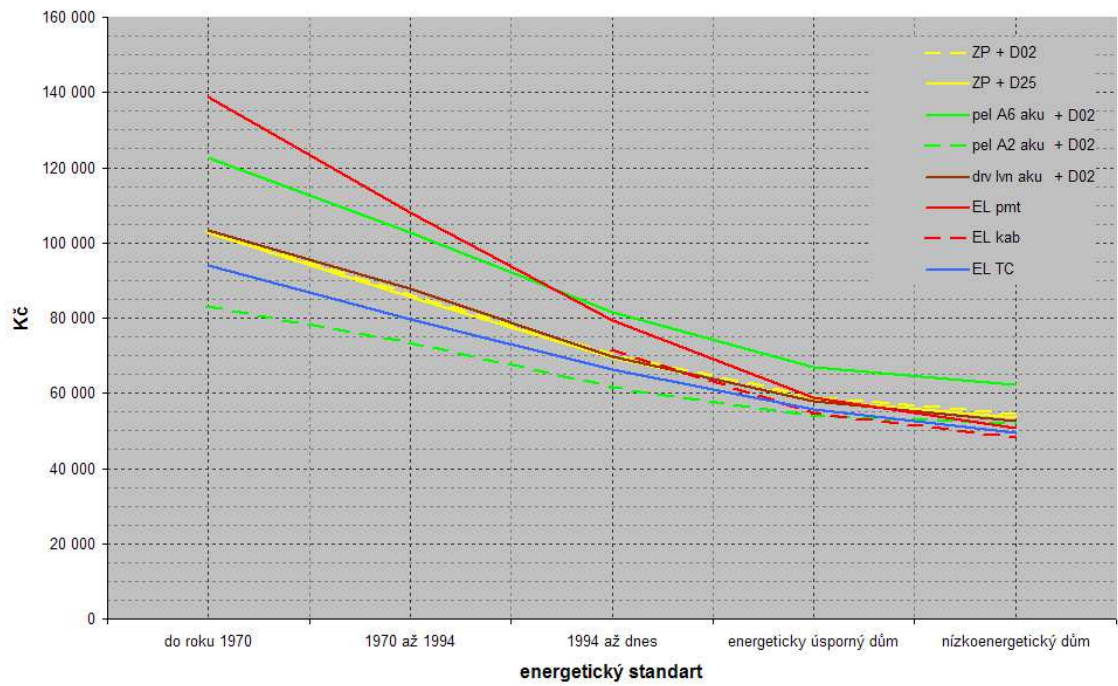
Uvedené analýzy popisují pouze celkové náklady na vytápění. Přesnější je však analyzovat celkové náklady na veškeré energie spotřebované v objektu. Pro tyto případy byly předchozí data doplněny o spotřebu energie na přípravu TV a spotřebu elektrické energie ostatních spotřebičů. Zvláště při velkém stupni využití elektrické energie v domácnosti tak mohou být podstatně změněna uvedená fakta, zejména v oblasti vytápění elektřinou. Uvedená situace je znázorněna na obr. 96 až obr. 98 (porovnej s obr. 92). Vytápění tepelným čerpadlem je zajímavou alternativou automatickým kotlům na tuhá paliva, dosahuje v celém rozsahu energetických standardů srovnatelné náklady jako vytápění zemním plynem (obr. 97). To platí při spotřebě el. energie 3 000 kWh/a, což je běžná spotřeba mladé čtyřčlenné rodiny. Při vysoké spotřebě el. energie 6 000 kWh/a je využití tepelného čerpadla výhodnější než využití zemního plynu (obr. 98). V domech s velmi nízkou spotřebou energie je výhodné využití elektrických přímotopů a akumulárního elektrického vytápění s topnými kabely v podlaze.



Obr 96 Celkové náklady na energie při spotřebě el. energie na ostatní spotřebiče ve výši 1 500 kWh za rok. Kotle na biomasu s akumulací.



Obr 97 Celkové náklady na energie při spotřebě el. energie na ostatní spotřebiče ve výši 3 000 kWh za rok. Kotle na biomasu s akumulací.



Obr 98 Celkové náklady na energii při spotřebě el. energie na ostatní spotřebiče ve výši 6 000 kWh za rok. Kotle na biomasu s akumulací.

7 Automatické zapalování paliva

7.1 Současný stav oboru

Investičně nejlevnější a technicky nejjednodušší je ruční zapálení paliva za použití podpalovače (suchý líh, PePo a pod.) nebo plynového hořáku. Kotle na pelety mají pohotovostní režim při kterém dochází k hoření malého množství paliva, což zaručuje minimální spotřebu. Při požadavku na dodávku tepla se pouze rozhoří větší množství paliva odpovídající požadovanému výkonu. Automatické zapalování (zapalování studeného kotle bez přítomnosti obsluhy) je možné realizovat horkým vzduchem, pomocí žhavicí elektrody nebo keramického žhavicího tělíska. Všechny způsoby využívají elektrickou energii, u sériově vyráběných kotlů je horkovzdušné zapalování běžnější [SOVIŠ, 2007].

Nejčastěji používané automatické zapalování paliva u peletových kotlů dostupných na trhu ČR je realizováno použitím horkovzdušného generátoru. Mnoho výrobců kotlů využívá existující horkovzdušné generátory vyráběné jinou firmou zpravidla pro jiné účely. Velmi oblíbeným a často používaným generátorem horkého vzduchu je ruční horkovzdušná svářečka plastů Leister S. Uvedné řešení používá například firma Benekov u kotlů řady S nebo R (obr. 99). Horký vzduch je pomocí upravené trysky s nástavcem směřován do středu hromádky pelet na roštu. Teplo je od zdroje k palivu sdíleno konvekcí využitím vzduchu dopravovaného ventilátorem z okolí. Zapalovací jednotka je tak chráněna před vysokými teplotami na roštu při plném provozu kotle, dopravovaný vzduch ale způsobuje převalování až rozfoukání pelet což prodlužuje celkovou dobu zapálení.



Obr. 99. Horkovzdušný generátor Leister [BENEKOV, 2013b]

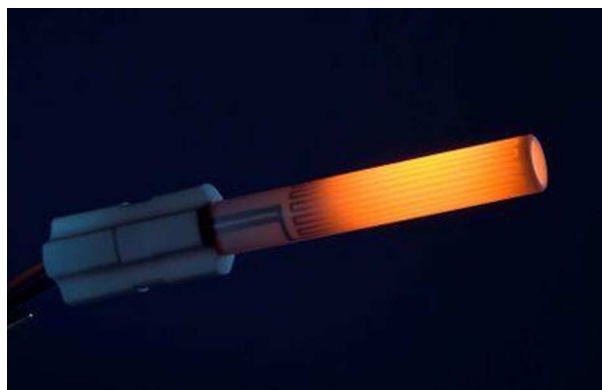


Obr.100. Žhavicí elektroda [PONAST, 2013]

Automatické zapalování žhavicí elektrodou je kontaktním způsobem zapalování. Teplo se ze žhavicí elektrody na pelety přenáší vedením. Elektroda je i při plném výkonu kotle umístěna v prostoru hořáku a tedy tepelně zatěžována. Uvedený způsob používá firma Ponast (obr. 100).

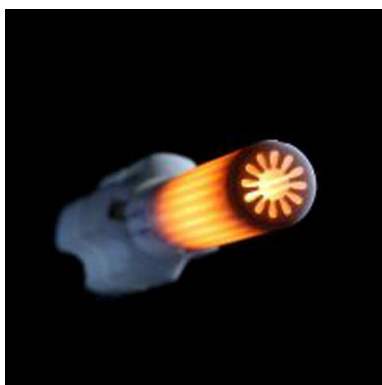
Poslední možností automatického zapalování je použití keramického tělíska ve tvaru dutého válce. Ve stěně válce je instalován elektrický odpor, který prostřednictvím Joulova tepla nažhaví tělísko. Ve vertikálně orientovaném dutém válci se při teplotním rozdílu více než 1000 Kelvinů vytvoří významná volná konvekce která je zdrojem proudu horkého vzduchu a to bez ventilátoru. Uvedená technologie je tedy kombinací obou předchozích způsobů, jde o novinku v oblasti automatického zapalování tuhých biopaliv (obr. 101 až 102).

Zapalovací element o vysoké teplotě je umístěn v keramické patici odolávající vysokým teplotám. Vzduch může proudit skrz vnitřní povrch a okolo vnějšího povrchu zapalovacího tělíska. Stálá teplota tělíska je až 1 000 °C, s krátkodobým zvýšením teploty do 1 300 °C. Životnost asi 20 000 zapalovacích cyklů, je závislá na pracovních podmínkách. Tělíska jsou kompletně elektricky izolována (ze všech stran), takže nehrozí kontakt s živou částí. Použité materiály jsou odolné oxidaci a korozi. Také jsou odolné vůči přehřátí, na rozdíl od běžných technologií, kde výpadek ventilátoru způsobuje problémy. Rychlé zapálení horkým vzduchem díky extrémně vysokým teplotám a ideální geometrii systému předávání tepla (vnitřní žebrování elementu na obr. 102). Tělíska jsou chráněna před napečením tavicího se popela díky kovové trysce, ve které jsou uložena.

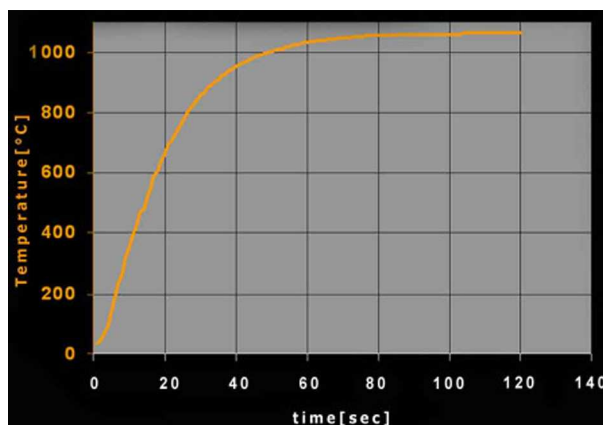


Obr. 101. Zapalovací keramické tělísko v patici [RAUSCHERT, 2010]

Standardní zapalovací tělíska je možno instalovat do ocelové trubky o vnitřním průměru 18mm, délka tělíska je 94mm, napájení 230 Voltů střídavých, nebo 120 Voltů. Tělísko ve tvaru hvězdy je určeno pro zapálení těžce zapalitelných tuhých paliv. Teplota zapalujícího vzduchu je zvýšena o 150°C ve srovnání se standardním tělískem (obr. 102). Rozměry a napájení jsou stejné jako u standardního tělíska. Tenké tělísko je vhodné pro použití v ocelové trubce o vnitřním průměru 14mm, délka tělíska je 94mm, napájení 230 nebo 120 Voltů. Na požadavek lze vyrobit libovolný tvar tělíska.



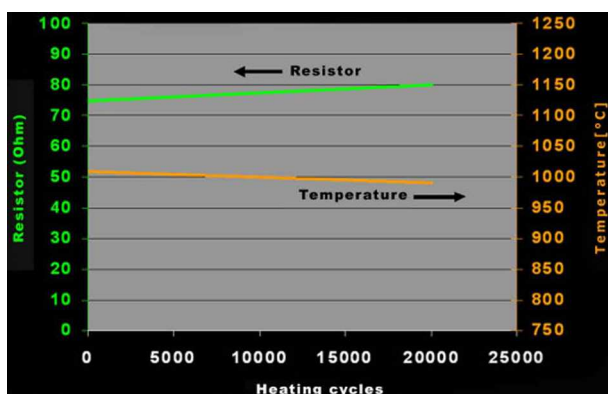
Obr. 102. Zapalovací keramické tělísko s vnitřním žebrováním [RAUSCHERT, 2010]



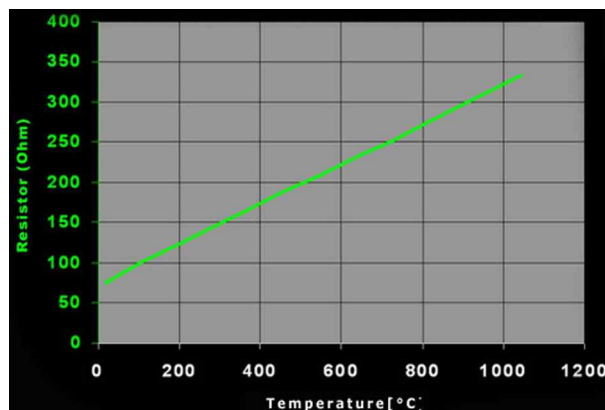
Obr. 103. Rychlost ohřevu tělíska z obr. 101. [RAUSCHERT, 2010]

Sestava zapalovače je složena z keramického tělíska s horkým povrchem, vysoké teplotě odolnému konektoru pro elektrické připojení, kabelu s konektorem dle požadavků zákazníka a na zakázku vyrobených kovových komponent, jako jsou upevňovací systém, ocelová trubka, a kovová tryska. Tělísko je nažhaveno na teplotu 1 000 °C v rekordně krátké době 60 až 90 sekund (obr. 103). Životnost je až 20 000 zapalovacích cyklů, přičemž dochází k nepatrnému navyšování odporu, což vede ke snížení provozní teploty dle obr. 104 (odpor je uveden při

teplotě 20 °C). Závislost odporu žhaveného tělíska na jeho teplotě je lineární, odpovídá běžným PTC čidlům teploty (obr. 105). Uvedenou skutečnost lze využít v systémech měření a regulace.



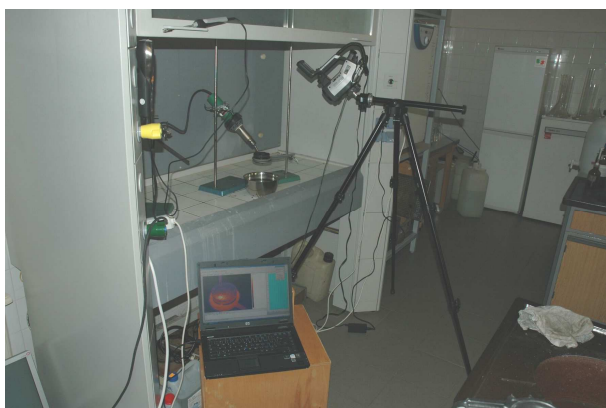
Obr. 104. Změna elektrického odporu chladného tělíska a provozní teploty během životnosti (pro tělíska z obr. 101). [RAUSCHERT, 2010]



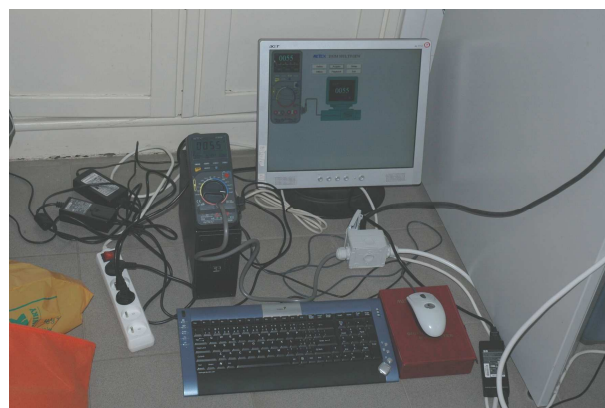
Obr. 105. Změna elektrického odporu při ohřevu tělíska (pro tělíska z obr. 101). [RAUSCHERT, 2010]

7.2 Materiál a metodika experimentů

Mezi laickou i odbornou veřejností koluje mnoho rozporuplných názorů týkajících se spotřeby elektrické energie při zapalování. Při osobní konzultaci s výrobcem peletových kotlů, který nepodporuje systém automatického zapalování, mi jako hlavní důvod sdělil vysokou energetickou náročnost elektrického zapalování. Zjistit spotřebu elektrické energie zapalovacího cyklu z informačních materiálů výrobců kotlů je nemožné. Z toho důvodu jsem se rozhodl pro sérii experimentů, jejichž cílem je odpovědět na několik následujících otázek. Jaká je spotřeba elektrické energie při automatickém zapalování pelet? Liší se tato hodnota podle druhu pelet? Jaký vliv má geometrie zapalovací trysky a teplota horkého vzduchu na spotřebu energie při zapalování?



Obr. 106 Pracoviště iniciace paliva s instalovanou termokamerou

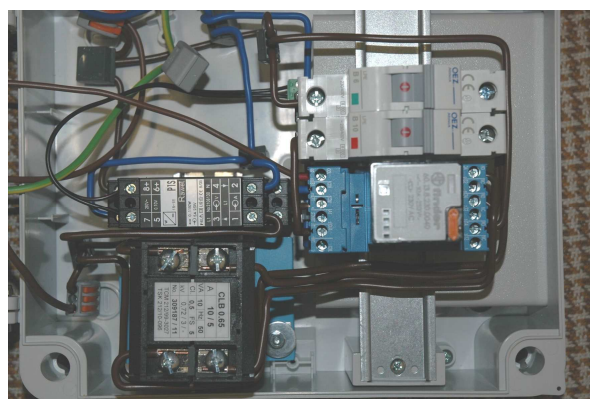


Obr. 107 Pracoviště iniciace paliva, pohled na systém měření činného výkonu horkovzdušného generátoru

Za účelem zjištění odpovědí na uvedené otázky byl zkonstruován tester iniciace paliva [KLEPÁRNÍK, 2009b]. Horkovzdušný zapalovací agregát tvoří přístroj standardně určený pro svařování plastů, Leister S, který umožňuje regulaci teploty v širokých mezích a změnu používané trysky. Vyústění trysky lze libovolně orientovat vůči roštu s navázkou pelet. Celý systém je doplněn o kontinuální měření teplotního pole zapalovaných pelet termokamerou a měření činného výkonu zapalovacího agregátu za účelem zjištění spotřeby elektrické energie. Sestava celého měřicího řetězce je zobrazena na obrázku 106 a 107. Systém měření činného výkonu byl realizován jako funkční vzorek [KLEPÁRNÍK & NEVRKLA, 2010] a dále zdokonalen pro samostatné použití doplněním o modul analogově–digitálního převodníku, o komunikaci prostřednictvím USB rozhraní s nadřazeným PC a jistící obvody silové části zapojení (obr. 108 a 109) [KLEPÁRNÍK, 2010a].



Obr. 108 Celkový pohled na sestavenou měřicí jednotku činného výkonu.



Obr. 109 Pohled na část vnitřního zapojení měřicí jednotky z obr. 108.

Při teoretickém rozboru problematiky automatického zapalování byly stanoveny následující hypotézy:

- H1: Spotřeba elektrické energie na jeden cyklus zapálení je menší než 0,1kWh.
- H2: Se snižující se teplotou horkého vzduchu roste doba zapálení.
- H3: Se snižující se teplotou horkého vzduchu roste spotřeba energie.
- H4: Geometrie trysky a její pozice vůči roštu je méně významná než teplota horkého vzduchu.

Jako testovaný materiál byly použity bílé pelety vyrobené v naší laboratoři na granulačním lisu MGL200, který byl pořízen v roce 2009 díky řešení projektu FRVŠ [Neruda, 2009]. Vstupním materiálem byly hobliny a piliny z výroby vzniklé rozměrovou egalizací vyráběných biodesek. Vstupní vlhkost materiálu byla 11 %. Pro porovnání byl proveden test iniciace pelet vyrobených na téže lisu ze sena o vlhkosti 16 %. Posledním druhem pelet byly pelety ze slunečnicových slupek odebrané u výrobce linky MGL 200.

Při každém experimentu bylo naváženo na rošt iniciačního zařízení 30 g pelet. Rošt byl osazen do předem připravené pozice vůči trysce horkovzdušného generátoru. Byla zaznamenána vzdálenost vyústění trysky od povrchu paliva a sklon trysky vzhledem k roštu. Byl spuštěn záznam teplotního pole a záznam činného výkonu. Poté byl spuštěn vlastní generátor horkého vzduchu. Celý proces zapálení byl sledován vizuálně a jakékoliv anomálie

v procesu byly zaznamenány do deníku. Šlo především o sledování pohybu pelet způsobenému proudem vzduchu z dmyhadla horkovzdušného generátoru.

S bílou peletou proběhly celkem čtyři série experimentů lišící se nastavením různé polohy trysky vůči roštu a různé teploty horkého vzduchu. Agropelety byly zkoušeny pouze při jednom nastavení testeru iniciace. Nastavení provozních parametrů a zápis pozorovaných změn při jednotlivých experimentech uvádí tabulka č. 31. Dále definuji jednotlivé sledované parametry.

Sklon trysky α [°] je úhel, který svírá osa trysky horkovzdušného generátoru a rovina roštu.

Vzdálenost trysky h [mm] je vzdálenost mezi vyústěním trysky a povrchem odvážené dávky pelet, měřeno ve svislém směru.

Teplota horkého vzduchu t [°C] je nastavena potenciometrem generátoru a měřena teploměrem Testo s termočlánkovým snímačem. Teplota je měřena v místě vyústění proudu vzduchu z trysky vždy při změně trysky a změně polohy potenciometru. Změna trysky ovlivňuje hydraulické odpory v okruhu dmyhadla a tím množství dodávaného vzduchu, což se projeví změnou teploty.

Doba zapálení τ [s]. Synchronně se zapnutím generátoru horkého vzduchu byly zapnuty stopky. Proces zapalování byl sledován vizuálně. Jakmile došlo k zapálení prchavé hořlaviny (vyšlehnutí plamene) a trvalému hoření (po dobu tří sekund) byl generátor vypnut synchronně se zastavením časomíry.

Tab. 31 Nastavení provozních parametrů a zápis pozorovaných změn při jednotlivých experimentech

příznaky	vzorek č.	tryska č.	h [mm]	α [°]	t [°C]	τ [s]	m [g]	pozn.
	PE02	1	20	30	max	179	20	
	PE03	1	20	30	max	126	20	
R	PE04	1	20	30	max	250	30	
P	PE05	1	20	30	max	103	31	
*	PE06	2	20	60	max	79	30	
X	PE07	2	20	60	max	56	30	horký generátor nevychladl od předchozího měření
X	PE08	2	20	60	max	85	30	
R	PE09	2	20	60	max	69	30	intenzivní rozfoukávání před iniciací, atypický průběh teplot
o	PE10	2	20	60	max	61	30	dobře postavená, zahřátá hmota v kavitě
*	PE11	2	20	60	6	130	30	snížení teploty z max. na st. 6
P	PE12	2	20	60	6	176	30	
P	PE13	2	20	60	6	151	30	
N, X, *	PE14	2	30	60	6	600	30	změna vzdálenosti vyústění trysky
R, *	PE15	2	15	60	6	166	30	změna vzdálenosti vyústění trysky
P, *	PE16	2	20	60	6	189	30	změna vzdálenosti vyústění trysky
P	PE17	2	20	60	6	201	30	
0	PE18	2	20	60	6	153	30	pelety absolutně bez převalování
R, N	PE19	2	20	60	6	220	30	agropeleta - seno, nezapálilo se
R, N	PE20	2	20	60	6	227	30	agropeleta - seno, nezapálilo se
	PE21	2	20	60	6	180	30	agropeleta - slunečnice, hořela

Navážka m [g]. Před každým testem zápalnosti pelet bylo na laboratorní rošt naváženo 30 gramů pelet. Před aplikací do držáku roštu je poklepáním o hranu stolu docíleno rovnoměrného rozvrstvení navážky. Při pokusech s menším množstvím navážky (10 a 20

gramů) bylo zjištěno intenzivní rozfoukávání pelet. Množství pelet tedy musí odpovídat velikosti roštu.

Příznaky. Jde o přehledný způsob zápisu o chování jednotlivých vzorků pelet během testu zapálení. Celkem je definováno šest příznaků:

Příznak rozfoukání (R) a převalování (P) pelet. Následkem působení proudu vzduchu z trysky často dochází k pohybu pelet během fáze ohřevu, nebo již po iniciaci při hoření v době před vypnutím horkovzdušného generátoru. Uvedená skutečnost má za následek prodloužení doby zapálení či dokonce znemožnění zapálení (dojde-li k nadměrnému pohybu během fáze ohřevu), nebo může dojít k destabilizaci či zhasnutí již hořících pelet (při rozfoukání pelet již v době hoření). Převalování pelet je jemné rozfoukání, které způsobí pouze prodloužení doby zapálení dojde-li k převalování pelet ve fázi ohřevu. Na fázi hoření po iniciaci paliva již převalování nemá vliv.

Příznak nedošlo k zapálení (N). U některých vzorků, i při několikanásobné době průměrné doby působení horkého vzduchu nedošlo k zapálení pelet. Spotřeba energie je výrazně vyšší než obvykle, navíc však nedojde k zapálení. Energie je tedy vynaložena zbytečně. Četnost pokusů, kdy nedojde k zapálení je závislá na druhu pelet.

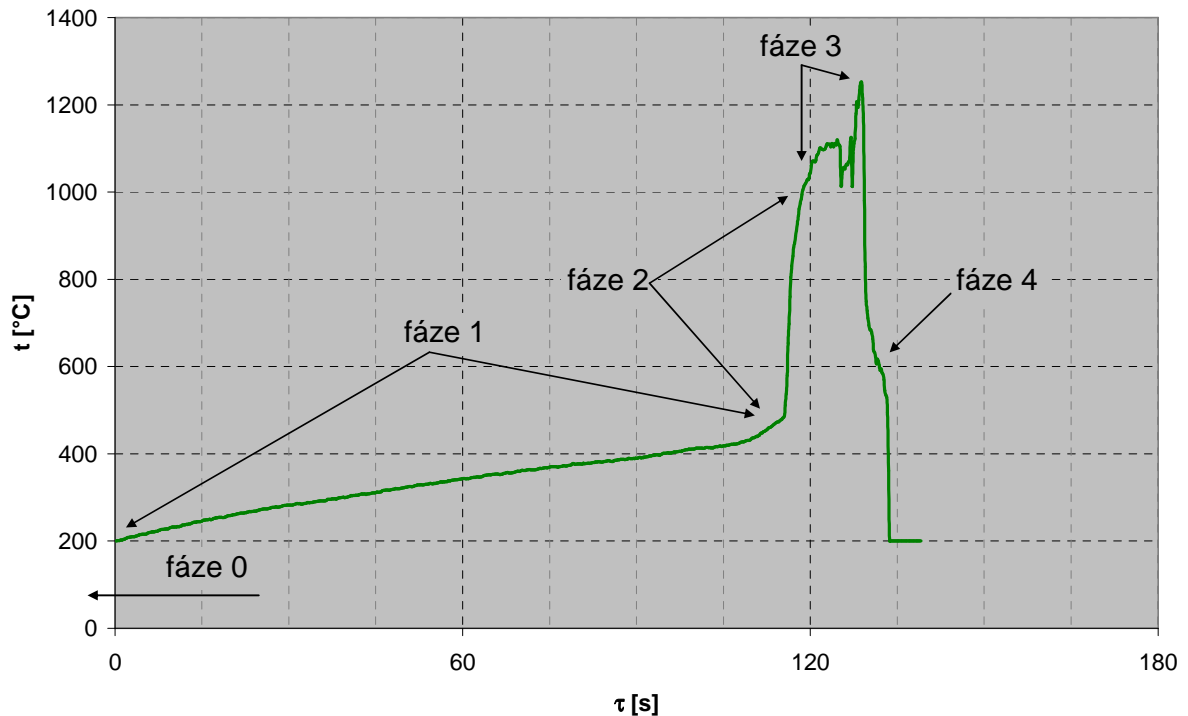
Příznak nevhodný vzorek k dalšímu zpracování (X). Obvykle odpovídá nestandardní situaci či nahodilé chybě měřicího zařízení, nebo nevhodnému uspořádání experimentu. Naměřená data svými hodnotami výrazně vybočují z průměrných hodnot statistického souboru. Typickým příkladem je použití horkovzdušného generátoru ve zkráceném intervalu, kdy nedošlo k vlastnímu ochlazení. To způsobuje zkrácení doby ohřevu vzorku a neodpovídá reálnému použití.

Příznak změna parametrů (*). Experimenty jsou několikrát opakovány pro stejné parametry. Důvodem je vyloučení nahodilých chyb aplikací statistiky. Měněnými parametry experimentu je druh pelet, druh trysky, sklon a vzdálenost trysky od roštu a teplota horkého vzduchu. Příznakem hvězdička je označeno každé číslo vzorku, při kterém došlo ke změně alespoň jednoho parametru. Následující vzorky, testované při stejných parametrech, jsou bez příznaku hvězdička (tab. 31, obr. 117 a obr. 121).

7.3 Výsledky a diskuse

7.3.1 Měření vývoje teplotního pole

Měření teplotního pole bylo prováděno termokamerou Flir S65. Vzhledem k instalovaným filtrům teplotních pásem nelze sledovat vývoj od teploty okolí (20 °C) až po teploty běžné při hoření (600 až 1 200 °C). Kamera byla nastavena na rozsah 200 až 1 500 °C a sledovaný vývoj teplot popsán na obr. 110 až 116 odpovídá tomuto intervalu. Z důvodu uvedeného technického omezení nebylo možné sledovat počátek zvyšování teploty v intervalu 20 až 200 °C. V tomto intervalu dochází k ohřevu paliva a uvolňování vlhkosti, v případě sledování termokamerou bychom nemohli sledovat mnohem podstatnější interval teplot zapálení, proto považují zvolené nastavení rozsahu teplot termokamery za optimální. Ukázka několika charakteristických termogramů vybraných ze záznamu konkrétního vzorku je na obr. 111 (data před vyhodnocením, obrázek je složen ze 14ti po sobě jdoucích snímků). Při vzorkovací frekvenci 6 Hz (6 termogramů za sekundu) byla na každém snímku nalezena maximální teplota v oblasti roštu, z těchto teplot byl sestaven graf vývoje teplot v čase. Typický příklad grafu je znázorněn na obr. 110, kde je možné rozlišit pět fází (fáze 0 až 4) s rozdílným průběhem vývoje teplot v každé z nich.



Obr. 110 Příklad vývoje teplot v jednotlivých fázích.
Svislá osa znázorňuje nejvyšší teploty v zapalovaných peletách. Vodorovná osa je osou času.

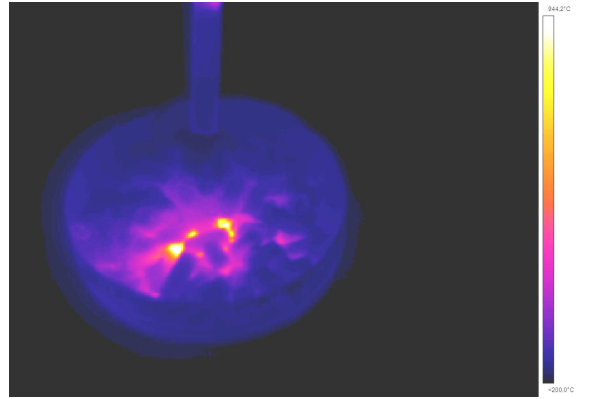
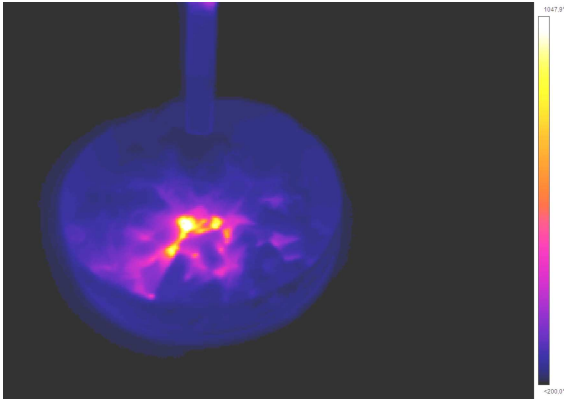
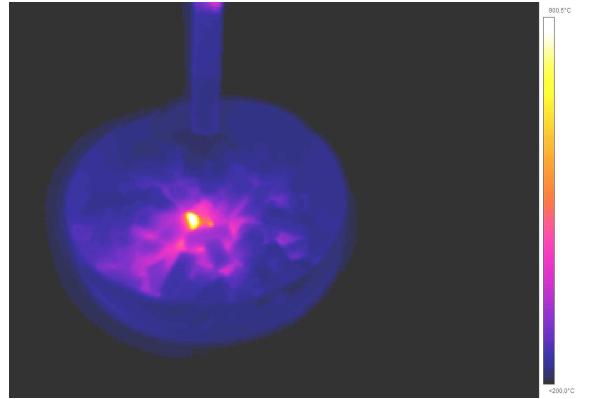
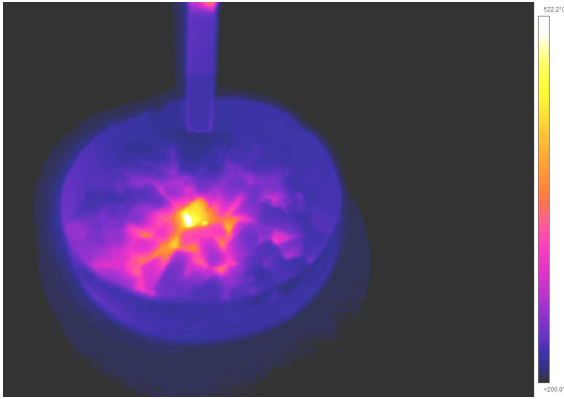
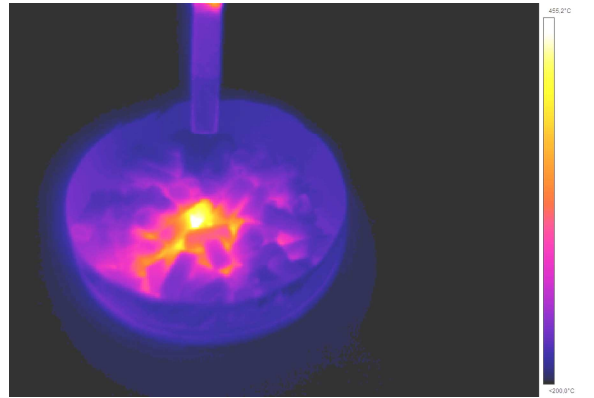
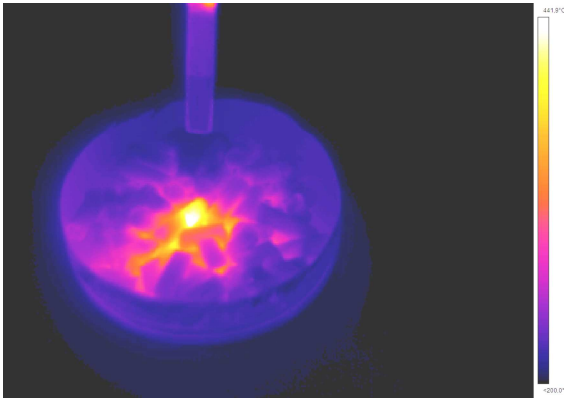
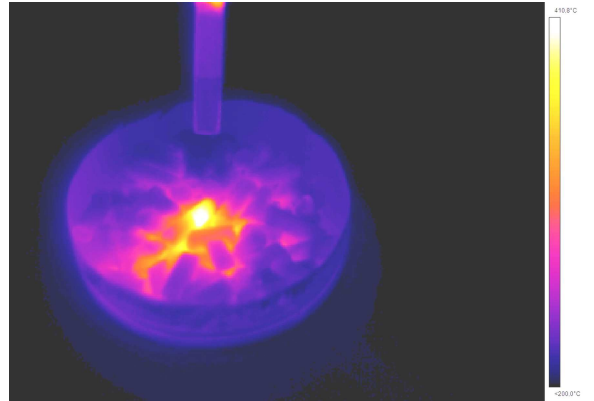
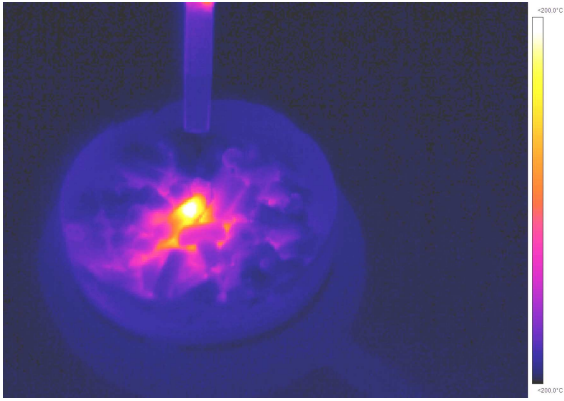
Fáze 0 – sušení. Probíhá při teplotách do 160 °C, z paliva se odpařuje voda.

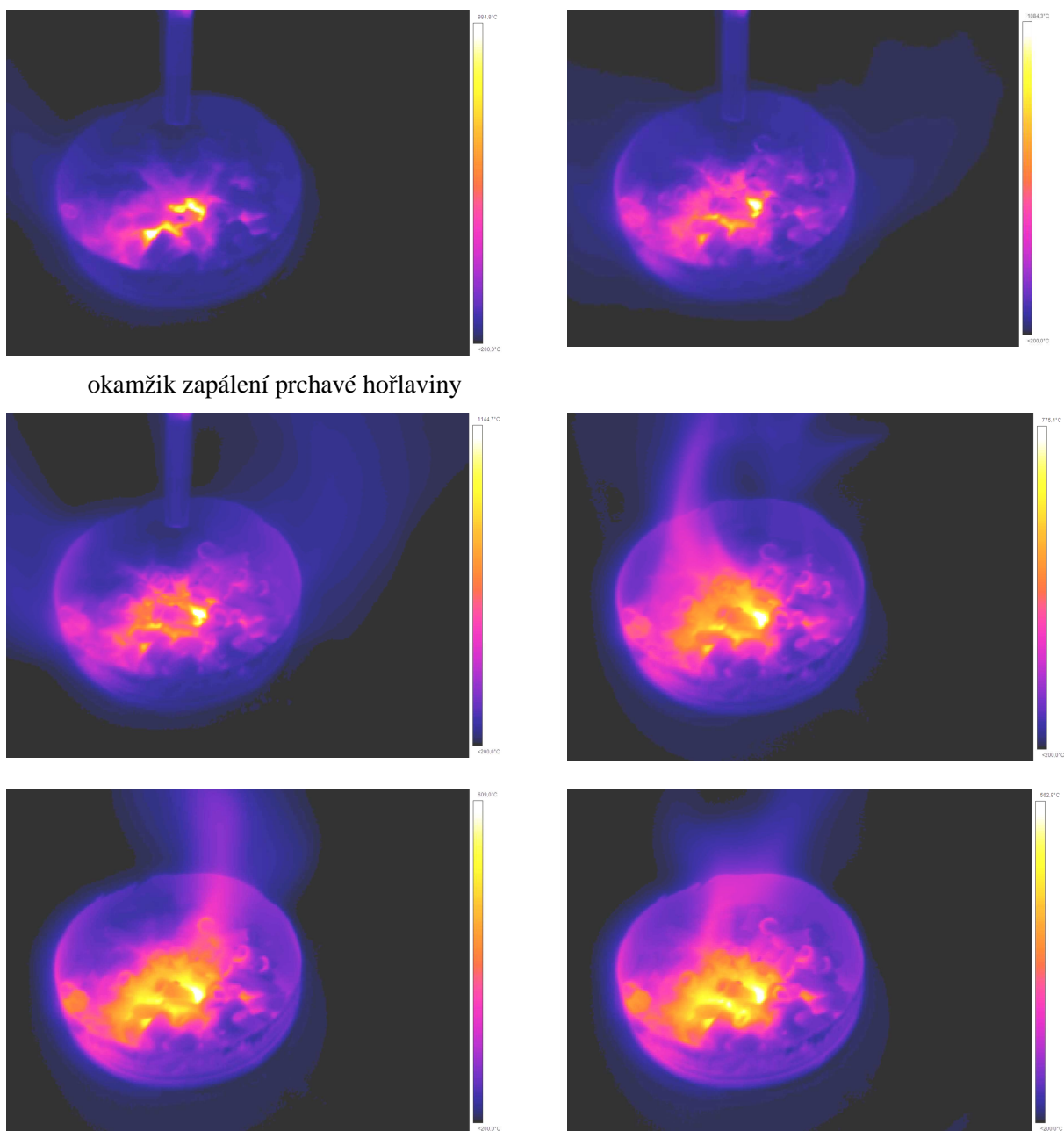
Fáze 1 – uvolňování prchavé hořlaviny, probíhá od teplot 160 °C až do teploty přibližně 400 °C. Z důvodu zvyšující se teploty dochází k intenzifikaci uvolňování prchavé hořlaviny.

Fáze 2 – zapálení (iniciace) prchavé hořlaviny, je charakterizována teplotou 400 °C, při které dochází ke vznícení uvolněných hořlavých plynů za účasti spalovacího vzduchu z okolí. Tato skutečnost je doprovázena uvolněním velkého množství energie, což se projeví skokovým nárůstem teploty (zde ze 450 °C na 1 000 °C za cca tři sekundy).

Fáze 3 – stabilní hoření, přívod vzduchu do procesu hoření ventilátorem. Po iniciaci paliva již není třeba dodávat externí energii v podobě horkého vzduchu, proces hoření se stává stabilním (za předpokladu dodávky dostatečného množství spalovacího vzduchu).

Fáze 4 – stabilní hoření, přívod vzduchu do procesu hoření pouze přirozenou konvekcí. Při odstavení ventilátoru (v případě těchto experimentů dmychadla generátoru horkého vzduchu) je do reagující vrstvy paliva přiváděno násobně menší množství vzduchu než odpovídá stechiometricky optimálnímu množství a množství do reakce vstupujícího paliva. Díky vysoké teplotě (až 1 000 °C) vzniká velké množství hořlavých plynů, z důvodu nedostatku kyslíku však nestačí zreagovat a tím uvolnit chemicky vázanou energii. Výsledkem je snížení teploty až do stavu fáze 4 (zde velmi krátký časový úsek na teplotě 600 °C, pak již byla termokamera vypnuta). Teplota, na níž je fáze 4 stabilizována je dána intenzitou volné konvekce, která je zdrojem spalovacího vzduchu. V případě velkých hydraulických odporů na trase dopravy vzduchu může dojít až k vyhasnutí paliva. Křivka za fází stabilního hoření však již nemá praktický význam pro studium iniciace paliva.

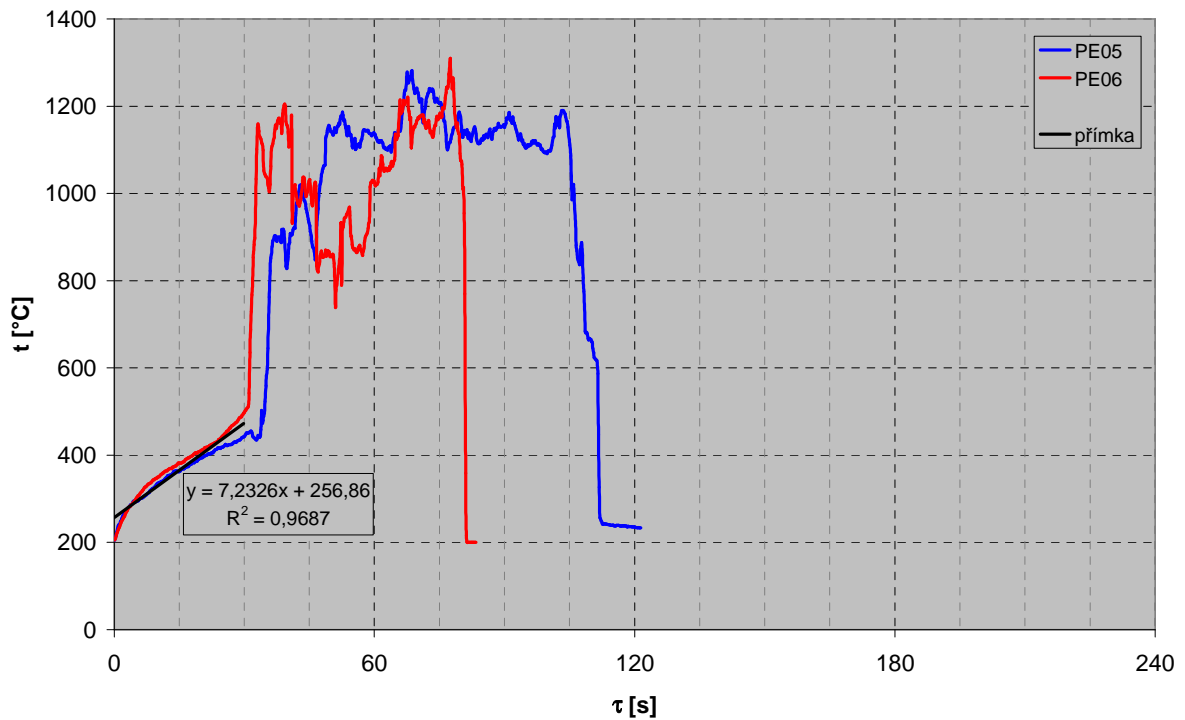




okamžik zapálení prchavé hořlaviny

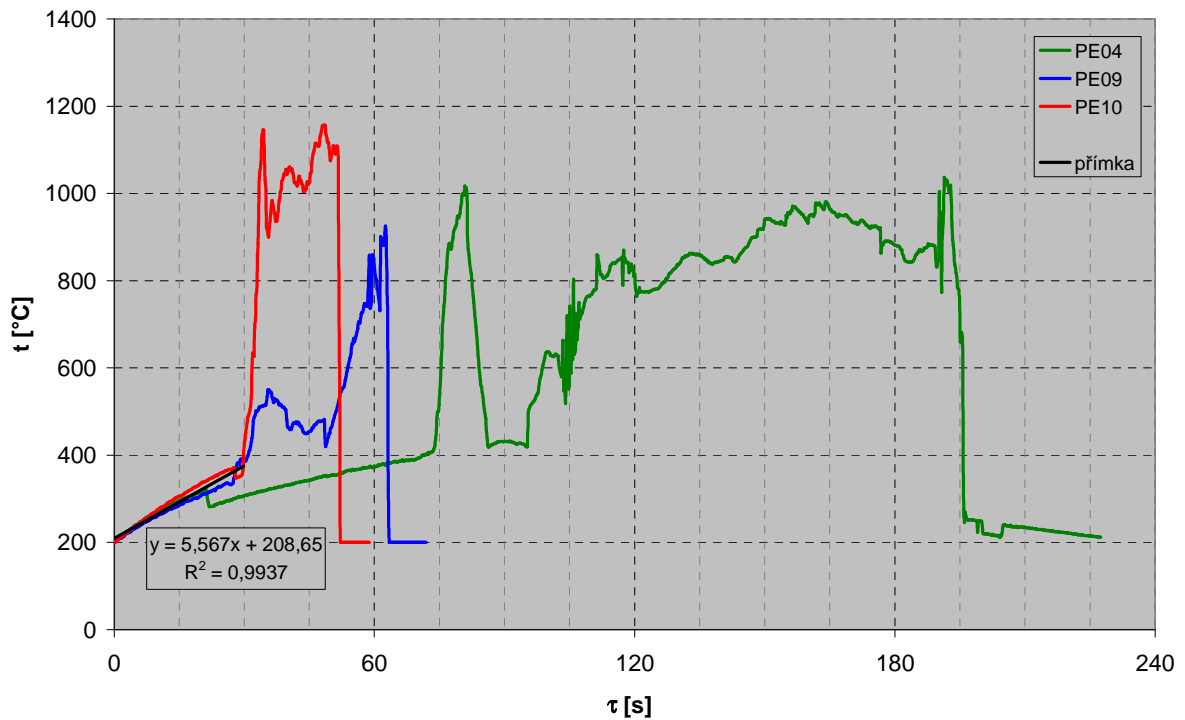
Obr. 111 Příklad charakteristických termogramů.

Jednotlivé křivky vývoje maximální teploty byly rozděleny do skupin vzorků (1 až 5) podle rychlosti ohřevu pelet ve fázi 1, tedy v intervalu teplot od 200 °C do vznícení (pokud k němu došlo). Tato skutečnost je zobrazena na obrazech č. 113 až 116. U každé skupiny vzorků je uvedena rovnice regresní přímky fáze 1. Směrnice této přímky odpovídá rychlosti ohřevu pelet ve fázi 1.



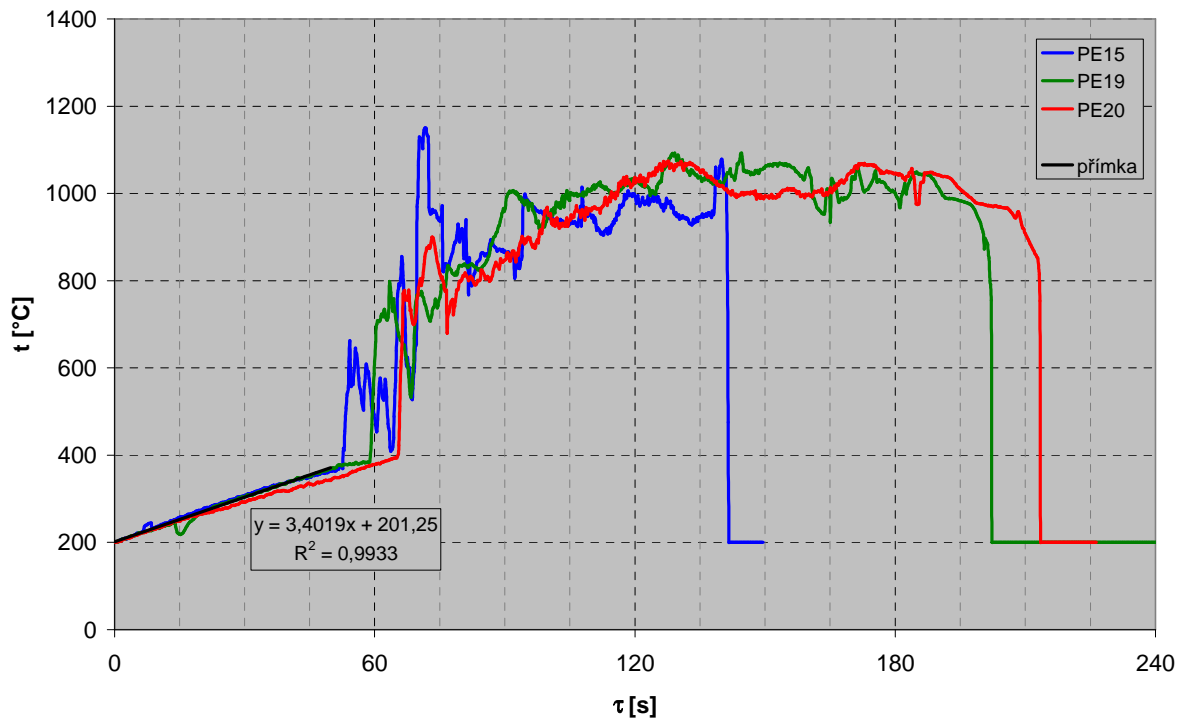
Obr. 112 Fáze 1 s rychlostí ohřevu $7,2 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

Rychlost ohřevu pelet $7,2 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Typickými zástupci této kategorie jsou vzorky PE05 a PE06, jejich průběh teplot při zapalování je znázorněn na obr. 112. Výstupní teplota horkého vzduchu z trysky dosahovala 850°C , vzdálenost trysky od vrstvy paliva 20 mm. Vzorek PE05 byl zapalován při sklonu trysky 30° , což způsobovalo výrazné převalování pelet, především v době do dosažení teploty 200°C . Proto je doba od počátku zahřívání do dosažení teploty 200°C delší než u vzorku PE06 (viz. porovnání tab. 31 s obr. 112), kde výrazné převalování nebylo pozorováno díky změně sklonu trysky na 60° . Doba od dosažení teploty 200°C po zapálení se pohybuje v intervalu 30 až 45 sekund. Z praktických důvodů je však mnohem podstatnější celková doba zapálení, která je 79 s pro PE06 a 103 s pro PE05 (viz. tab. 31).



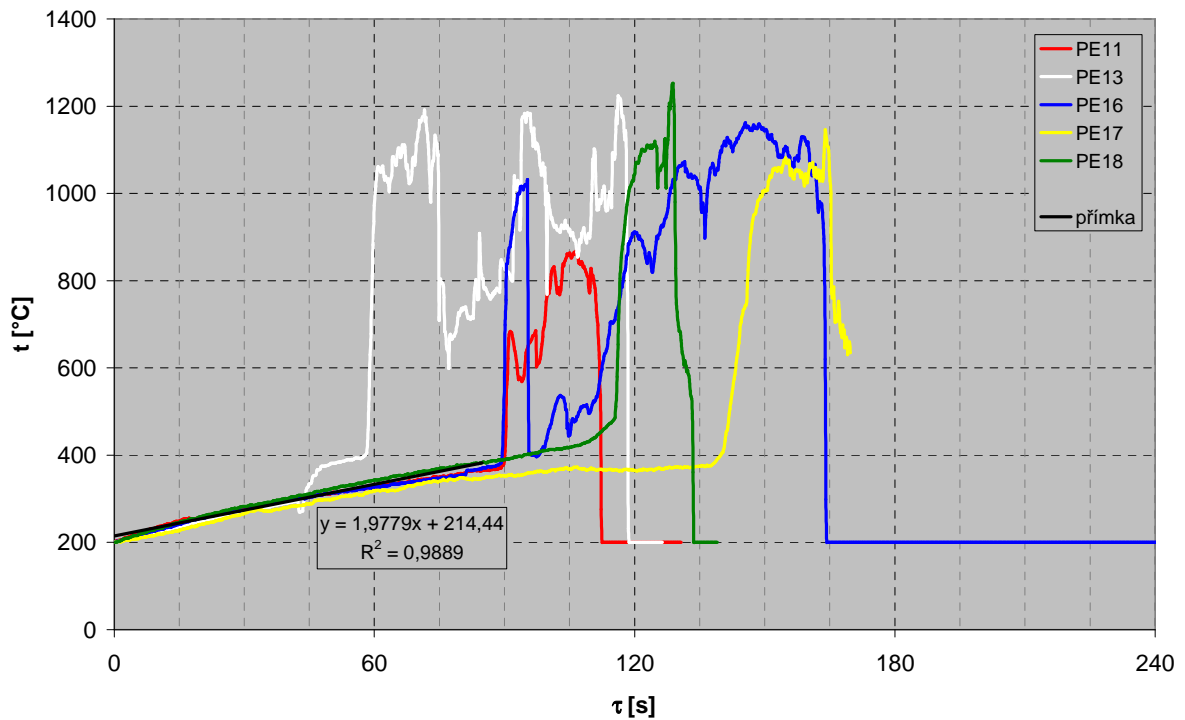
Obr. 113 Fáze 1 s rychlostí ohřevu $5,6 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

Rychlost ohřevu pelet $5,6 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Typickými zástupci této kategorie jsou vzorky PE04, PE09 a PE10, průběh teplot při zapalování je znázorněn na obr. 113. Výstupní teplota horkého vzduchu z trysky dosahovala $850 \text{ } ^\circ\text{C}$, vzdálenost trysky od vrstvy paliva 20 mm . Vzorek PE04 byl zapalován při sklonu trysky 30° , což způsobovalo výrazné rozfoukávání pelet i v oblasti nad $200 \text{ } ^\circ\text{C}$. Na obr. 113 se převalování pelet projevuje poklesem teplot již v době ohřevu (22. sekunda) ale také až po zapálení (75. sekunda), kdy došlo ke zhasnutí hořící prchavé hořlaviny. K opětovnému zapálení došlo až po 15. sekundách (97. sekunda) a hoření pak již bylo stabilní. Vzorky PE09 a PE10 byly zapalovány při změně sklonu trysky z původních 30° na 60° . To se projevilo zkrácením doby zapálení až o 75 s. U vzorku PE09 došlo k rozfoukání těsně před zapálením, což způsobilo oddálení zapálení o 20s. Doba od dosažení teploty 200°C po zapálení se pohybuje v intervalu 30 až 75 sekund. Celková doba zapálení pak od 61 s (PE10) do 250 s (PE04).



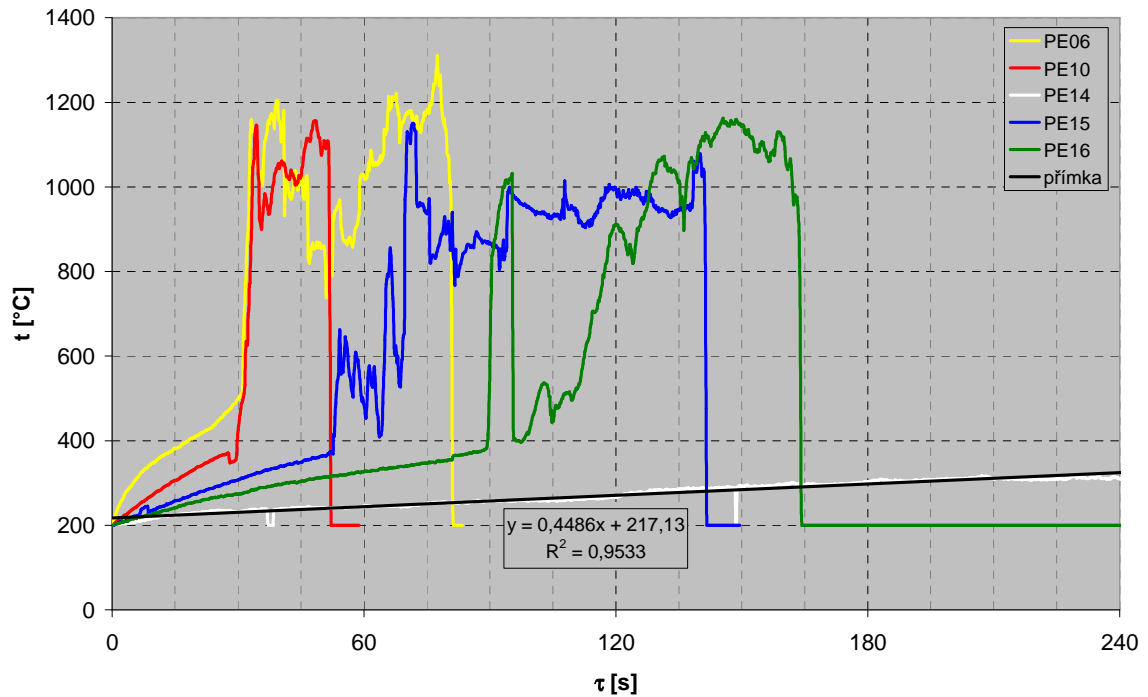
Obr. 114 Fáze 1 s rychlostí ohřevu $3,4 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

Rychlost ohřevu pelet $3,4 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Typickými zástupci této kategorie jsou vzorky PE19, PE20 a PE15, jejich průběh teplot při zapalování je znázorněn na obr. 114. Výstupní teplota horkého vzduchu z trysky byla snížena na $600 \text{ } ^\circ\text{C}$, sklon trysky 60° , vzdálenost trysky od vrstvy paliva 20 mm u vzorků PE19 a PE20 a 15 mm u vzorku PE15. Vzorek PE15 vykazoval rozfoukání v době iniciace (52. sekunda) jehož důsledkem bylo prodloužení doby zapálení o 20 s . U následných vzorků byla zvětšena vzdálenost trysky o 5 mm , což vedlo ke stabilizaci pelet. Vzorky PE19 a PE20 jsou pelety ze sena. Zde nedošlo k zapálení prchavé hořlaviny, vzorek nehořel plamenem. Docházelo pouze ke žhnutí vrstvy pelet na roštu, při odstavení ventilátoru byl proces hoření nestabilní. Na základě uvedené skutečnosti lze považovat pelety ze sena za problematicky zapalitelné. V době činnosti generátoru horkého vzduchu je vývoj teplot pelet ze sena obdobný jako pro pelety ze smrkového dřeva (PE15), ovšem při vzdálenosti trysky o 5 mm blíže u PE15. Bílá peleta ze smrkového dřeva vykazuje při stejné geometrii trysky jako u pelety ze sena nižší rychlost ohřevu ve fázi 1 (viz. obr. 115). Tuto skutečnost lze přičíst větší tepelné kapacitě smrkové pelety proti peletě ze sena. Doba fáze 1 se pohybuje v intervalu 60 až 70 s . Celková doba zapálení vzorku PE15 je 166 s .



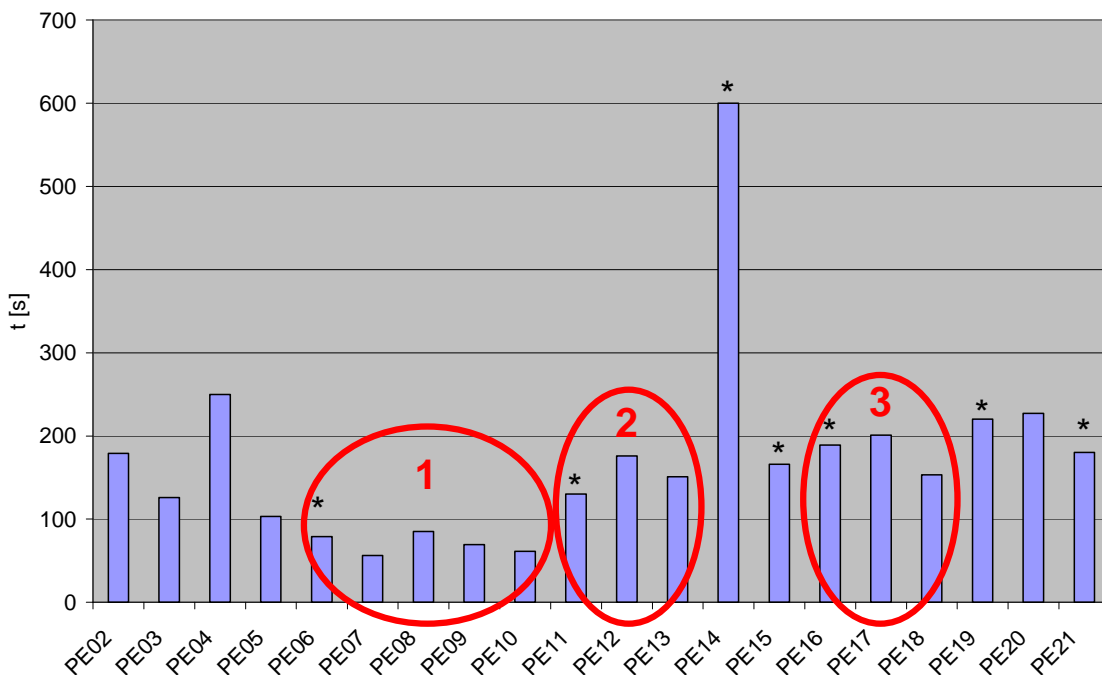
Obr. 115 Fáze 1 s rychlostí ohřevu $2,0 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

Rychlost ohřevu pelet $2,0 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Typickými zástupci této kategorie jsou vzorky PE11, PE13, PE16 až PE18, průběh teplot při zapalování je znázorněn na obr. 115. Výstupní teplota horkého vzduchu z trysky byla $600 \text{ }^\circ\text{C}$, sklon trysky 60° , vzdálenost trysky od vrstvy paliva 20 mm u všech vzorků. Průměrná doba zapálení se pohybuje v intervalu 90 až 120 s od dosažení teploty $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (PE11, PE16, PE18). U vzorku PE16 však došlo k rozfoukání po zapálení. U vzorku PE17 docházelo k intenzivnímu převalování pelet již od počátku ohřevu (fáze 0). Díky tomu se prodloužila sledovaná doba zapálení až o 30% . Převalováním pelet může také dojít k jejich posunu vůči trysce tak, že nový stav polohy pelet je prokazatelně výhodnější z hlediska rychlosti ohřevu. Tato skutečnost nastala u vzorku PE13 (45. sekunda). Díky výhodnějšímu postavení pelet vůči trysce došlo k prudkému nárůstu teploty ve fázi 1 a iniciaci již v $60.$ sekundě. Vzorek PE13 tak byl zapálen v kratším čase než průměr, a to o 40% . Uvedená skutečnost je však málo častá. Celkové časy zapálení byly 151 s (PE13) až 201 s (PE17).



Obr. 116 Fáze 1 s rychlostí ohřevu $0,4 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.

Rychlost ohřevu pelet $0,4 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Typickým zástupcem této kategorie je vzorek PE14, průběh teplot při zapalování je znázorněn na obr. 116 společně se vzorky PE06, PE10, PE15, PE16, které charakterizují skupiny vzorků s odlišnou rychlostí ohřevu ve fázi 1. Výstupní teplota horkého vzduchu z trysky (pro vzorek PE14) byla $600 \text{ } ^\circ\text{C}$, sklon trysky 60° , vzdálenost trysky od vrstvy paliva 30 mm . Díky zvýšení vzdálenosti trysky od paliva o 30% klesla rychlost ohřevu na 25% . K zapálení pelet nedošlo ani po 600 sekundách. Zvolená geometrie trysky je tak za dané teploty a průtoku horkého vzduchu nepoužitelná. Pro další vzorky byla zmenšena vzdálenost na 20 mm , tím došlo ke zvýšení rychlosti ohřevu na $2,0 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 117 Doba od počátku po zapálení vybraných vzorků pelet.

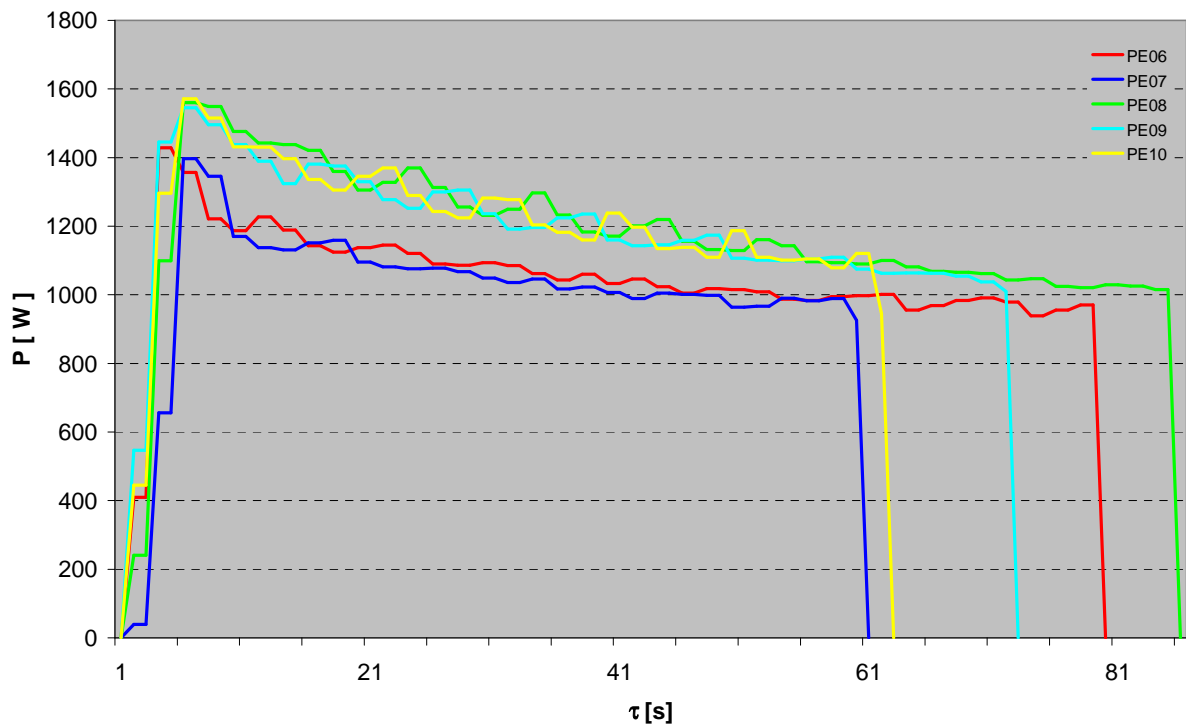
7.3.2 Měření spotřeby energie

V předchozí části zobrazené průběhy teplot a zobrazovaná teplotní pole umožňují hlubší poznání problematiky sdílení tepla při zapalování paliva horkým vzduchem. Ze závislosti průběhu teplot v čase nelze zjistit celkové množství spotřebované elektrické energie pro zapálení různých druhů paliv při různé teplotě a za různé geometrie trysky. Spotřeba energie nutná k zapálení byla zjištěna pomocí kontinuálního měření činného výkonu generátoru horkého vzduchu (dmychadlo a žhavená spirála odporového drátu) v čase. Integrací takto zjištěného činného výkonu v čase získáme spotřebovanou energii.

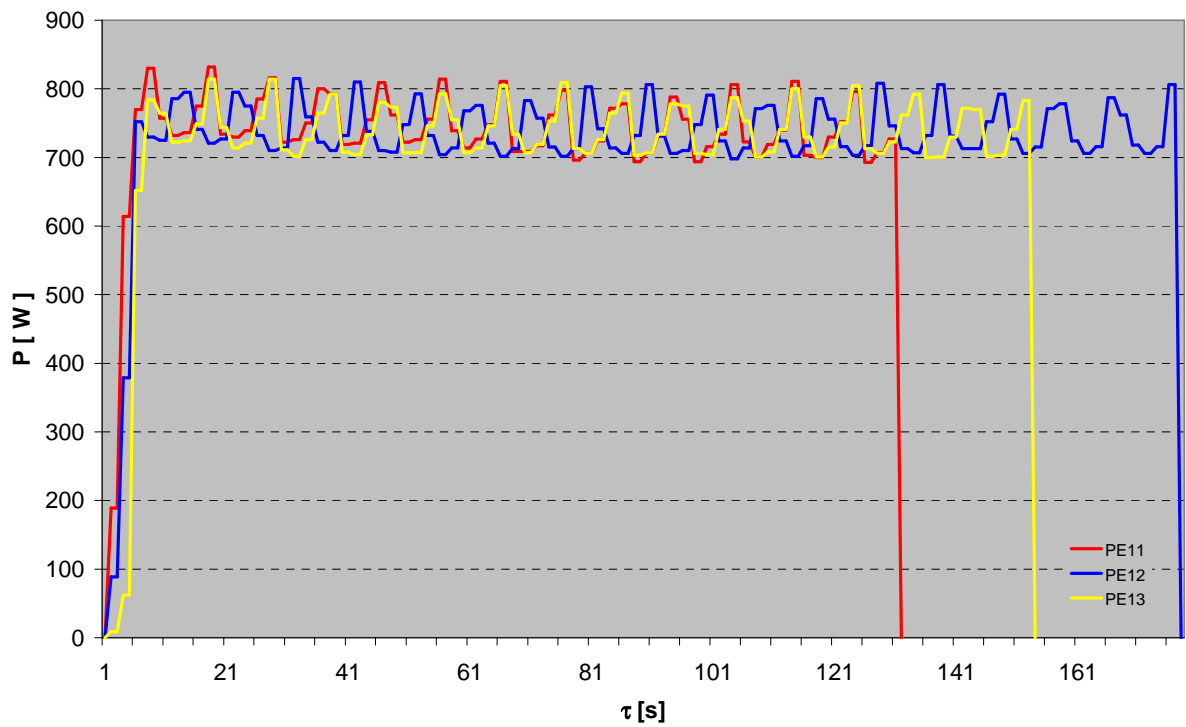
Na obr. 117 je znázorněna celková doba potřebná k zapálení vybraných vzorků pelet při různých podmínkách. Změna podmínek následujícího experimentu je značena hvězdičkou u prvního vzorku. Pro statistické zpracování vzorků jsou vybrány tři skupiny vzorků. Skupina 1 je charakterizována sklonem trysky 60° a vzdáleností 20mm při teplotě horkých plynů v ústí trysky 850°C . Skupina 2 má stejnou geometrii trysky, jen teplota v ústí trysky byla snížena na 600°C . Skupina 3 má sklon trysky 60° a vzdálenost 20 mm při teplotě horkých plynů v ústí trysky 600°C . Se snižující se teplotou a zvětšující se vzdáleností trysky od paliva narůstá doba potřebná k zapálení. Na základě informací o geometrii trysky a teplotě vzduchu nelze odůvodnit rozdíl v době zapálení mezi skupinami 2 a 3. Rozdíl mezi skupinami 2 a 3 je však srovnatelný s rozdílem jednotlivých vzorků každé skupiny, lze jej tedy prohlásit za statisticky nevýznamný. Vysvětlení rozdílu lze obdržet analýzou průběhu činného výkonu na obr. 119 a 120. U skupiny 3 bylo dodáváno trvale klesající množství energie, u skupiny 2 je toto množství konstantní a odpovídá maximu skupiny 3. Lze tak konstatovat, že ve skupině 3 bylo dodáno za stejný čas menší množství energie.

Na obr. 118 je průběh činného výkonu vzorků skupiny 1. Z okamžitých hodnot činného výkonu je patrná regulační strategie analogového PID regulátoru generátoru horkého vzduchu. Pro rychlé dosažení konstantní teploty 850°C na výstupu trysky je u chladného

přístroje (teplota trysky 30 °C) počáteční výkon 1 400 W až 1 600 W. Postupně dochází k poklesu výkonu až na 1 000 W.

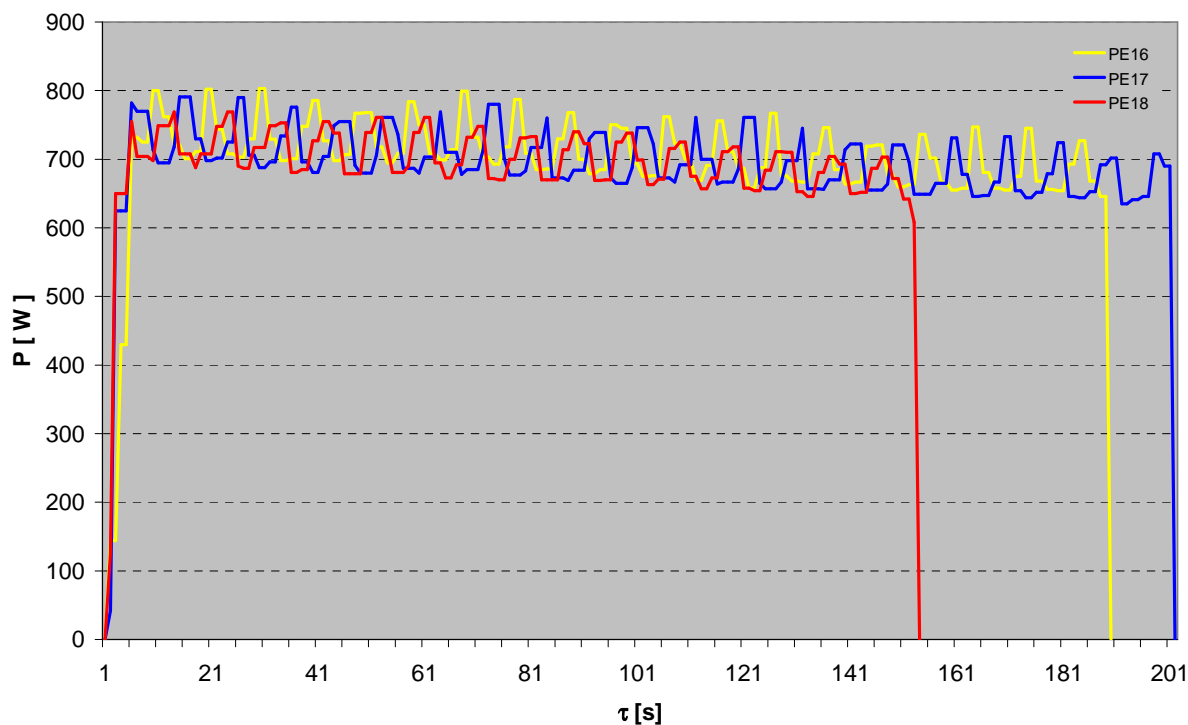


Obr. 118 Průběh činného výkonu pro vzorky skupiny 1.



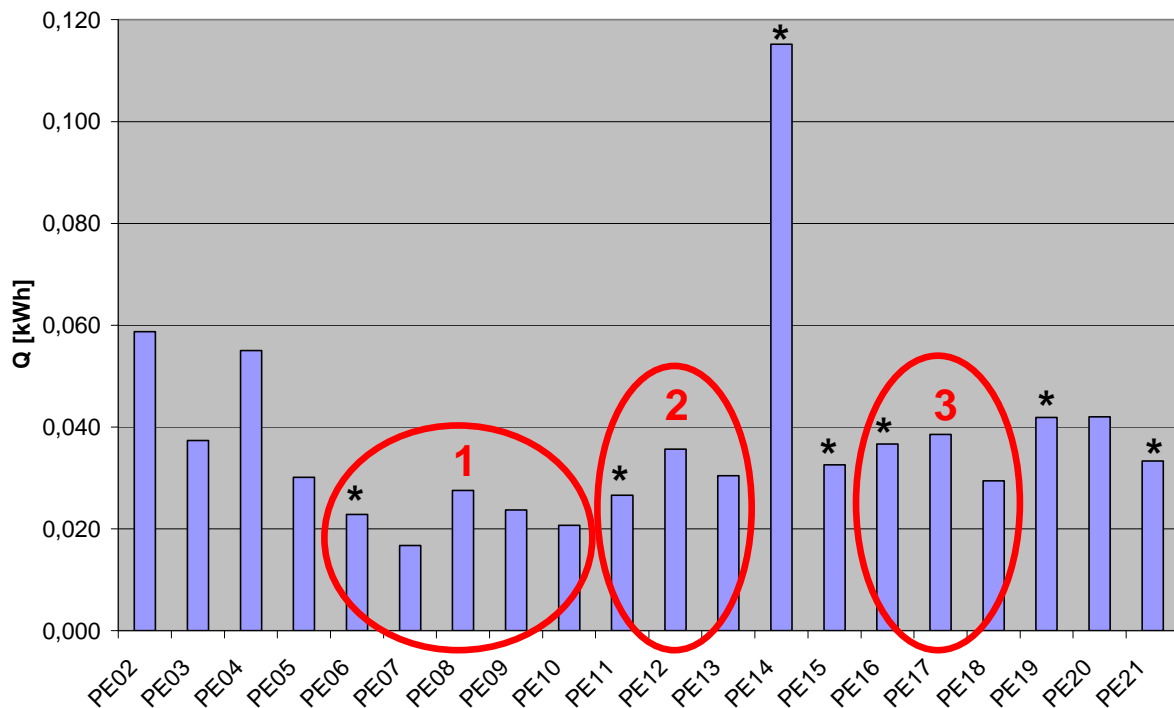
Obr. 119 Průběh činného výkonu pro vzorky skupiny 2.

Na obr. 119 je průběh činného výkonu vzorků skupiny 2. Konstantní teplota 600 °C na výstupu trysky je udržována periodickým kolísáním činného výkonu v rozmezí 700 W až 800 W plynule během celé doby funkce generátoru.



Obr. 120 Průběh činného výkonu pro vzorky skupiny 3.

Na obr. 120 je průběh činného výkonu vzorků skupiny 3. Konstantní teplota 600 °C na výstupu trysky je udržována periodickým kolísáním činného výkonu v rozmezí ± 50 W od střední hodnoty, která je zpočátku 750 W, v okamžiku zapálení už jen 675 W až 650 W. Obsah plochy pod jednotlivými křivkami na obr. 118 až 120 uvádí spotřebu energie během zapalování daného vzorku. Uvedená skutečnost je přehledně znázorněna v grafu na obr. 121.



Obr. 121 Spotřeba energie pro zapálení vybraných vzorků pelet.

Rozdíl ve spotřebě energie (obr. 121) mezi jednotlivými skupinami testovaných pelet je menší, než rozdíl ve spotřebě času (obr. 117). To je dáno snižujícím se výkonem odporového tělesa při snížení teploty (porovnání skupiny 1 a 2). Mezi skupinou 2 a 3 není statisticky významný rozdíl ve spotřebě energie. Jako optimální řešení bylo vybráno nastavení geometrie trysky a teploty horkého vzduchu ve skupině 3. Průměrná spotřeba elektrické energie v této skupině je 0,035 kWh. Zároveň je však třeba upozornit na skutečnost, že ukončení procesu zapalování bylo v tomto experimentu sledováno vizuálně a generátor byl odstaven bezprostředně po zapálení pelet. V reálných aplikacích je však situace bezpečného zapálení sledována elektronicky čidly jednoduché konstrukce (ve srovnání s lidským zrakem), nejčastěji pomocí termočlánků. Rovněž může být delší trasa od zdroje horkého vzduchu po vyústění trysky. Obě technické změny mohou mít za následek delší dobu provozu generátoru horkého vzduchu při zapalování a tím i větší spotřebu energie. Pro přiblížení reálným procesům budu tedy v následujících úvahách uvažovat s dvojnásobnou spotřebou energie, tedy s hodnotou 0,07 kWh. Domácnosti, kde je aplikováno vytápění peletami, využívají elektrickou energii nejčastěji v tarifu D02 (ohřev TV peletami či solární energií). Zde je pak cena elektrické energie 4,70 Kč/kWh (ceník od 1.1.2011, E.ON). V případě využití elektrického boileru pro ohřev TV je využit tarif D25 s průměrnou cenou 4,10 Kč/kWh (stejný ceník). Výsledná cena energie na jedno zapálení kotle tak vychází na 0,29 Kč (D25) až 0,33 Kč (D02). Dle výpočtů prezentovaných v kapitole 6.3.1 „Návrh akumulčního zásobníku“ je počet startů peletového automatu spolupracujícího s akumulční nádrží pro dům s tepelnou ztrátou 12 kW v intervalu 300 až 500 startů dle parametrů akumulace. To představuje 86 až 165 Kč za rok. Uvedenou spotřebu elektrické energie tak lze považovat za zanedbatelnou.

8 Doprava tuhých biopaliv

Doprava ve všech fázích přípravy tuhých biopaliv je významným faktorem, který ovlivňuje množství zabudované (šedé) energie v palivu a zásadní měrou se promítá do ceny paliva. Vliv dopravy na šedou energii a cenu paliva je silně závislý na obchodní formě paliva. V následujících tabulkách uvádím příklad pro obchodní formu hobliny, piliny, štěpka a pelety. Biomasa je dopravována nákladním automobilem s kontejnerovou nástavbou a vlekem o celkovém objemu přepravovaného nákladu 80 m³, pro pelety jen 40 m³.

Tab. 32 Vstupní parametry dopravované biomasy

biomasa	sypná hmotnost		abs. vlhkost		výhřevnost	
	ms	[kg/m ³]	wa	[%]	H	[MJ/kg]
hobliny	40	60	8	20	17	15
piliny	120	180	8	60	17	11
štěpka	180	300	25	80	15	8
pelety	600	650	8	8	17	18

Tab. 33 Podmínky dopravy

cena dopravy	25 Kč/km
spotřeba paliva	35 l/100km
hustota nafty	0.84 kg/l
výhřevnost nafty	42.6 MJ/kg
objem kontejneru	80 m ³
objem kontejneru - pelety	40 m ³
nosnost	25 t
dopravovaná vzdálenost	100 km
hustota nafty	0.84 kg/l
výhřevnost nafty	42.6 MJ/kg

Tab. 34 Energetický obsah nákladu, hmotnost nákladu a jednotková cena paliva

biomasa	en. obsah nákladu		hmotnost nákladu		cena paliva	
	E	[kWh]	m	[kg]	c	[Kč/kg]
hobliny	15 111	20 000	3 200	4 800	2.00	2.00
piliny	45 333	44 000	9 600	14 400	3.00	1.60
štěpka	60 000	53 333	14 400	24 000	3.80	2.00
pelety	113 333	130 000	24 000	26 000	5.50	6.00

Tab. 35 Energie dopravy (spotřebované nafty), cena dopravy, procento energetického obsahu paliva vynaložené na dopravu, procento ceny dopravovaného paliva vynaložené na dopravu

biomasa	energie dopravy		cena dopravy		energie dopravy		cena dopravy	
	E	[kWh]	C	[Kč]	E	[%]	C	[%]
hobliny	695.8		5000		4.60	3.48	78.13	52.08
piliny					1.53	1.58	17.36	21.70
štěpka					1.16	1.30	9.14	10.42
pelety					0.61	0.54	1.89	1.60

Z výpočtů vyplývá, že dopravovaná vzdálenost 100 km (jízda tam a zpět 200 km) představuje spotřebu energie na dopravu danou výhřevností a spotřebou nafty 4,6 až 3,5 % energetického obsahu přepravovaných hoblin, 1,5 až 1,6 % energetického obsahu přepravovaných pilin, 1,1 až 1,3 % energetického obsahu přepravované štěpky, nebo jen 0,5 až 0,6 % energetického obsahu přepravovaných pelet.

Mnohem horší je procentuální vyjádření ceny dopravy vztahené k ceně dopravované biomasy (poslední dva sloupce tabulky 35.). Za optimální dopravní vzdálenost biomasy (štěpky, pilin) lze tedy považovat vzdálenost do 50km. Uvedená skutečnost je ve shodě s literaturou, například [NUSSBAUMER, 2004, s. 10].

V následující části práce je popsán návrh měřicího systému vyvíjeného prototypu lesní vyvážecí soupravy LVS710 ve spolupráci s firmou Strojírna Novotný. Lesní vyvážecí souprava je v případě využití biomasy z lesa prvním z celého řetězce dopravních prostředků.

8.1 Návrh a realizace měřicího systému pro LVS710

Cílem provozního měření na prototypu nového modelu lesní vyvážecí soupravy s označením LVS710 je ověření výkonových parametrů pohonu v jednotlivých režimech práce, ověření funkce chladicí soustavy motoru i chlazení hydraulické kapaliny, včetně sledování provozních parametrů hydraulických okruhů. Celkový počet požadovaných měřících bodů, včetně jejich umístění, byl konzultován se zástupci výrobce prototypu a je přehledně uveden v tabulce č. 36.

Pro uvedený účel je vhodné sledovat energetické toky před a za motorem. Bylo tedy navrženo kontinuální měření průtoku paliva motoru pro indikaci spotřebované energie motorem a měření energie na výstupu motoru v podobě snímání otáček a točivého momentu na výstupním hřídeli motoru. Pro kompletní diagnostiku byl okruh motoru doplněn snímáním teplot chladicí kapaliny v charakteristických bodech (před a za chladičem, na bloku motoru), vzduchu do motoru, tlaku za turbokompresorem a teploty spalin.

V hydraulických okruzích je vhodné měřit tlakové spády na jednotlivých hydromotorech pojezdu a průtoky hydraulické kapaliny přes hydromotory. Vzhledem k ceně průtokoměrů však byly aplikovány pouze tlakoměry. Celý systém byl doplněn o měřící body tlaků a teplot v jednotlivých hydraulických větvích hydraulického pojezdu (okruhy 500 bar) i hydraulického jeřábu (okruhy 200 bar).

Na základě těchto informací jsme provedli návrh měřicího systému, nákup komponent, jejich zapojení do funkčního celku a realizaci prvních měření [KLEPÁRNÍK & VEVERKA, 2013].

Pro výše uvedený seznam snímačů bylo zvoleno zpracování měřící ústřednou řady cDAQ firmy National Instruments. Konkrétně bylo zvoleno chassis NI cDAQ 9188 komunikující s nadřazeným PC přes ethernet. Chassis cDAQ 9188 je rozšiřitelné až o osm libovolných AD modulů řady C, umožňuje tak vysokou variabilitu zpracování připojených signálů různých snímačů. National Instruments je dodavatelem nejen měřicího hardware, ale i software včetně firemního know how. Uvedené produkty tak patří ke světové špičce v oblasti měření, regulace a rychlého vývoje aplikací.

Tab. 36 seznam měřených bodů LVS710

zapojení průchodek - rozvaděč NI - LVS 710				
č.	nad rozvaděčem hydrauliky - strana filtru		nad rozvaděčem hydrauliky - strana ŘJ kabiny	
	dolní řada	horní řada	horní řada	dolní řada
1	60: tlak vzduchu vstup do motoru	NC	2: teplota vody před chladičem	1: teplota vody blok motoru
2	64: průtok paliva přepad do nádrže	63: průtok paliva za jemným filtrem	4: teplota vzduchu vstup sání (filtr)	3: teplota vody za chladičem
3	66: otáčky kardan	65: točivý moment kardan	6: teplota vzduchu vstup do motoru	5: teplota vzduchu za turbem
4	32: tlak oleje HM pojezdu přední 01	33: tlak oleje HM pojezdu přední 02	8: teplota nafty za jemným filtrem	7: teplota spalin výfuk motoru
5	NC	NC	23: teplota oleje výstup čerpadla pojezdu 02	19: teplota oleje prosak pracovního čerpadla
6	NC	NC	22: teplota oleje výstup čerpadla pojezdu 01	21: teplota oleje zpátečka pojezdového čerpadla
7	NC rezerv.	82: LAN to PC	25: teplota oleje z HM pojezdu zadní 02	24: teplota oleje z HM pojezdu zadní 01
8	62: board Ucc palubní napětí	81: Ucc to PC napájení PC	35: tlak oleje HM pojezdu zadní 02	34: tlak oleje HM pojezdu zadní 01
1	45: tlak oleje zpátečka z rozvaděče před filtrem	47: tlak oleje ovládací tlak	30: tlak oleje výstup na čerpadle pojezdu 01	31: tlak oleje výstup na čerpadle pojezdu 02
2	41: tlak oleje HV zdvíhu hl. ramene na rozvaděči dolů	46: tlak oleje sání pojezdového čerpadla (podtlak)	48: tlak oleje ovládací LS tlak	49: tlak oleje vstup chladiče oleje
3	40: tlak oleje HV zdvíhu hl. ramene na rozvaděči nahoru	44: tlak oleje celkový pracovní tlak na rozvaděči	NC	NC
4	43: tlak oleje HV zdvíhu hlavního ramene na HV dolů	42: tlak oleje HV zdvíhu hlavního ramene na HV nahoru	NC	NC
5	17: teplota oleje výstup chladiče oleje	18: teplota oleje sání pracovního čerpadla	NC	NC
6	20: teplota oleje sání pojezdového čerpadla	10: teplota oleje nádrž	NC	NC
7	14: teplota oleje z HV zdvíhu hlavního ramene na rozvaděči dolů	11: teplota oleje vstup do rozvaděče	27: teplota oleje prosak HM pojezdu zadní	26: teplota oleje prosak HM pojezdu přední
8	12: teplota oleje zpátečka z rozvaděče	13: teplota oleje z HV zdvíhu hl. ramene na rozvaděči nahoru	15: teplota oleje zpátečka hydromotoru chlazení	16: teplota oleje vstup chladiče oleje

8.1.1 Měřicí ústředna

Měřicí systém je složen z kompaktního šasi, zásuvných modulů a SW aplikace běžící na hostitelském PC. Při výběru vhodné platformy byly posuzovány tři platformy: NI cRIO, NI cDAQ USB a NI cDAQ Ethernet. Vzhledem k požadavkům a financím byla vybrána platforma NI cDAQ Ethernet v provedení NI cDAQ9188.

Použité šasi NI cDAQ9188 je navrženo tak, že pojme až osm vstupně – výstupních modulů pro měření elektrických, fyzikálních, mechanických či akustických signálů až na 256ti kanálech. Další rozšíření je možné díky časové synchronizaci více šasi. Výhodou jsou kompaktní rozměry šasi (250 x 90 x 90 mm) a robustní konstrukce. Obecně je možno použít více než 50 různých vstupně – výstupních modulů s jejichž pomocí lze vytvořit vysokorychlostní měřicí systémy s využitím standardní infrastruktury pro gigabitový Ethernet. Použití NI cDAQ zjednodušuje počáteční nastavení díky síťové technologii, která nevyžaduje konfiguraci a též díky vestavěnému nástroji pro konfiguraci a monitorování prostřednictvím webu.

NI cDAQ využívá patentovanou technologii NI Signal Streaming pro širokopásmové datové přenosy prostřednictvím Ethernetu na hostitelský počítač. NI Signal Streaming umožňuje prostřednictvím spojení TCP/IP obousměrný přenos analogových i digitálních signálů bez přerušení. S pomocí technologie NI STC3 pro synchronizaci a časování může každé šasi spravovat až sedm různých vstupně – výstupních úloh s hardwarovým časováním s různými rychlostmi vzorkování, a to včetně operací s analogovými vstupy a výstupy a s čítači a časovači. Šasi může být provozováno při teplotách v rozsahu -20 až 55 °C a vydrží náraz o síle až 30 g či vibrace až 3 g, díky čemuž je platforma NI cDAQ ideální volbou pro náročné testovací aplikace v laboratoři, v terénu i v prostředí výroby.

Šasi je kompatibilní se vstupně – výstupními moduly řady C, které lze v systémech NI cDAQ volně zaměňovat, neboť všechny podporují připojení za chodu a automatickou detekci pro usnadnění nastavení. Moduly řady C nabízejí integrované předzpracování signálu a několik možností připojení pro vytváření vlastních smíšených měřicích systémů, specifických pro potřeby dané úlohy.



Obr. 121 Šasi NI cDAQ9188

Se systémem byly zakoupeny následující moduly:

NI 9205. Univerzální modul analogových napěťových vstupů obsahuje 32 SE nebo 16 diferenciálních analogových vstupů, 16ti bitové rozlišení A/D převodníku o vzorkovací frekvenci až 250 kS/s. Vstupní rozsahy je možno programovat v rozsazích ± 200 mV, ± 1 V, ± 5 V a ± 10 V. Pracovní rozsah teplot modulu -40 °C až 70 °C. Připojení ve verzi D-Sub konektoru. Modul je navržen především pro připojení snímačů tlaku v hydraulických okruzích stroje.

NI 9217. Čtyřkanálový modul analogových vstupů pro vyhodnocení odporu 100Ω . Rozlišení A/D převodníku 24 bitů s filtrací šumu na 50/60 Hz. Možnost třídrátového a čtyřdrátového připojení snímačů. Modul obsahuje vestavěné napájení snímačů. Vzorkovací frekvence max. 40 S/s. Modul je navržen pro připojení snímačů teploty typu PT100 v hydraulických okruzích stroje a chladícím okruhu motoru stroje.



Obr. 123 NI 9205



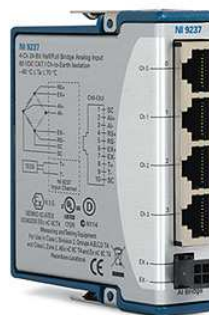
Obr. 124 NI 9217

NI 9219. Univerzální čtyřkanálový modul analogových vstupů s rozlišením A/D převodu 24 bitů, vzorkovací frekvence 100 S/s/ch (simultánní vzorkování), 50 S/s/ch pro termočlánky. Vestavěná podpora plných odporových mostů, půlmostů i čtvrtmostů. Vestavěná podpora napěťového i proudového buzení mostů. Modul umožňuje připojení teplotních snímačů typu termočlánků a PT100/500/1000, obecné měření odporu, napětí a proudů. Vhodný pro tenzometrická měření. Modul je navržen pro připojení snímačů teploty typu PT100 v hydraulických okruzích stroje a chladícím okruhu motoru stroje a pro připojení tenzometrů.

NI 9237. Čtyřkanálový modul analogových vstupů pro vyhodnocení odporových plných mostů a půlmostů s analogovým vstupem ± 25 mV/V. Rozlišení A/D převodu 24 bitů, vzorkovací frekvence až 50 kS/s simultánně. Podpora plných mostů a půlmostů s excitací do 10 V. Modul je navržen pro připojení tenzometrů.



Obr. 125 NI 9219



Obr. 126 NI 9237

NI 9401. Osmikanálový rychlý obousměrný modul digitálních vstupů a výstupů signálů v úrovni 5V/TTL. Rychlost až 100 ns. Připojení pomocí 25-pin D-SUB konektoru. Modul je navržen pro připojení snímačů s pulzním výstupem (průtokoměry a otáčkoměry).

NI 9234. Čtyřkanálový modul analogových vstupů ± 5 V. Rozlišení A/D převodníku 24 bitů, simultánní vzorkování až do 51,2 kS/s/ch. Dynamický rozsah 102 dB, zabudovaný antialiasingový filtr. Softwarově nastavitelná AC/DC vazba a IEPE kondicionování signálu (0 nebo 2 mA). Modul je navržen pro připojení mikrofonů a akcelerometrů.



Obr. 127 NI 9401



Obr. 128 NI 9234

Software ovladače NI-DAQmx, který je dodáván spolu se systémem NI cDAQ, je ve srovnání se základním ovladačem zařízení přínosem z důvodu vyšší produktivity a výkonu. S tímto programem mohou uživatelé zaznamenávat údaje při jednoduchých pokusech nebo vyvinout kompletní testovací systém v NI LabVIEW, NI LabWindowsTM/CVI, ANSI C/C++ či MS Visual Studio.NET. Konzistentní aplikační rozhraní zajistí, že aplikace vyvinutá pro šasi NI cDAQ Ethernet bude fungovat i se šasi NI cDAQ USB.

8.1.2 Snímače tlaku

Snímače tlaku Danfoss MBS3050-060G5865 jsou použity v počtu šesti kusů v hydraulických okruzích pojezdu, jmenovitý tlak snímače je 600 barů. Snímač je navržen pro použití v průmyslových podmínkách a mobilní technice. Je odolný kavitaci, tlakovým rázům a špičkám. Zapouzdření mokré části snímače provedeno v kyselinám odolné nerezové oceli AISI 316L. Připojení na mokrou část závitem G1/4" dle DIN 3852-E-G1/4 s těsněním dle DIN 3869-14. Připojení elektroniky konektorem dle EN 60497-5-2 M12x1; 4-pin, dovolená teplota okolí -25 až 85 °C, krytí IP 67, materiál niklovaná mosaz. Výstupní napětí snímače 1 až 5 V.

Snímače tlaku Danfoss MBS3050-060G3584 jsou použity v počtu deseti kusů v pracovních hydraulických okruzích, jmenovitý tlak snímače je 250 barů. Snímač je navržen pro použití v průmyslových podmínkách a mobilní technice. Je odolný kavitaci, tlakovým rázům a špičkám. Zapouzdření mokré části snímače provedeno v kyselinám odolné nerezové oceli AISI 316L. Připojení na mokrou část závitem G1/4" dle DIN 3852-E-G1/4 s těsněním dle DIN 3869-14. Připojení elektroniky konektorem dle EN 17501-803, Pg9, dovolená teplota okolí -40 až 85 °C, krytí IP 65, materiál polyamid vyztužený sklenými vlákny. Výstupní napětí snímače 1 až 5 V.

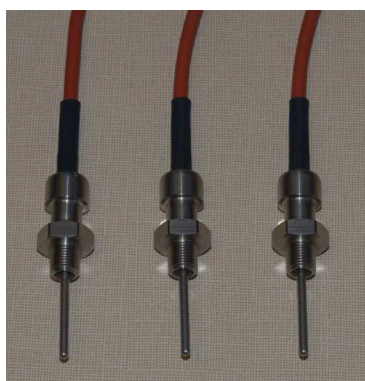


Obr. 129 Snímače tlaku Danfoss MBS3050

Oba snímače tlaku jsou připojeny na analogový vstup modulu NI 9205 ústředny.

8.1.3 Snímače teploty

Snímače teploty Danfoss MBT3270-084Z2021 jsou použity v počtu 26ti kusů v okruzích motoru (vzduch, palivo, spaliny, chladicí kapalina – celkem 8 ks) a v okruzích pojezdové i pracovní hydrauliky (celkem 18 ks). Snímač pro teplotní rozsah $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Snímací prvek PT100 ve třídě přesnosti B (dle EN 60751). Průměr tyčinky snímače 3 mm, délka 40 mm, přípojovací závit M10x1. Snímač je standardně vybaven 2 m dvou vodičovým stíněným silikonovým kabelem. Odolnost nárazu do 50 g/60 ms, odolnost vibracím 15,3 g. Materiál zapouzdření snímače nerez ocel AISI 316, stupeň krytí IP65 (dle IEC 529), maximální externí tlak 500 bar, maximální moment pro připojení závitěm M10 je 17 Nm. Použité těsnění Viton.

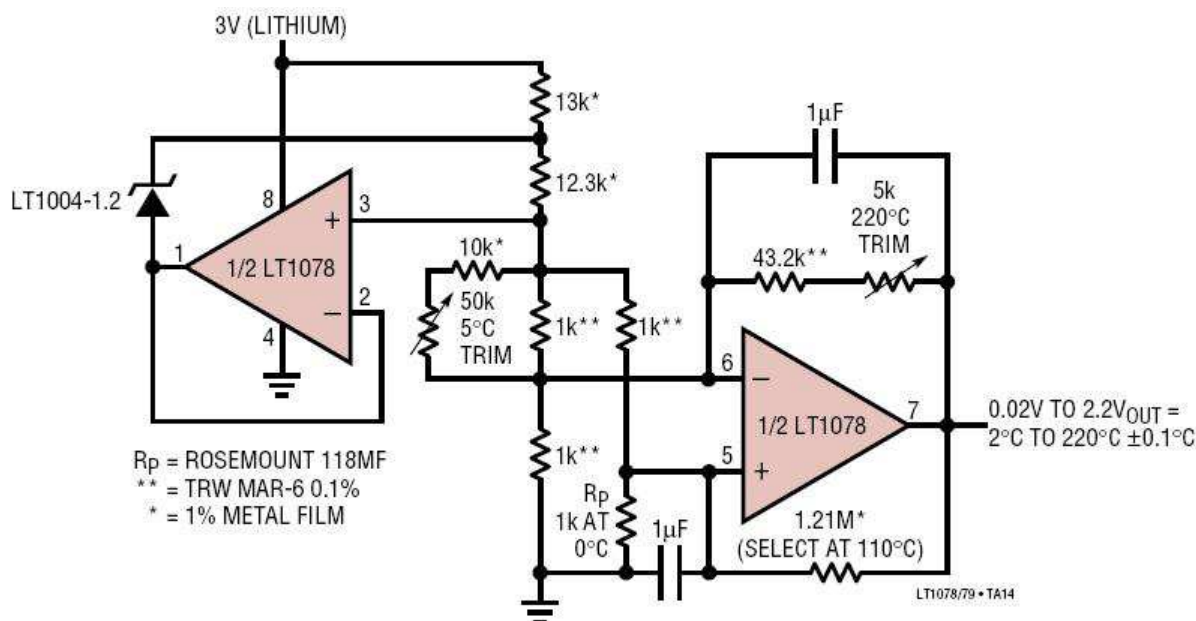


Obr. 130 Snímače teploty Danfoss MBT3270

Snímače z okruhů motoru jsou zapojeny čtyřvodičově, snímače z hydraulických okruhů jsou zapojeny dvou vodičově. Důvodem pro čtyřvodičové zapojení je větší vzdálenost snímače od místa připojení, dvojvodičově zapojené snímače mají maximální délku kabeláže do dvou metrů. Čtyřvodičové zapojení umožňuje kompenzaci elektrických odporů připojovacích vodičů snímače.

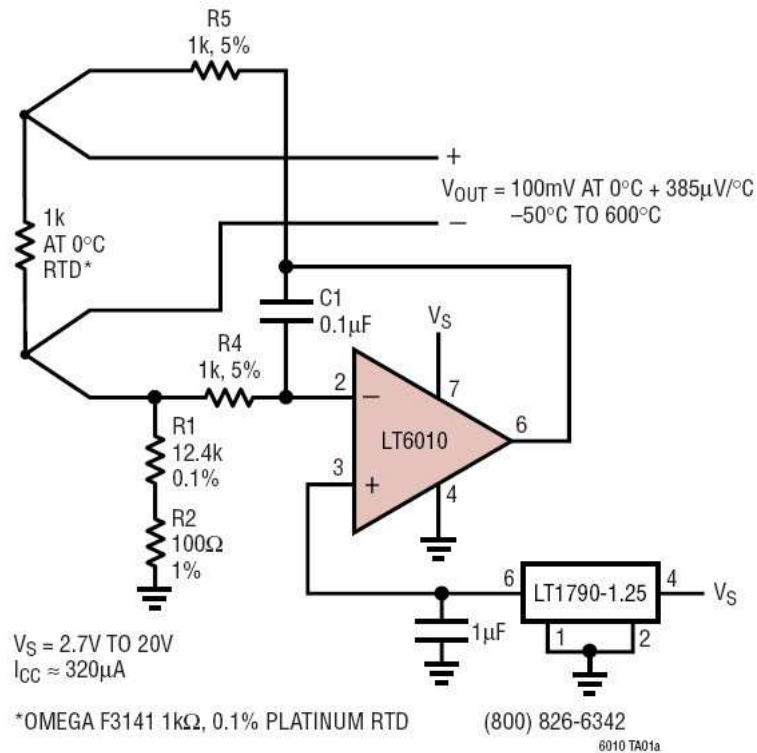
Osm snímačů je připojen na dva moduly NI9217, dalších osm snímačů na dva moduly NI9219. Posledních deset snímačů by vyžadovalo zakoupení dalšího šasi NI cDAQ9188 a propojení obou šasi včetně synchronizačních obvodů. Uvedené řešení je však finančně příliš náročné. Proto byla zvolena alternativa převodníků odporu snímače na napětí (PT100/U) a následné připojení k volným analogovým vstupům modulu NI9205. Modul je tak plně obsazen, možné rozšíření měření o další analogové vstupy bez nákupu nového šasi lze provést zakoupením dalšího modulu NI9205 a jeho osazením do posledního volného slotu stávajícího šasi.

Možností obvodového řešení elektroniky převodníku PT100/U je více. Často používaným je zapojení PT snímače do větve Wheatsonova odporového můstku (obr. 131). Odporový můstek je tvořen třemi precizními odpory 1k a snímačem PT1000. Levý operační zesilovač (OZ) je přesným zdrojem proudu, který je stabilizovaný napět'ovou referencí LT1004-1.2 s precizním odporem 12.3k. Polovina proudu pak protéká přes snímač. Pravý OZ zesiluje napět'ovou diferenci vznikající na rozváženém odporovém můstku mezi větví se senzorem a větví s precizními odpory. Velikost zesílení je dána nastavením záporné zpětné vazby trimrem 5k. Výstupní zesílené napětí odpovídá teplotě. Zavedením slabé kladné zpětné vazby prostřednictvím odporu 1.21M vytvoříme specifickou parabolickou charakteristiku zesílení vhodnou ke kompenzaci nelinearity snímače [HUFFMAN, 1991; WILLIAMS, 1990; WILLIAMS, 1987].



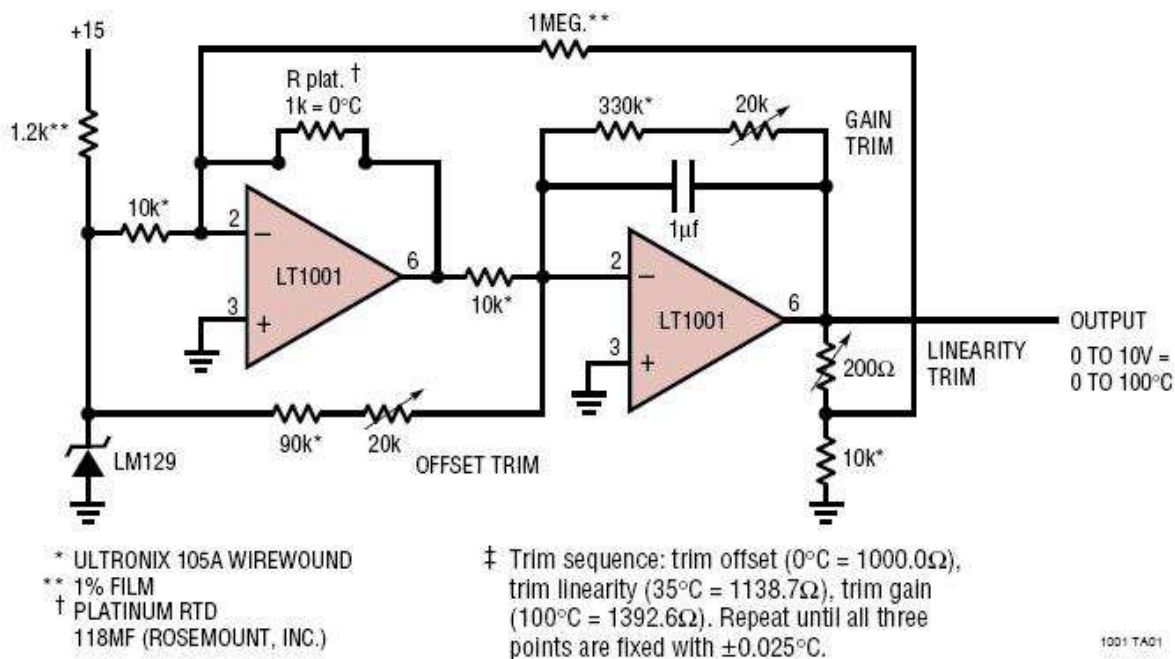
Obr. 131 Zapojení snímače PT1000 do odporového můstku, zde ve verzi napájení pouze 3 V, upraveno podle [Linear Technology Corporation]

Další běžnou možností je přímé měření úbytku napětí na snímači (obr. 132). Má-li být úbytek napětí přímo úměrný odporu snímače, musí být napájen ze zdroje konstantního proudu [REGAN, 2005].



Obr. 132 Zapojení snímače PT1000 se zdrojem konstantního proudu, upraveno podle [Linear Technology Corporation]

V literatuře i praxi existuje však celá řada dalších, méně obvyklých řešení. Příkladem může být zapojení na obr. 133. Zde je snímač zapojen jako součást záporné zpětné vazby prvního OZ. Zapojení umožňuje trojbodovou kalibraci funkční závislosti odporu snímače na teplotě. Vedle běžného nastavení nuly (offset trim) a maximální hodnoty (gain trim) je zde možné nastavit bod odpovídající polovině rozsahu (linearity trim). V případě použití stejných hodnot odporů jako na obr. 133 lze opakovanou kalibrací ve třech bodech dosáhnout linearity výstupu $\pm 0,025^{\circ}\text{C}$ na rozsahu teplot 0 až 100°C , což je vynikající výsledek. V případě následného digitálního zpracování analogového výstupu je však obvykle výhodnější provést linearizaci zadáním linearizačního polynomu softwarově, zapojení a nastavení OZ pak může být jednodušší [WILLIAMS, 1985].

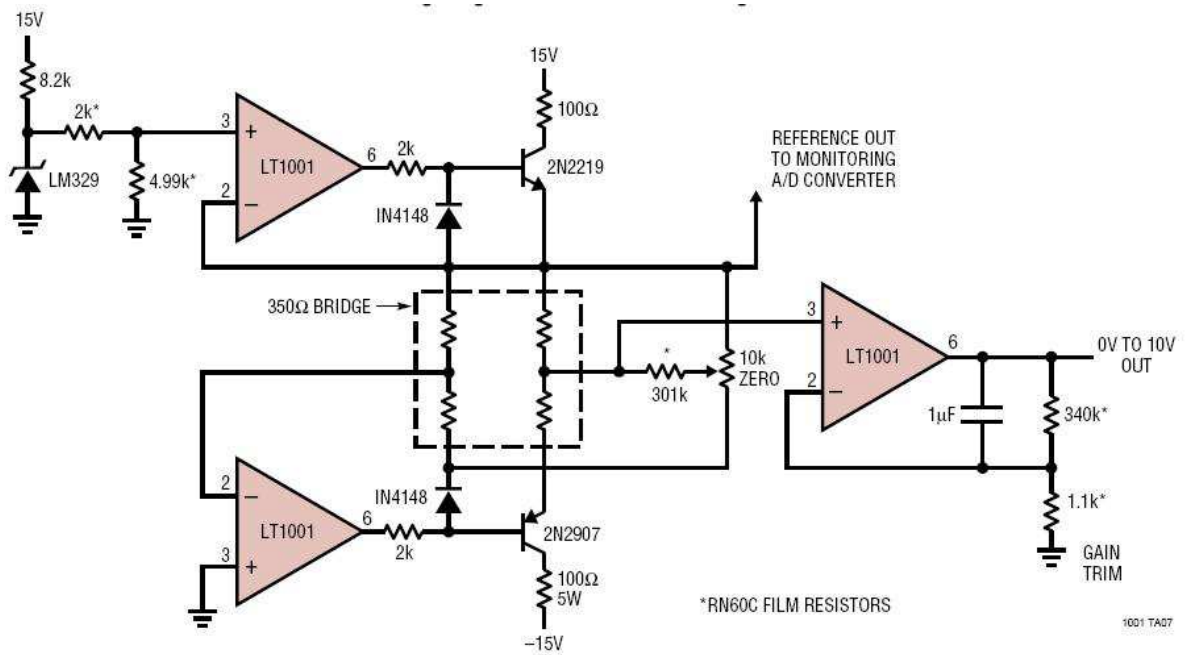


Obr. 133 Zapojení snímače PT1000 s třibodovou kalibrací,
 upraveno podle [Linear Technology Corporation]

8.1.4 Snímač točivého momentu

Snímač točivého momentu je tvořen tenzometrickým mostem nalepeným na povrchu kardanového hřídele umístěného v prostoru pod kabinou LVS710. Tenzometrický most sestává ze čtyř tenzometrických odporových elementů firmy HBM o jmenovitém odporu 350 ohmů. Tenzometry jsou na hřídeli nalepeny tak, aby docházelo k teplotní kompenzaci. Prodloužení tenzometrů je úměrné točivému momentu (M_k), který deformuje kardan zkrutem. K tenzometrickému můstku je připojena elektronika rotoru obsahující měřící zesilovač a obvody indukčního přenosu informace a napájení mezi rotorem a statorem. Za statorovou anténou je umístěna statorová elektronika, která je napájena ze zdroje 24V. Zdroj je řešen jako DC/DC měnič 13-30V/24 V z důvodu eliminace kolísání palubního napětí 24 V v závislosti na zatížení alternátoru a akumulátoru. Veškerá elektronika je umístěna v prostoru kardanové hřídele pod kabinou, napájecí zdroj je umístěn v rozvaděči měřící ústředny nad kapotou hydrauliky. Výstup statorové elektroniky s napětím ± 10 V, který je úměrný točivému momentu, je přiveden ke zpracování na diferenciální analogový vstup modulu NI 9205 ústředny.

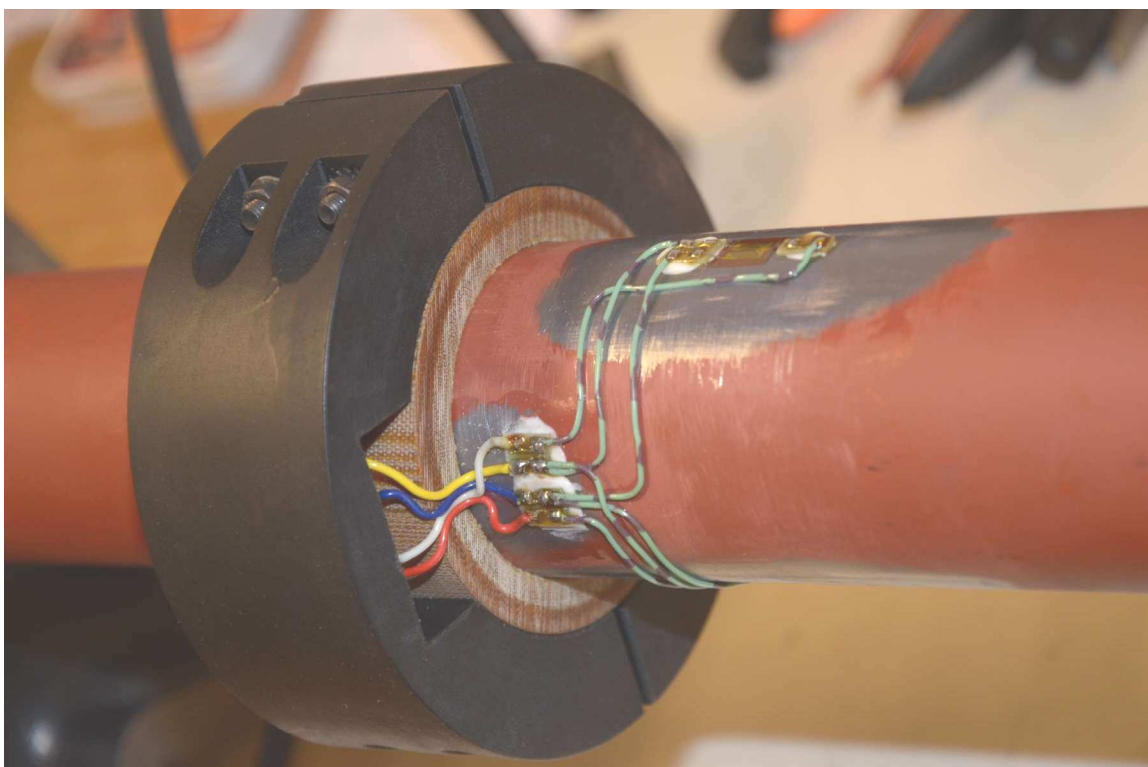
Součástí rotorové elektroniky je přístrojový zesilovač napětíové difference na můstku a referenční zdroj napětí pro odporový tenzometrický můstek. Příklad zapojení je na obr. 134. Při realizaci snímače točivého momentu byly využity zkušenosti z předchozích konstrukcí měření výkonu rotujících částí strojů [KLEPÁRNÍK et al., 2008].



Obr. 134 Příklad zapojení zesilovače rotorové elektroniky, upraveno podle [Linear Technology Corporation]



Obr. 135 Pohled na umístění kardanu v prostoru pod rotující kabinou



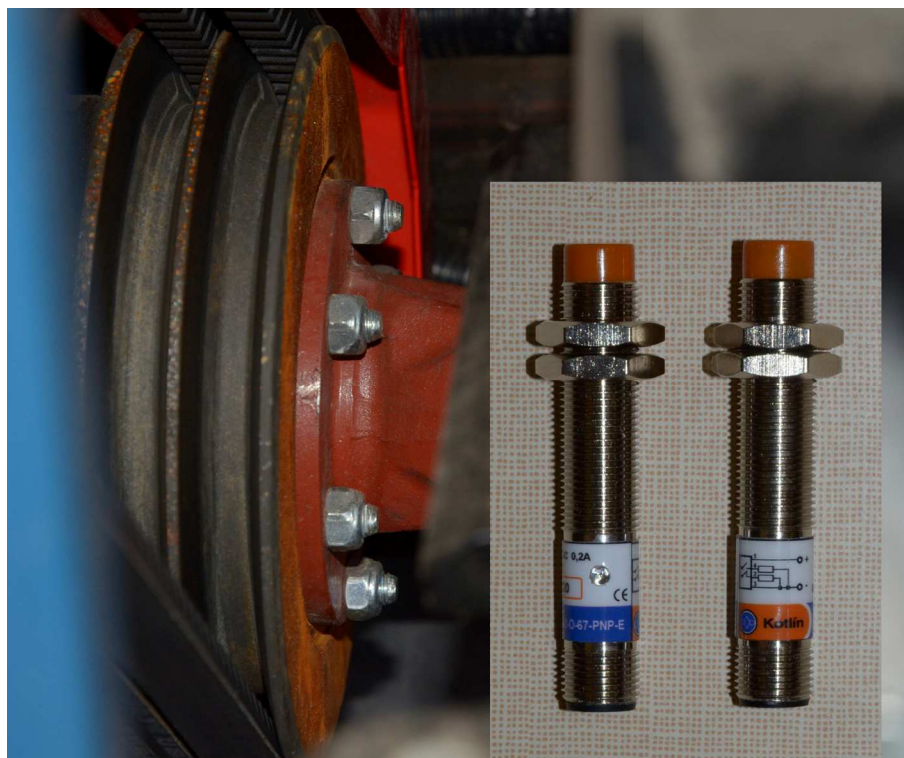
Obr. 136 Osazené tenzometry a rotorová elektronika na kardanu



Obr. 137 Kalibrace snímače točivého momentu kardanu

8.1.5 Snímač otáček

Snímač otáček je řešen pomocí indukčního čidla Kotlín, typ KS04 CD012-O-67-PNP-E. Snímač je vestavěn do šroubu M12 délky 70 mm, doplněný o připojovací konektor M12x1. Snímač registruje přítomnost speciálně upravených ocelových podložek (úhelníků) ve svém indukčním poli, které jsou umístěny pod matkami šesti šroubů příruby kardanu na straně výstupní hřídele motoru. Výstupem snímače v uvedeném uspořádání je šest pulsů na jednu otáčku kardanové hřídele, signál je zpracováván modulem NI cDAQ9401.

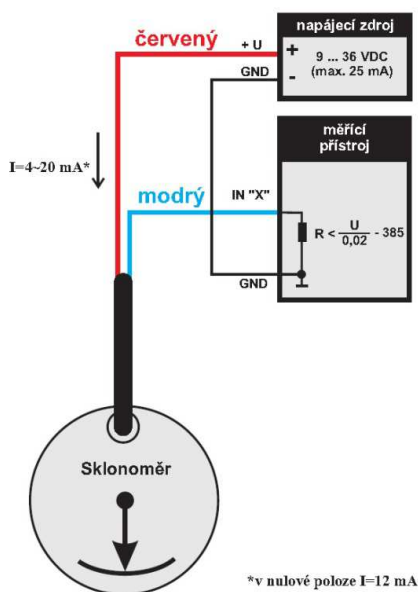


Obr. 138 Umístění snímače otáček (vlevo), snímač otáček (vpravo)

8.1.6 Snímače sklonu

Snímače podélného a příčného sklonu vyvážecí soupravy umožňují identifikovat sklon právě projížděného terénu. Zde byly použity kapalinové sklonoměry STS110-1-I s rozsahem $\pm 30^\circ$ pro podélný a $\pm 20^\circ$ pro příčný sklon, se kterými mám dlouhodobou zkušenost z aplikací v elektronice měření stability stromů. Rozlišení sklonoměrů je $\pm 0,03\%$ z celého rozsahu. Zapojení do obvodu je řešeno jako pasivní proudová smyčka napájená ze zdroje 12 V z palubního napětí 24 V přes DC/DC měnič 18-30V/12 V. Úbytek napětí na měřicím odporu, který je úměrný sklonu snímače, je vyhodnocován modulem NI cDAQ 9205. Snímače podélného a příčného sklonu jsou umístěny přímo v rozvaděči měřicího systému na kapotě hydrauliky LVS710. Vzhledem k velké citlivosti kapalinové náplně snímačů na vibrace je třeba tyto snímače utlumit od vibrací zejména z prostoru hydrauliky. Další možností je filtrace složky vibrací z výstupního signálu snímače. V současné verzi umístění snímačů náklonu je po filtraci výstupního signálu možné snímače použít k měření sklonu, zároveň však umožňují

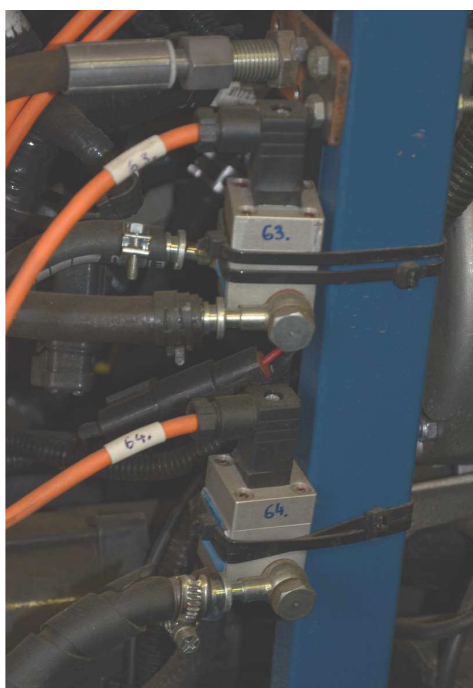
detekci poruchy v okruhu hydraulického čerpadla pojezdu. (Bližší informace v kapitole vyhodnocení měření na LVS710, obr. 169).



Obr. 139 Zapojení sklonoměru

8.1.7 Snímače průtoku paliva

Průtokoměr paliva je řešen jako zubový objemový průtokoměr. Otáčky zubového kola jsou snímány Hallovou sondou a jejich frekvence odpovídá objemovému průtoku. Vzhledem k principu palivové soustavy vznětových motorů jsou osazeny průtokoměry v páru, přičemž vlastní spotřeba paliva je dána rozdílem průtoku palivového čerpadla a zpětného průtoku paliva do nádrže. Pro zvýšení přesnosti měření průtoku je navíc měřena teplota nafty snímačem PT100.



Obr. 140 Umístění průtokoměrů paliva (snímač č. 63 a 64)

Závěrem kapitoly uvádím několik fotografií stručně dokumentujících realizaci díla.



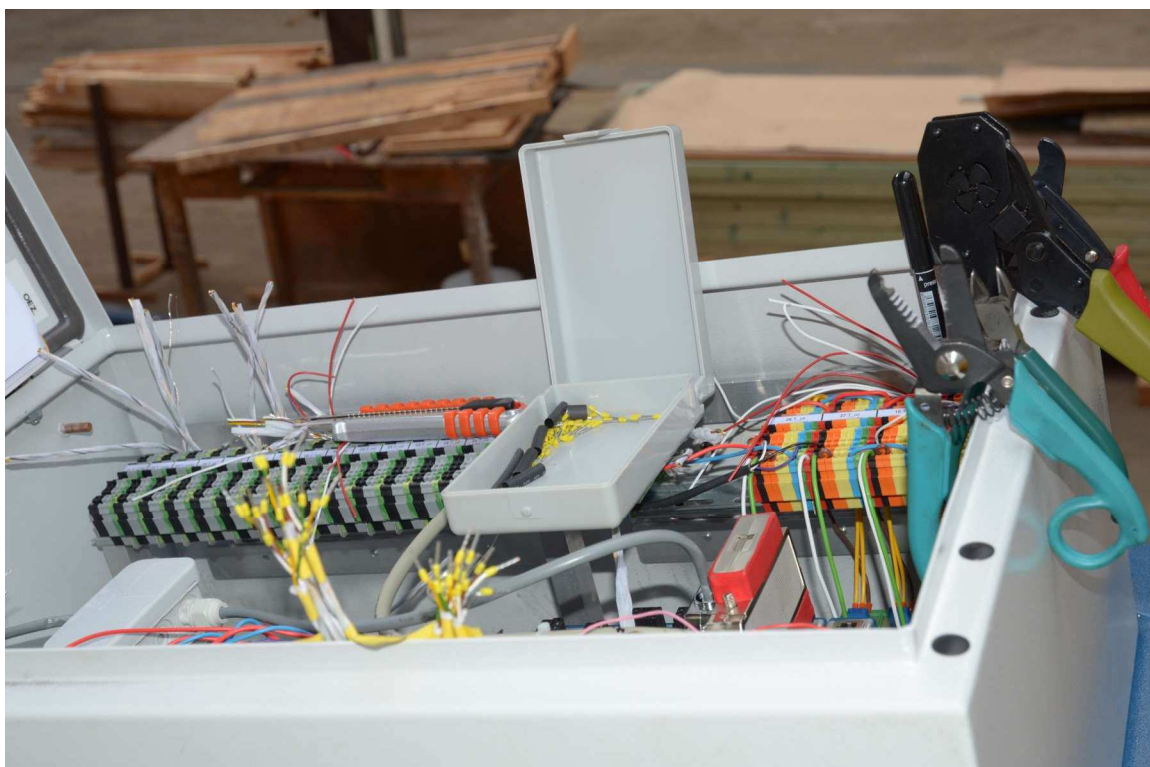
Obr. 141 Podvozek na rámu budoucího prototypu vyvážecí soupravy LVS710.
2. 4. 2013, montážní hala firmy Strojírna Novotný, Vitošov



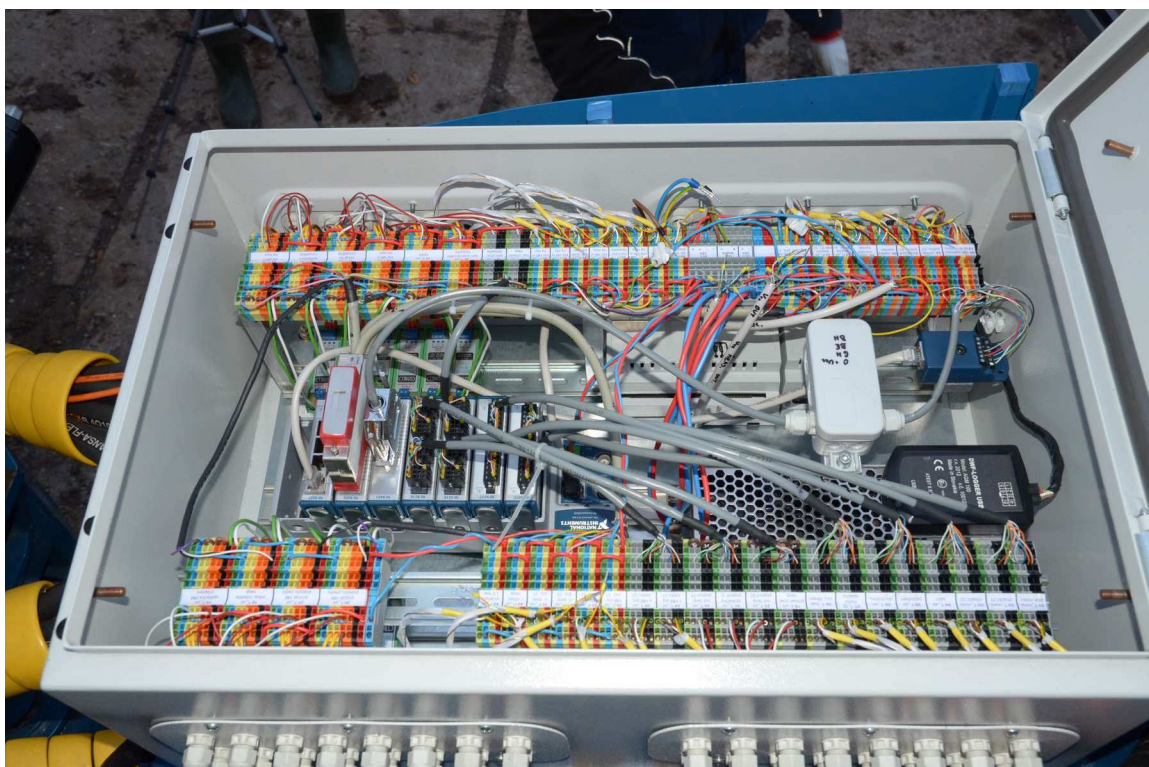
Obr. 142 LVS710 montáž měřicího systému – realizace kabeláže
22. 9. 2013, montážní hala Mendelovy univerzity, Josefov



Obr. 143 LVS710 montáž měřicího systému – celkový pohled na stroj
20. 10. 2013, montážní hala Mendelovy univerzity, Josefov



Obr. 144 LVS710 montáž měřicího systému – montáž rozvaděče
20. 10. 2013, montážní hala Mendelovy univerzity, Josefov



Obr. 145 LVS710 pohled na osazení kompletního rozvaděče měřicího systému
11. 11. 2013, výjezd z terénního polygonu Mendelovy univerzity, Josefov,
stav po skončení první etapy měření, před demontáží měřicího systému a odvozem stroje.

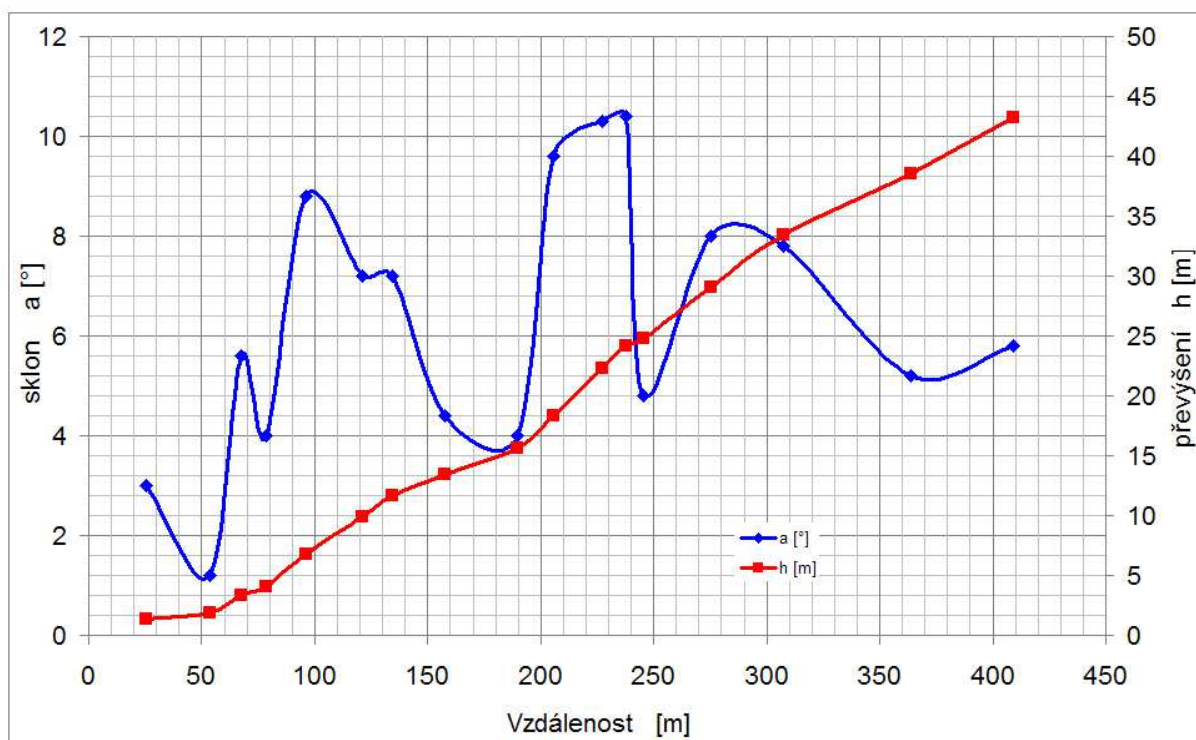
8.2 Výsledky a diskuse

Prototyp vyvážecí soupravy LVS710 zkoušený v průběhu listopadu 2013 v prostoru ŠLP Křtiny je vybaven motorem Cummins QSB3.3 s maximálním točivým momentem 415 Nm při 1600 ot/min. Těmto parametrům odpovídá výkon 69 kW. Maximálního výkonu 82 kW je dosahováno při otáčkách 2400 ot/min. Tyto parametry motoru jsou uvedeny výrobcem v dokumentaci.

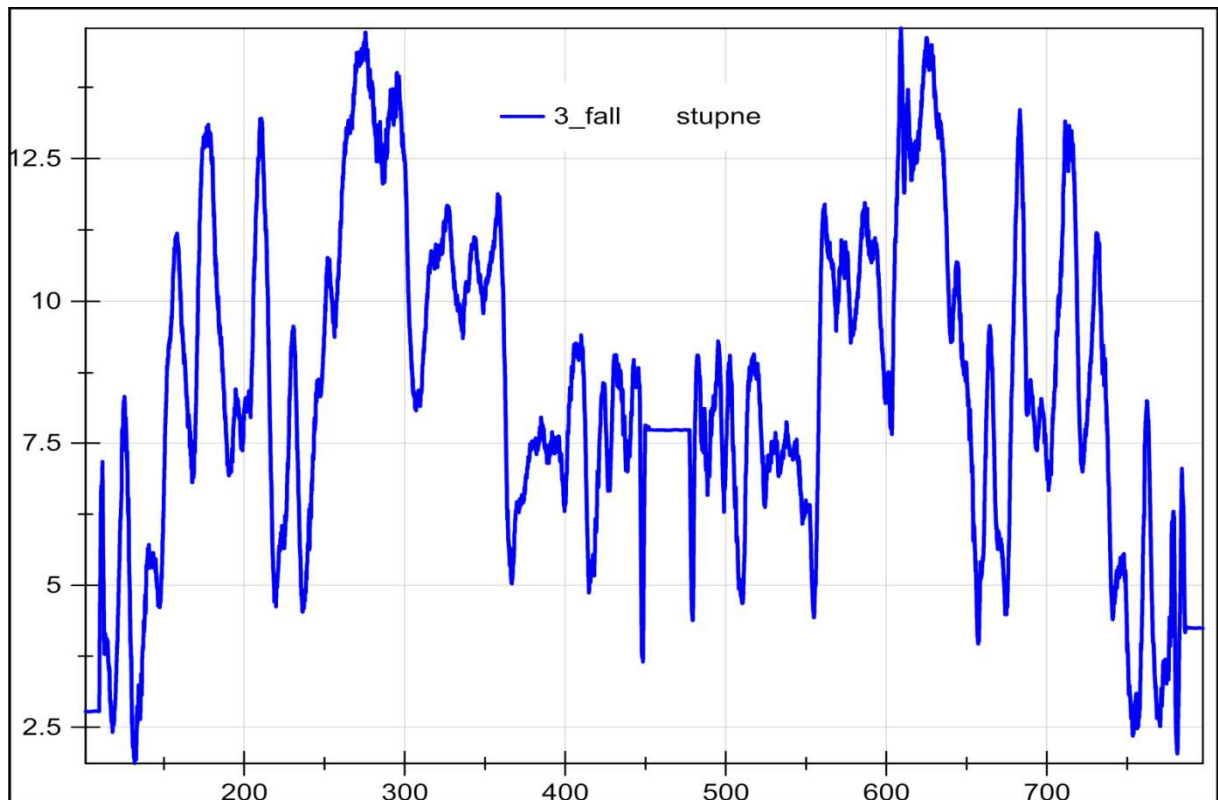
Jízda v terénu byla zkoušena na zařazený rychlostní stupeň „želva“. Jízda po asfaltové cestě byla zkoušena na zařazený rychlostní stupeň „zajíc“.

8.2.1 Testování LVS710 na terénním polygonu.

Vyvážecí souprava LVS710 byla testována na vytyčeném terénním polygonu v kú Josefov dne 6. 11. 2013. Sklon a podélný profil terénní cesty je na obrázku č. 1. Řidič vyjel cestu do kopce s definovaným zatížením, poté zastavil, otočil kabinu a couváním sjel z kopce zpět na výchozí pozici, kde došlo ke změně nákladu (zatížení). Celková délka terénního polygonu tedy je 420 m, celkové převýšení 43 m.



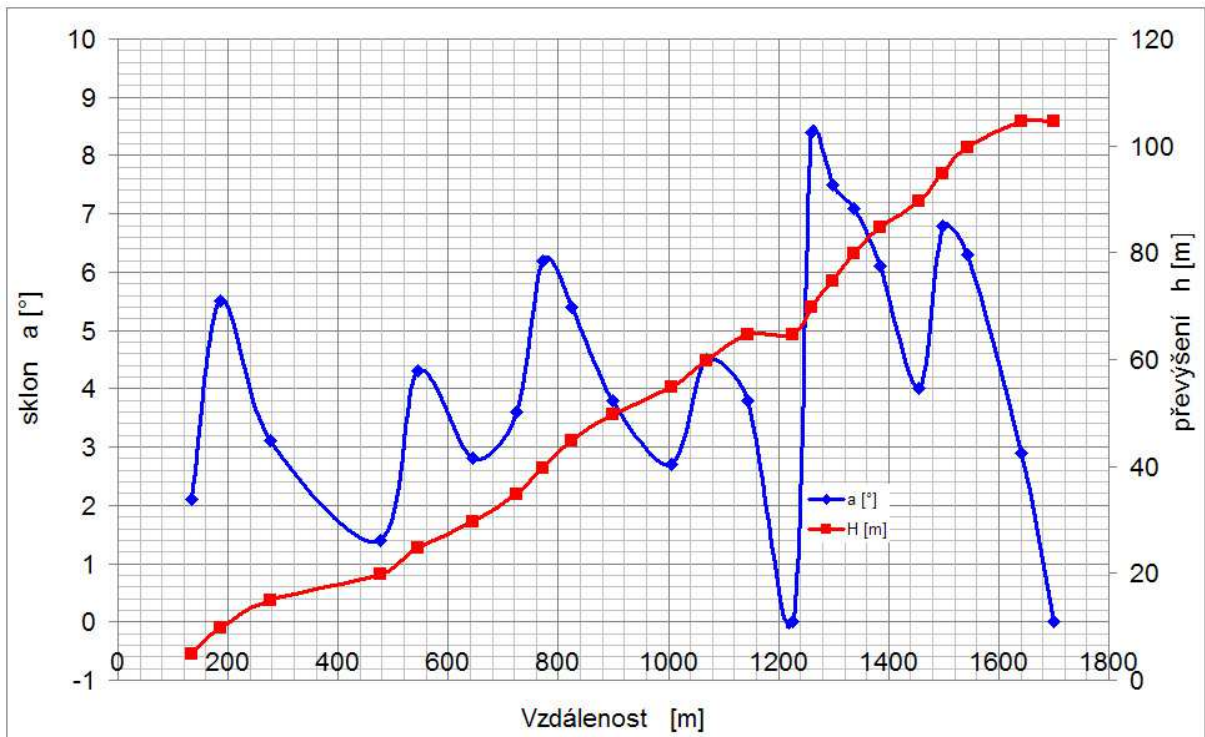
Obr. 146 Sklon a podélný profil terénní cesty, změřeno dálkoměrem/sklonoměrem Nikon



Obr. 147 Podélný sklon terénní cesty, signál čidla č. 67

Sklon terénní cesty zaznamenaný snímačem sklonu (čidlo č. 67, obr. 147) odpovídá skutečnému sklonu terénu, který byl orientačně měřen elektronickým dálkoměrem – sklonoměrem Nikon. Záznam je symetrický a odpovídá jízdě do kopce a následné jízdě s kopce couváním. Sklonoměr 67 zaznamenává i drobné terénní nerovnosti, které sklonoměr Nikon není schopen zohlednit díky jiné metodě měření. Pohledem na obr. 151, 155, 159 a 163 lze usoudit, že hodnoty registrované sklonoměrem přímo odpovídají hodnotám točivého momentu. Pro další studium vztahu energetických parametrů a sklonu terénu je tedy vhodné používat filtrovaná data čidla č. 67.

Dne 8. 11. 2013 bylo měření na terénním polygonu doplněno měřením jízdy do kopce plně naložené soupravy na asfaltové cestě z haly v Josefově na pilu do Olomučan. Měření probíhalo pouze jednosměrně, při jízdě do kopce. Celková délka trasy je 1700 m s celkovým převýšením 105 m. Sklon a podélný profil asfaltové cesty je znázorněn na obr. 3. Sklon asfaltové cesty zaznamenaný snímačem č. 67 je na obr. 149.



Obr. 148 Sklon a podélný profil asfaltové cesty z haly v Josefově na pilu v Olomučanech, pouze orientační stanovení z rozložení vrstevnic na webu mapy.cz



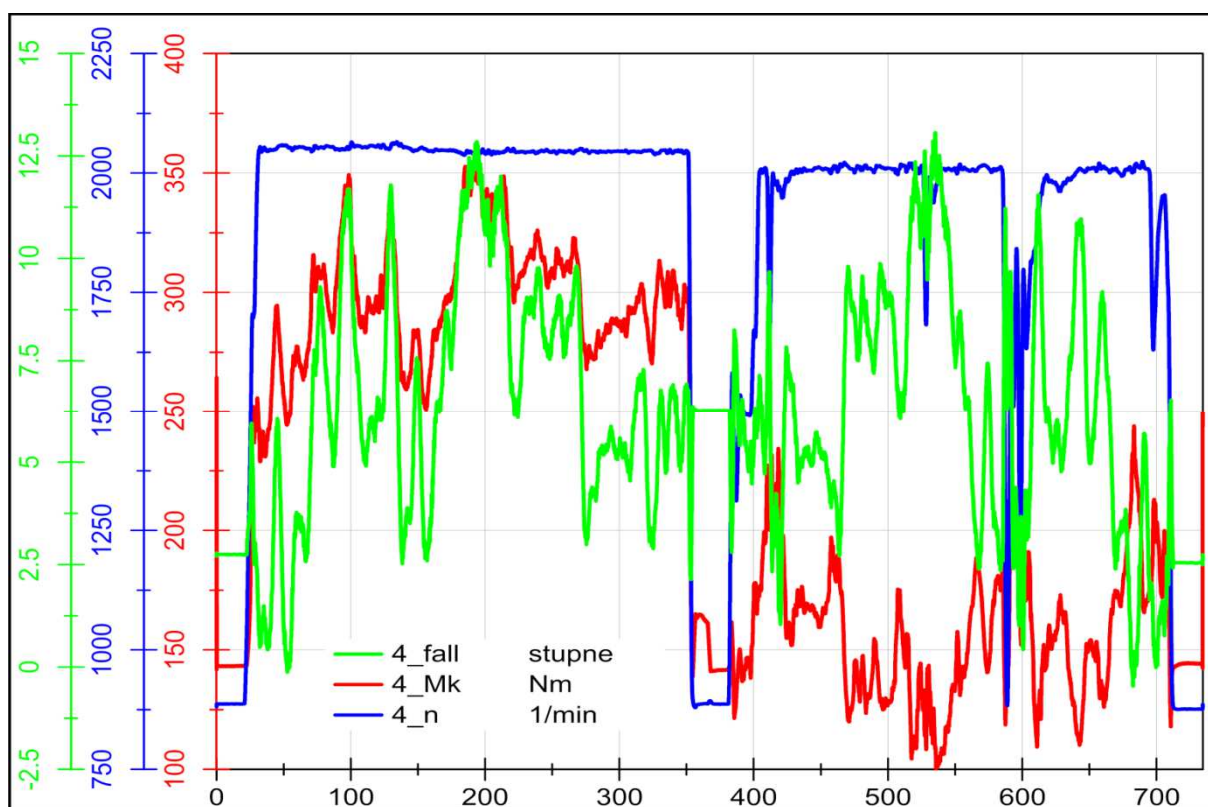
Obr. 149 Sklon asfaltové cesty z haly na pilu v Olomučanech – čidlo č. 67

8.2.1.1 Jízda prázdné vyvážecí soupravy

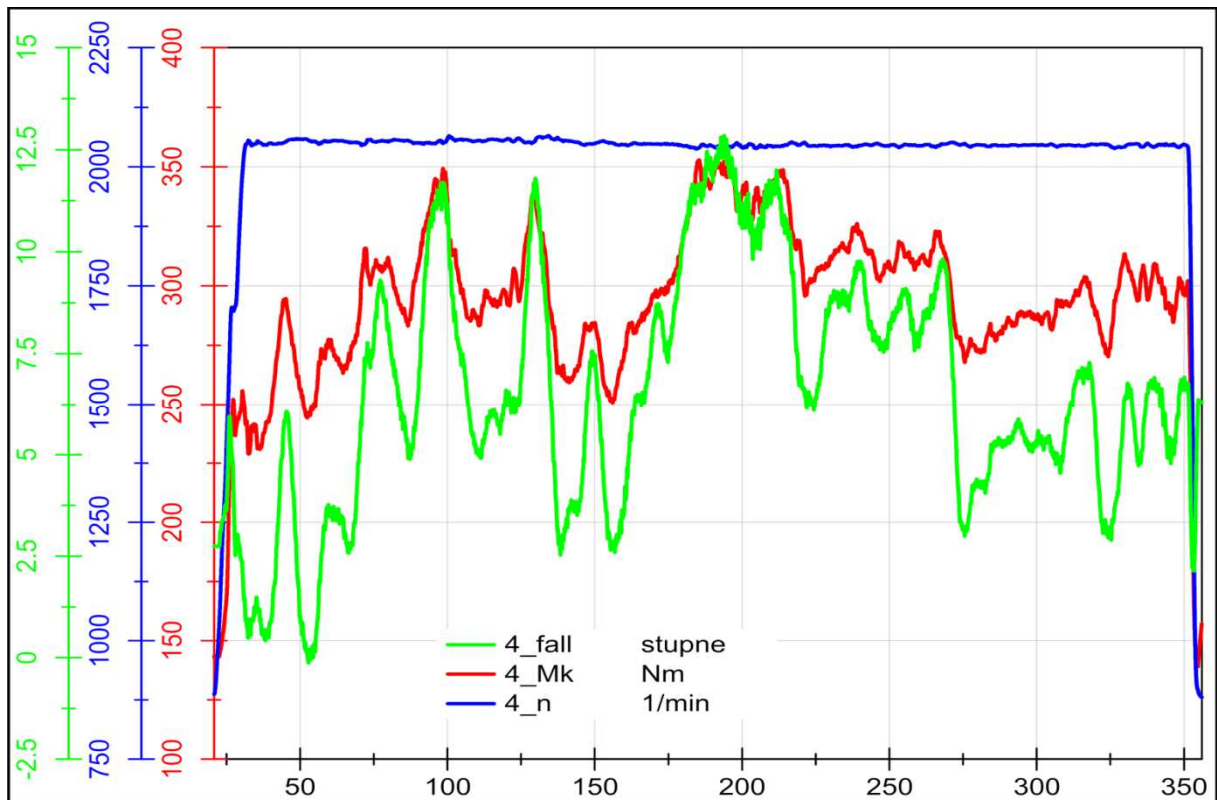
Celková hmotnost prázdné vyvážecí soupravy je 9 t. Záznam točivého momentu (Mk) a otáček (n) kardanového hřídele při jízdě na terénním polygonu je na obr. 150. Energetické parametry jsou dále vyhodnocovány pouze pro jízdu do kopce, této skutečnosti odpovídá zobrazený detail jízdy do kopce na obr. 151. Maximální moment v místě nejvyššího stoupání cesty je 350 Nm, otáčky jsou konstantní, 2200 ot/min.

Teplota hydraulického oleje před chladičem během jízdy do kopce vystoupala ze 42 °C na 58 °C, teplota hydraulického oleje za chladičem vystoupala z 5 °C na 26 °C. (obr. 152) Teplotní diference na chladiči hydraulického oleje byla udržována na hodnotě 32 °C. Teplota hydraulického oleje v nádrži byla téměř konstantní, a to asi 45 °C.

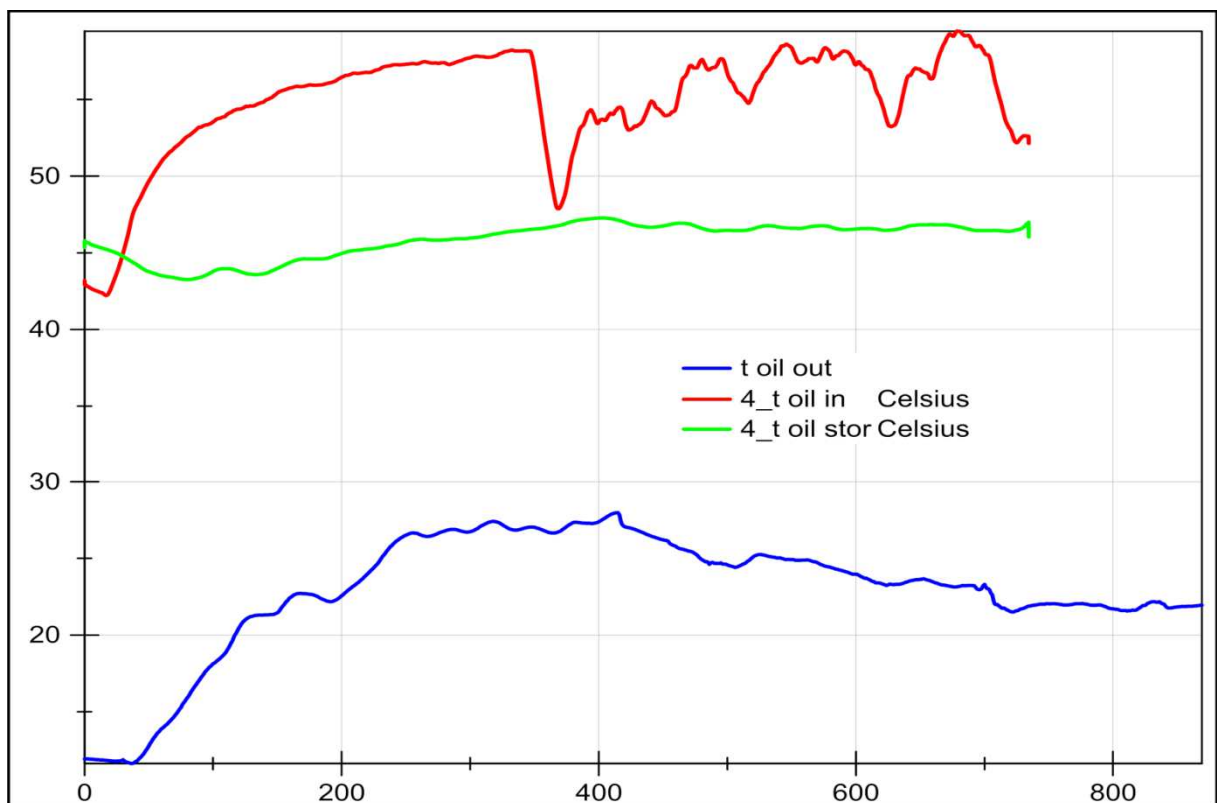
Tlaková diference hydraulického čerpadla pojezdu je znázorněna na obrázku č. 153. Průběh tlaků na čidle č. 31 (p oil pump 02) odpovídá průběhu točivého momentu (Mk) na kardanové hřídeli a průběhu podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu do kopce. Maximální dosahovaný tlak 110 bar.



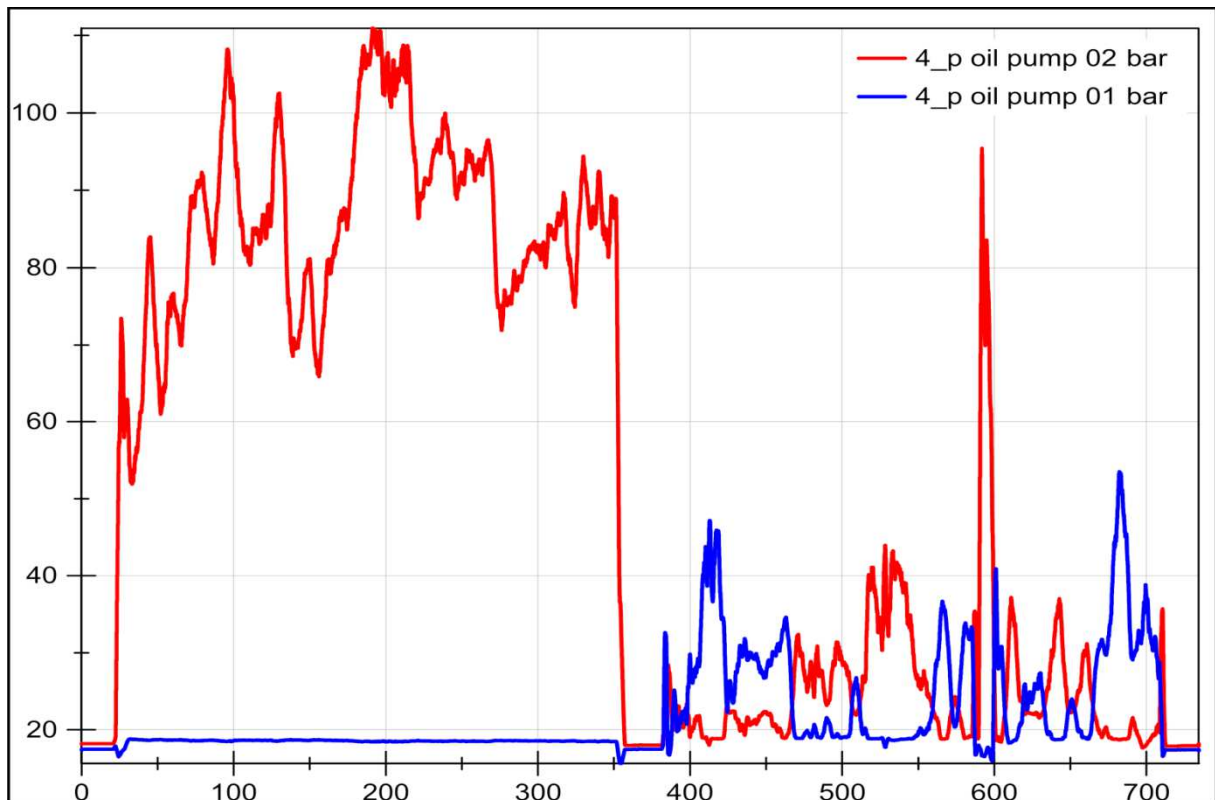
Obr. 150 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu prázdné vyvážecí soupravy



Obr. 151 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu prázdné vyvážecí soupravy, detail jízdy do kopce, prázdná souprava



Obr. 152 Záznam průběhu teplot hydraulického oleje před chladičem (t oil in), za chladičem (t oil out) a v nádrži (t oil stor), prázdná souprava



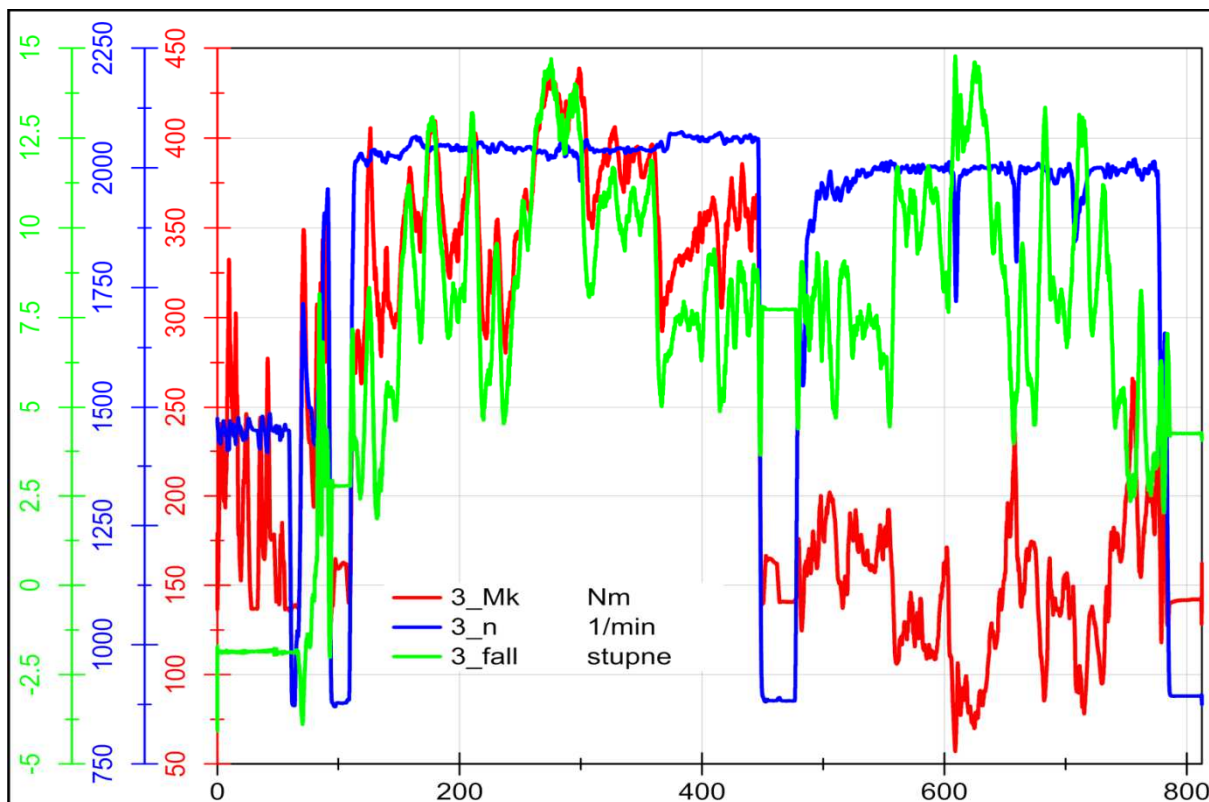
Obr. 153 Záznam průběhu tlaků za čerpadlem pojazdu (p oil pump 01) a (p oil pump 02), u prázdné soupravy

8.2.1.2 Jízda polovičně naložené vyvážecí soupravy

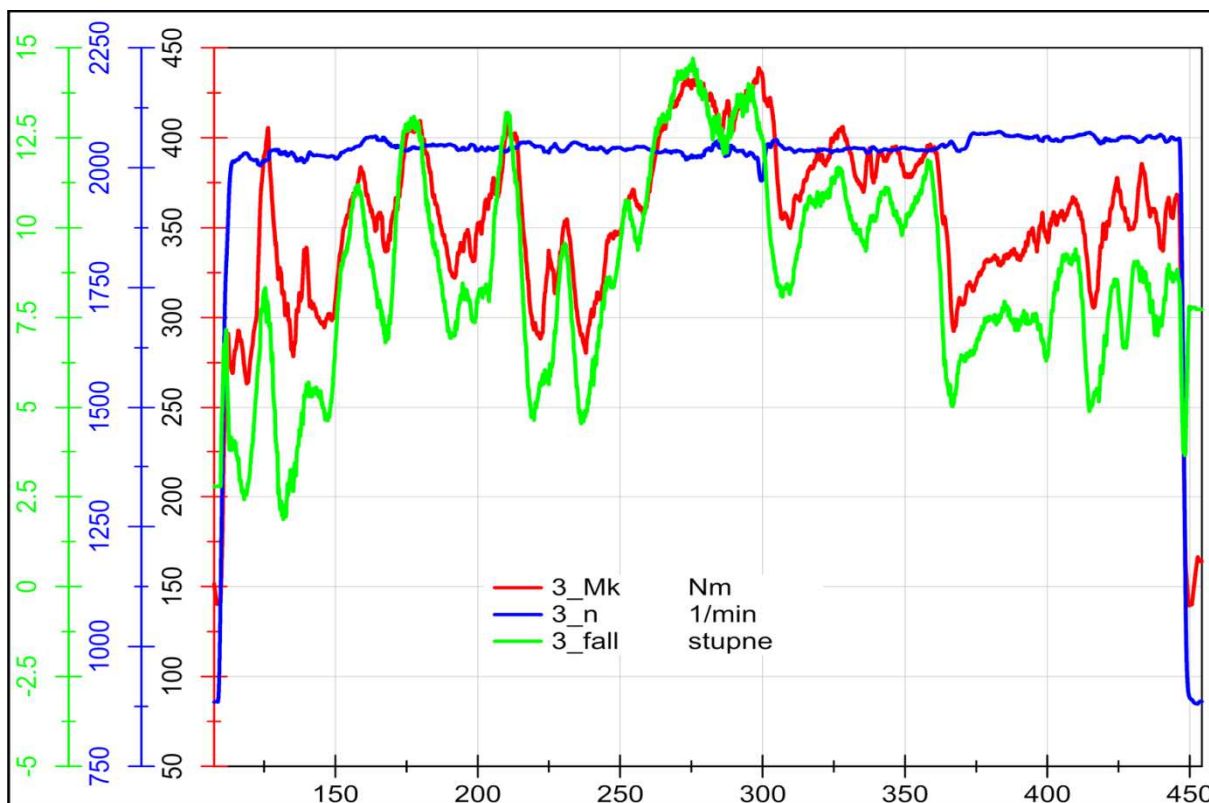
Celková hmotnost polovičně naložené vyvážecí soupravy je 14 t. Záznam točivého momentu (Mk) a otáček (n) kardanového hřídele při jízdě na terénním polygonu je na obr. 154. Energetické parametry jsou dále vyhodnocovány pouze pro jízdu do kopce, této analyzované části záznamu odpovídá zobrazený detail jízdy do kopce na obr. 155. Maximální moment v místě nejvyššího stoupání cesty je 420 Nm, otáčky jsou konstantní, 2200 ot/min. Při max. sklonu terénu však již dochází ke snižování otáček. Při tomto provozním stavu je dosaženo maximálního točivého momentu motoru. Z uvedeného lze tedy usuzovat, že výkon motoru pro zkoušený prototyp LVS710 je nedostatečný.

Teplota hydraulického oleje před chladičem během jízdy do kopce vystoupala ze 42 °C na 58 °C, teplota hydraulického oleje za chladičem vystoupala z 20 °C na 38 °C. (obr. 156) Teplotní diference na chladiči hydraulického oleje byla udržována na hodnotě cca 20 °C. Teplota hydraulického oleje v nádrži byla téměř konstantní, a to asi 45 ± 2 °C.

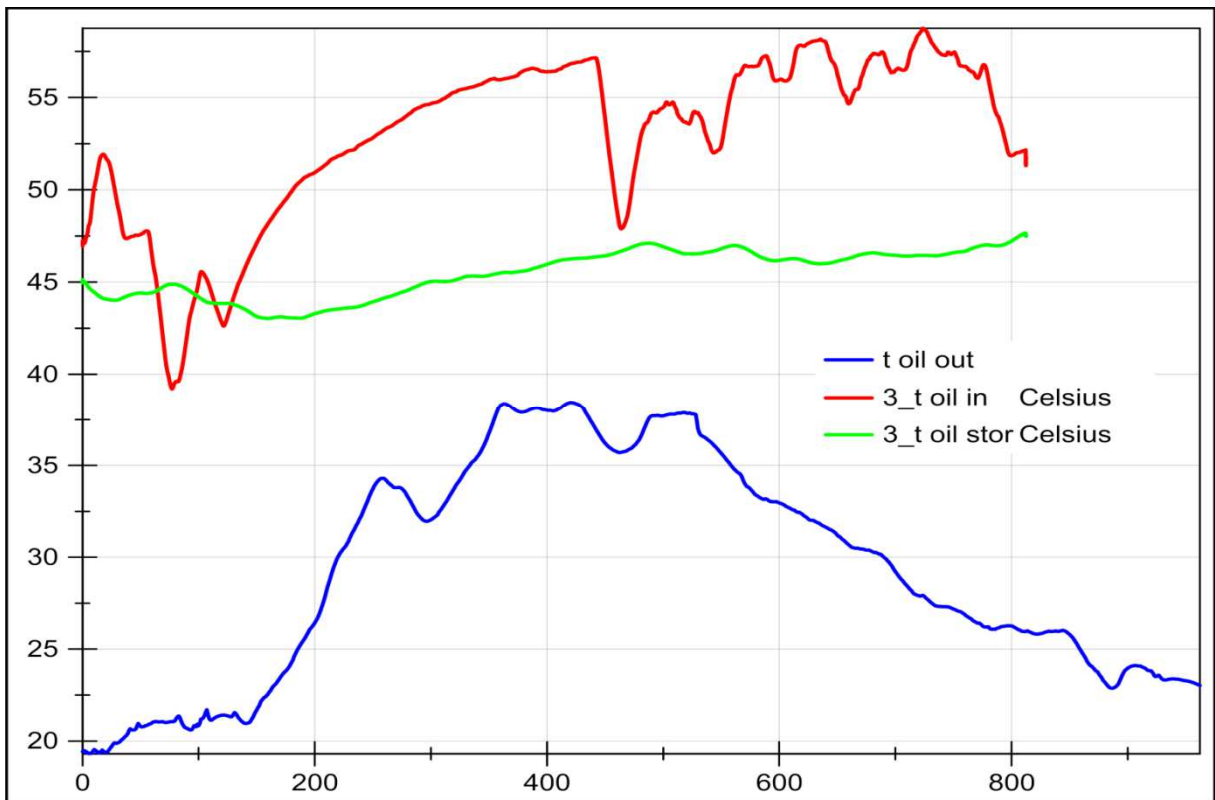
Tlaková diference hydraulického čerpadla pojazdu je znázorněna na obrázku č. 157. Průběh tlaků na čidle č. 31 (p oil pump 02) odpovídá průběhu točivého momentu (Mk) na kardanové hřídeli a průběhu podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu do kopce. Maximální dosahovaný tlak je 150 bar.



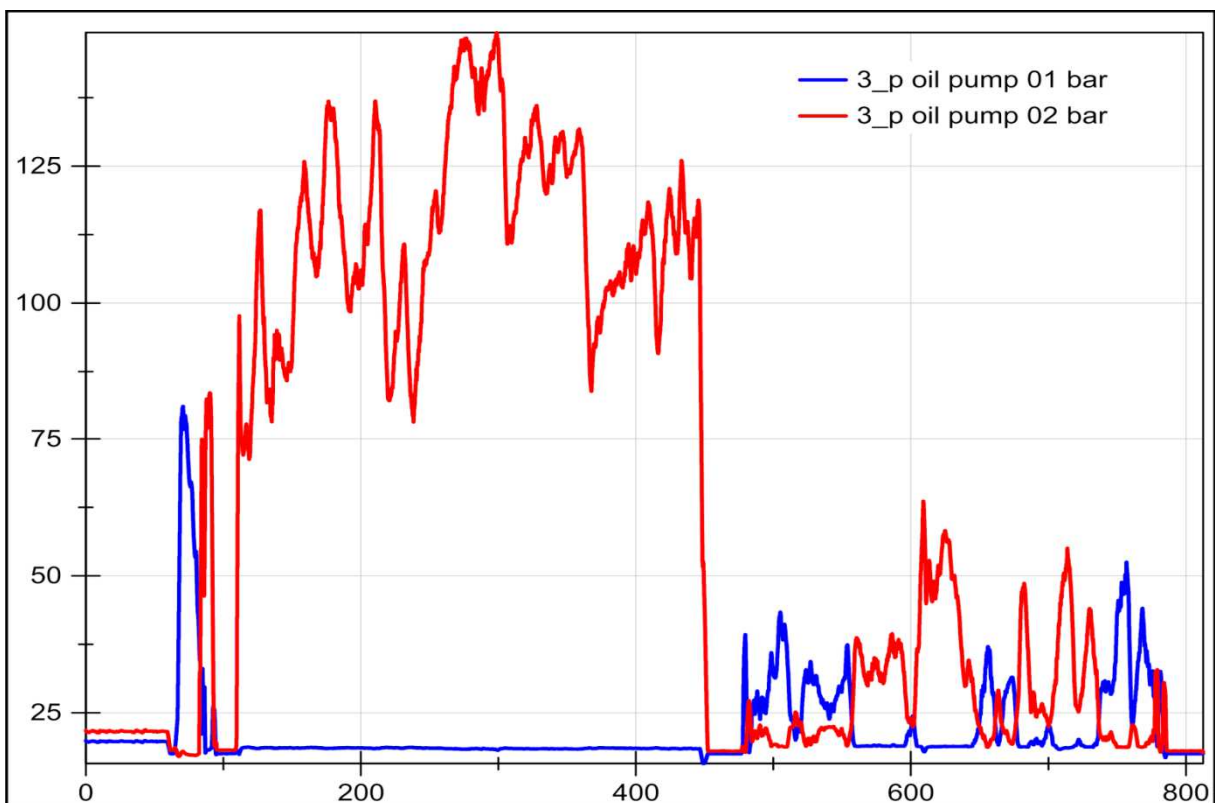
Obr. 154 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu polovičně naložené vyvážecí soupravy



Obr. 155 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu polovičně naložené vyvážecí soupravy, detail jízdy do kopce



Obr. 156 Záznam průběhu teplot hydraulického oleje před chladičem (t oil in), za chladičem (t oil out) a v nádrži (t oil stor), polovičně naložená souprava



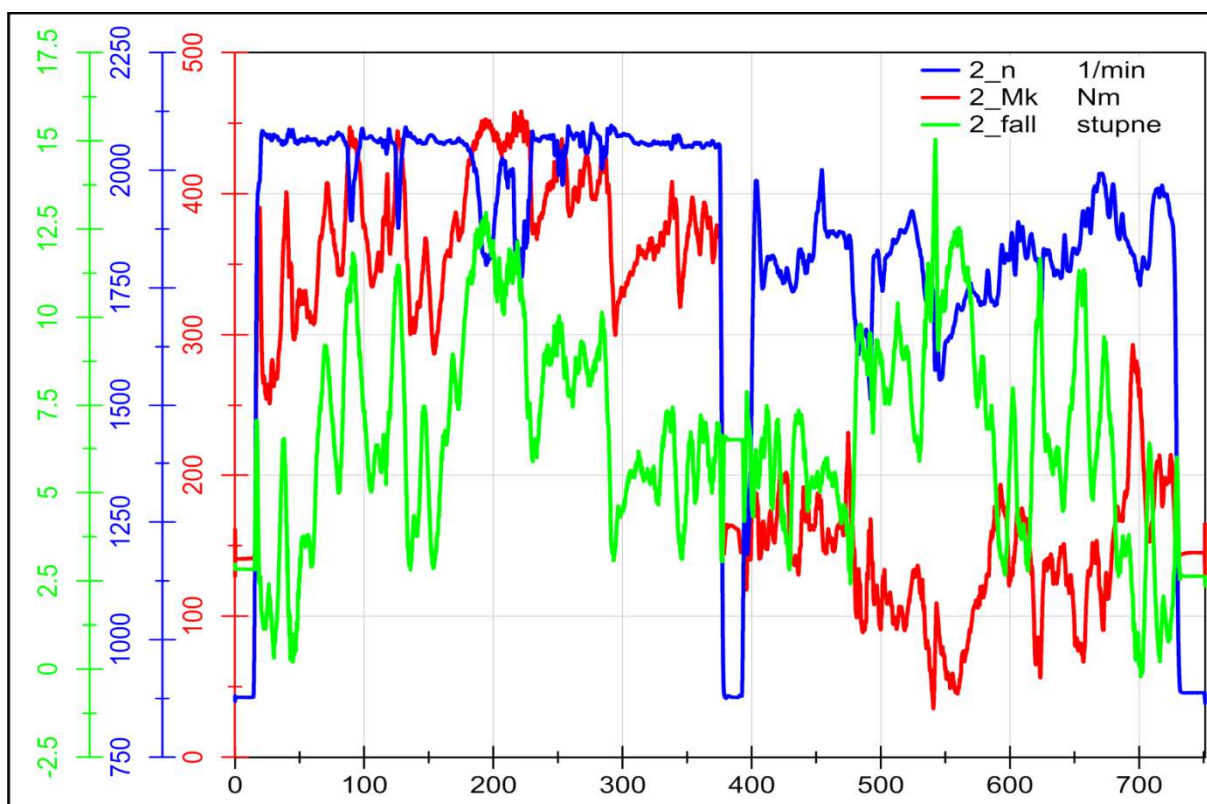
Obr. 157 Záznam průběhu tlaků za čerpadlem pojezdu (p oil pump 01) a (p oil pump 02), polovičně naložená souprava

8.2.1.3 Jízda plně naložené vyvážecí soupravy

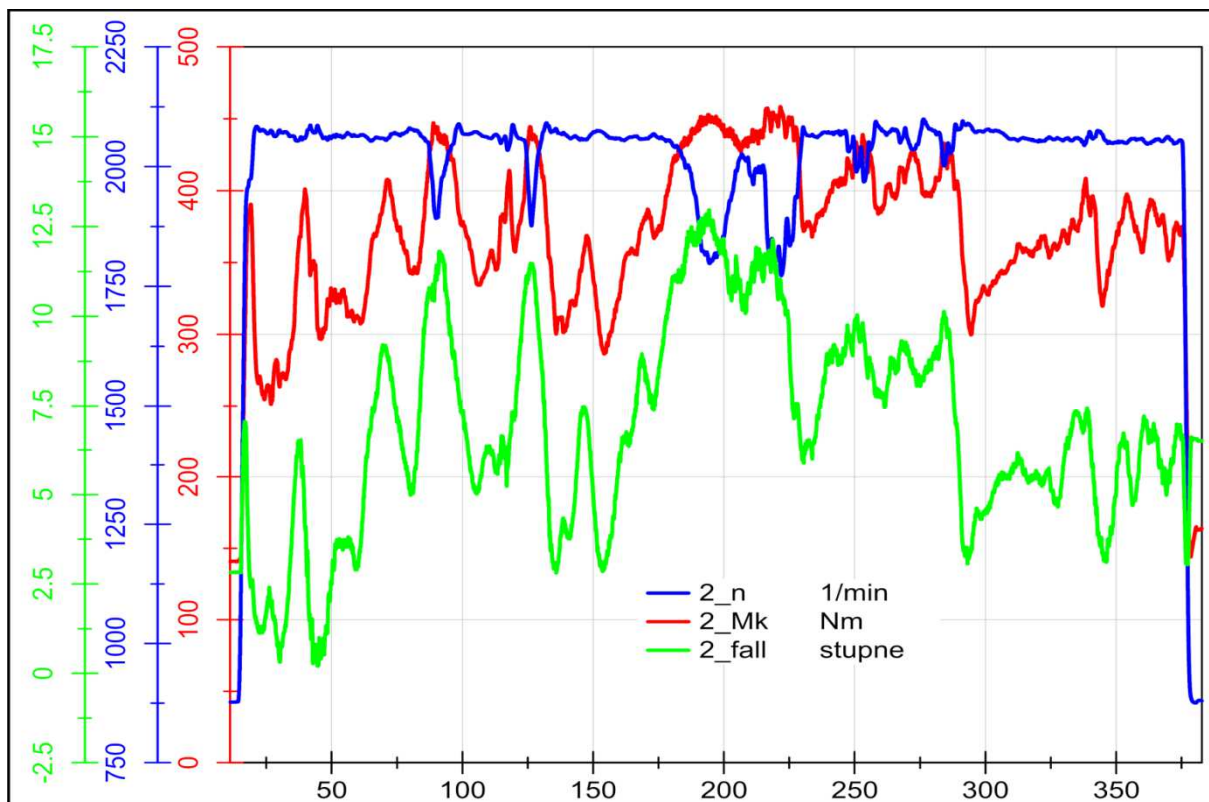
Celková hmotnost plně naložené vyvážecí soupravy je 15,5 t. Záznam točivého momentu (Mk) a otáček (n) kardanového hřídele při jízdě na terénním polygonu je na obr. 158. Energetické parametry jsou dále vyhodnocovány pouze pro jízdu do kopce, této skutečnosti odpovídá zobrazený detail jízdy do kopce na obr. 159. Maximální moment v místě nejvyššího stoupání cesty je 450 Nm, otáčky však již kolísají mezi 2200 ot/min a 1800 ot/min. Uvedená skutečnost dokazuje nedostatečný výkon motoru.

Teplota hydraulického oleje před chladičem během jízdy do kopce vystoupala z 51 °C na 60 °C, teplota hydraulického oleje za chladičem vystoupala z 18 °C na 40 °C. (obr. 160) Teplotní diference na chladiči hydraulického oleje byla na počátku jízdy do kopce cca 30 °C a na konci jízdy do kopce cca 20 °C. Teplota hydraulického oleje v nádrži byla téměř konstantní, a to asi 46,5 °C.

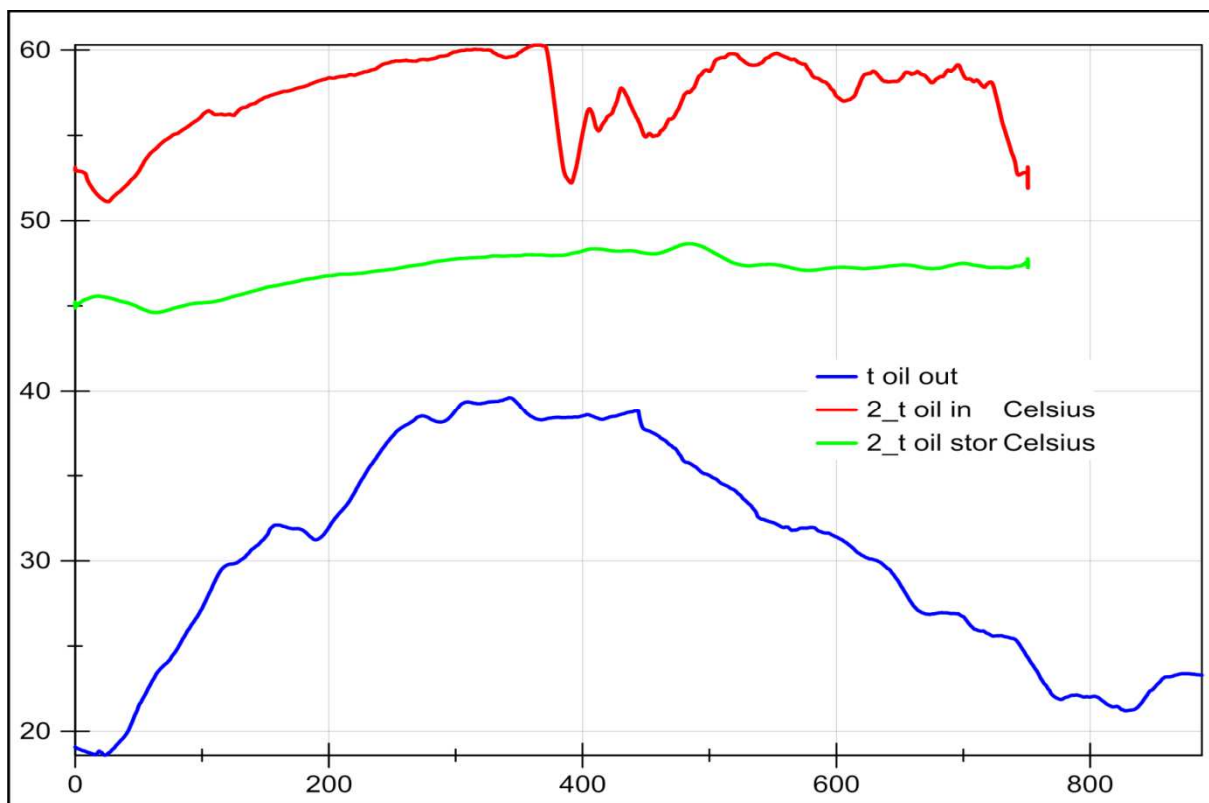
Tlaková diference hydraulického čerpadla pojezdu je znázorněna na obrázku č. 161. Průběh tlaků na čidle č. 31 (p oil pump 02) odpovídá průběhu točivého momentu (Mk) na kardanové hřídeli a průběhu podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu do kopce. Maximální dosahovaný tlak je 175 bar.



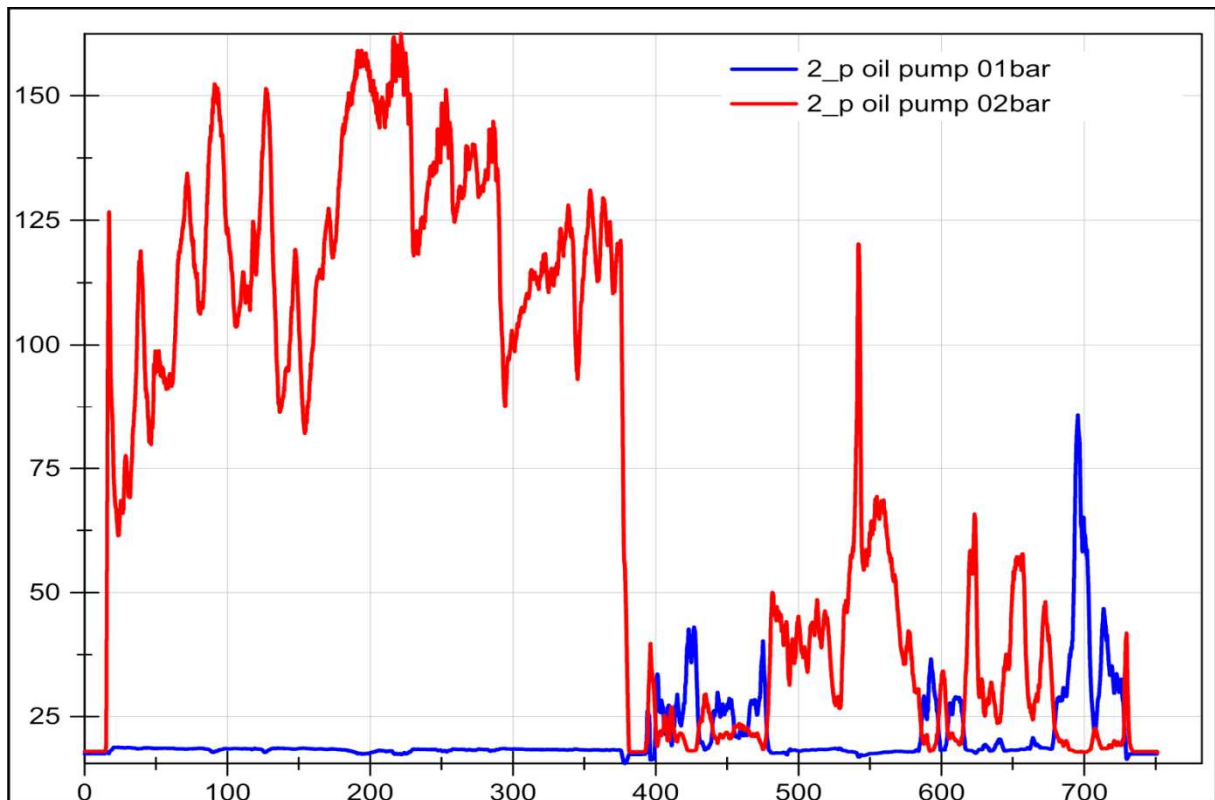
Obr. 158 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu plně naložené vyvážecí soupravy



Obr. 159 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu plně naložené vyvážecí soupravy, detail jízdy do kopce



Obr. 160 Záznam průběhu teplot hydraulického oleje před chladičem (t oil in), za chladičem (t oil out) a v nádrži (t oil stor), plně naložená souprava



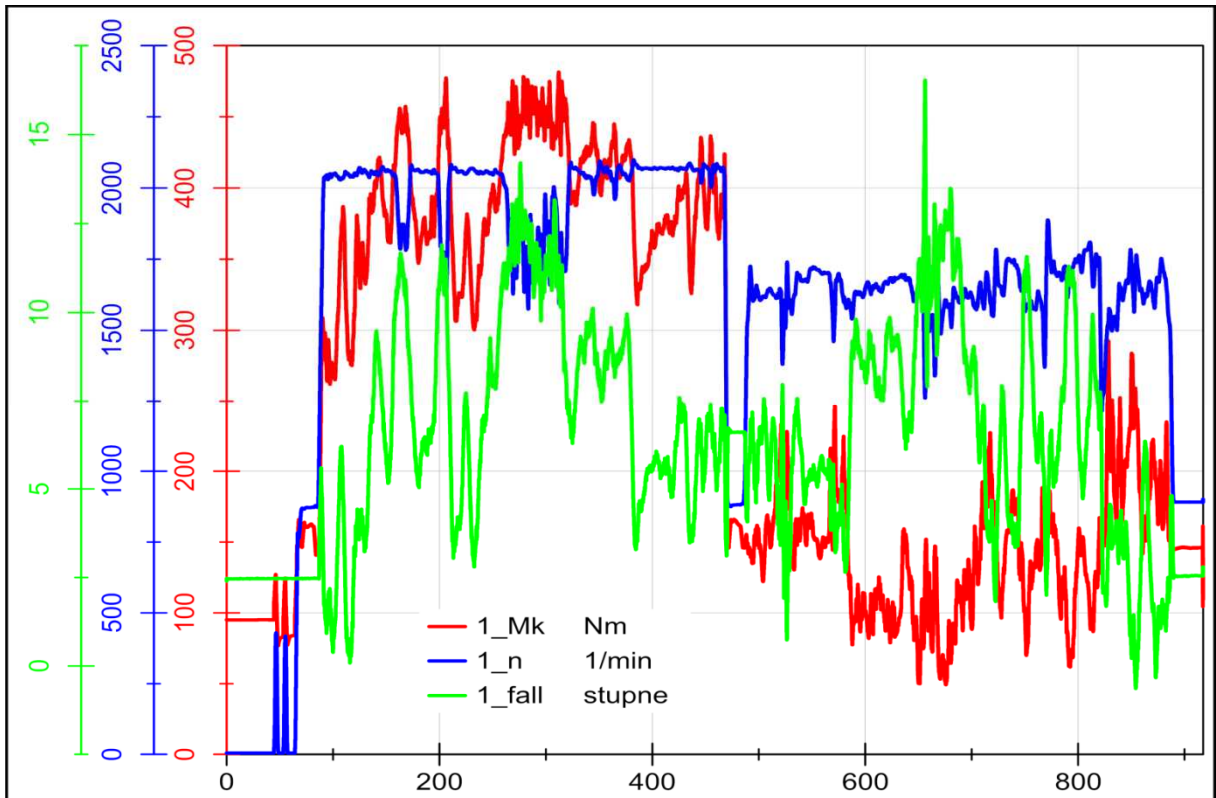
Obr. 161 Záznam průběhu tlaků za čerpadlem pojezdu (p oil pump 01) a (p oil pump 02), plně naložená souprava

8.2.1.4 Jízda přeložené vyvážecí soupravy

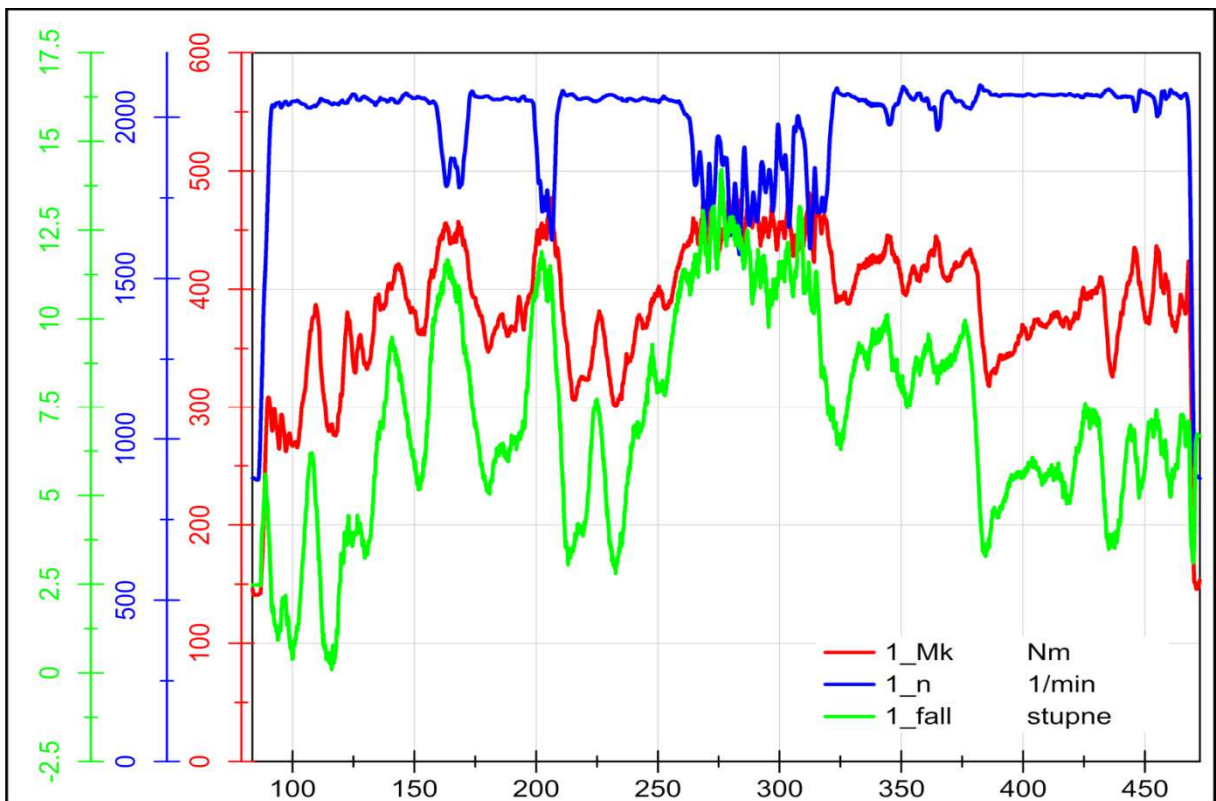
Celková hmotnost přeložené (náklad nad klanice) vyvážecí soupravy je 17,5 t. Záznam točivého momentu (Mk) a otáček (n) kardanového hřídele při jízdě na terénním polygonu je na obr. 162. Energetické parametry jsou blíže vyhodnocovány pouze pro jízdu do kopce, této skutečnosti odpovídá zobrazený detail jízdy do kopce na obr. 163. Maximální moment v místě nejvyššího stoupání cesty je 350 Nm, otáčky však velmi často klesají až na 1600 ot/min. Při jízdě do kopce se sklonem nad 10° výrazně chybí výkon.

Teplota hydraulického oleje před chladičem během jízdy do kopce vystoupala ze 45 °C na 62 °C, teplota hydraulického oleje za chladičem vystoupala z 18 °C na 40 °C. (obr. 164) Teplotní diference na chladiči hydraulického oleje byla udržována na hodnotě 25 až 22 °C. Teplota hydraulického oleje v nádrži byla téměř konstantní, a to asi 46 ± 2 °C.

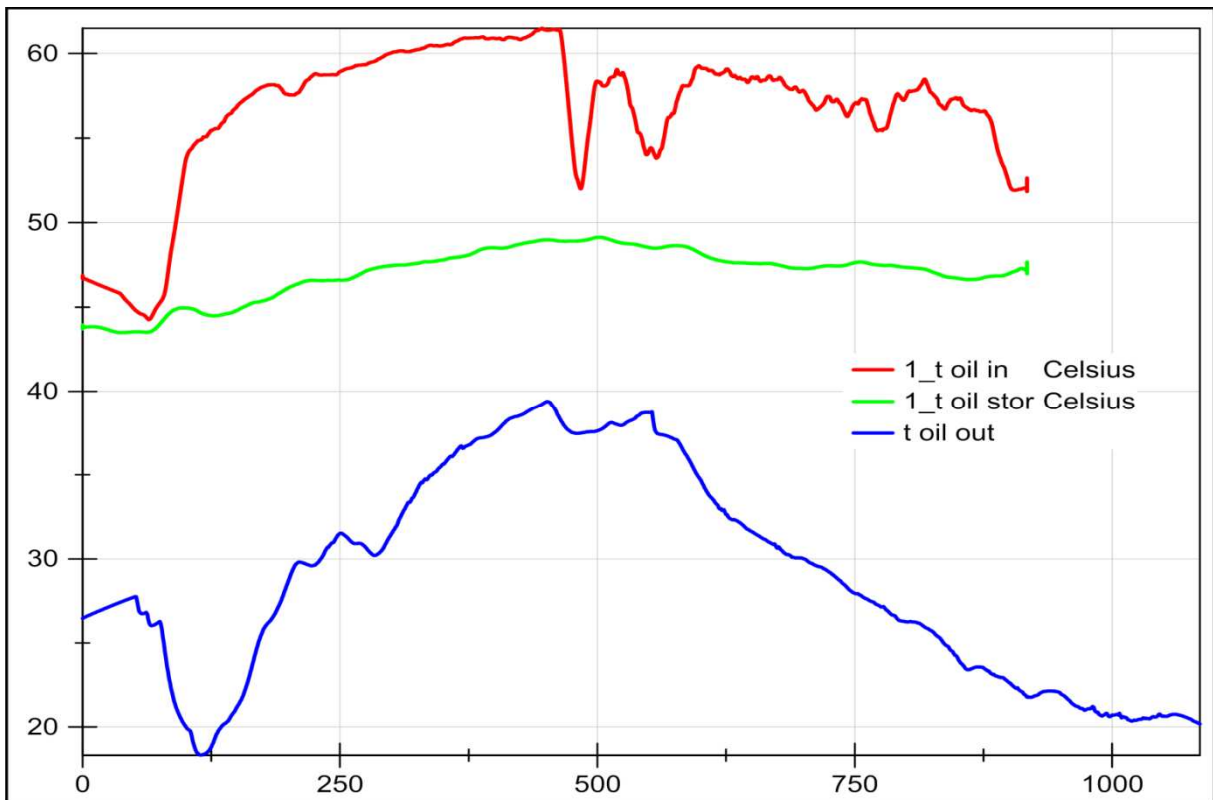
Tlaková diference hydraulického čerpadla pojezdu je znázorněna na obrázku č. 165. Průběh tlaků na čidle č. 31 (p oil pump 02) odpovídá průběhu točivého momentu (Mk) na kardanové hřídeli a průběhu podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu do kopce. Maximální dosahovaný tlak je 185 bar.



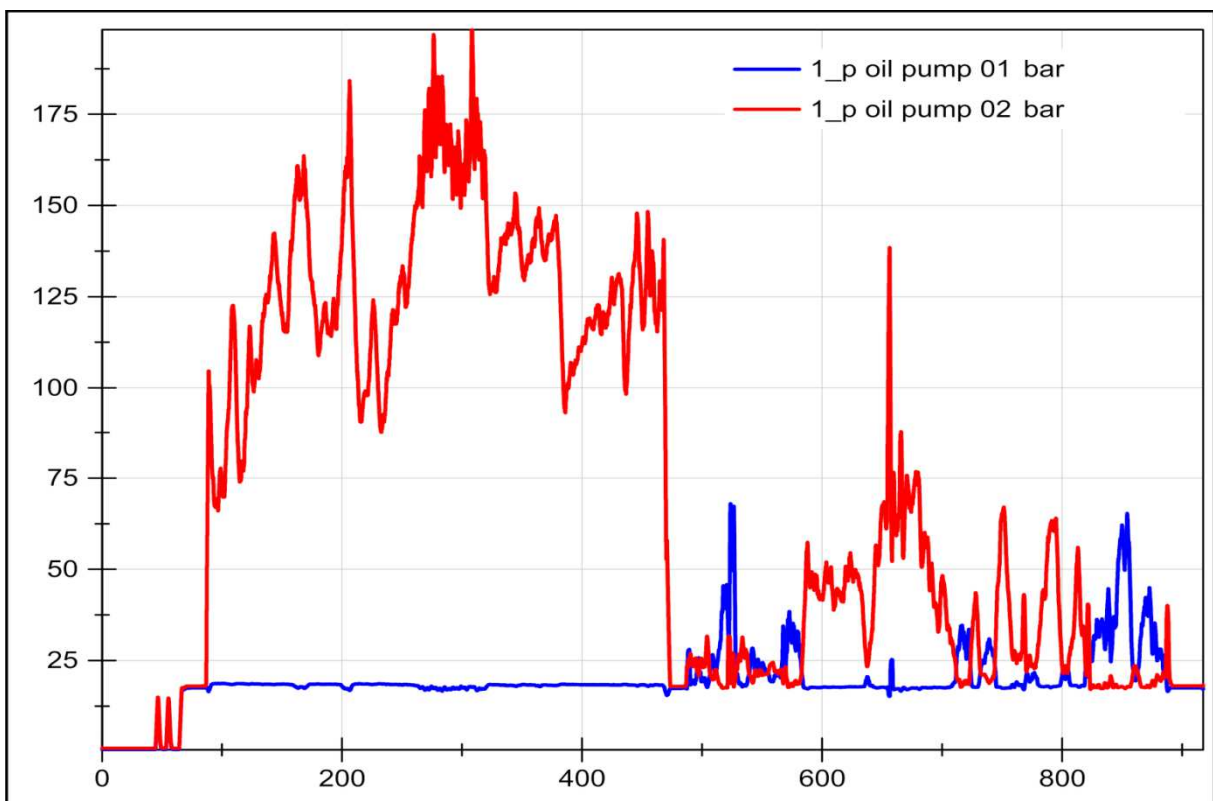
Obr. 162 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu přeložené vyvážecí soupravy



Obr. 163 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu přeložené vyvážecí soupravy, detail jízdy do kopce



Obr. 164 Záznam průběhu teplot hydraulického oleje před chladičem (t oil in), za chladičem (t oil out) a v nádrži (t oil stor), přeložená souprava



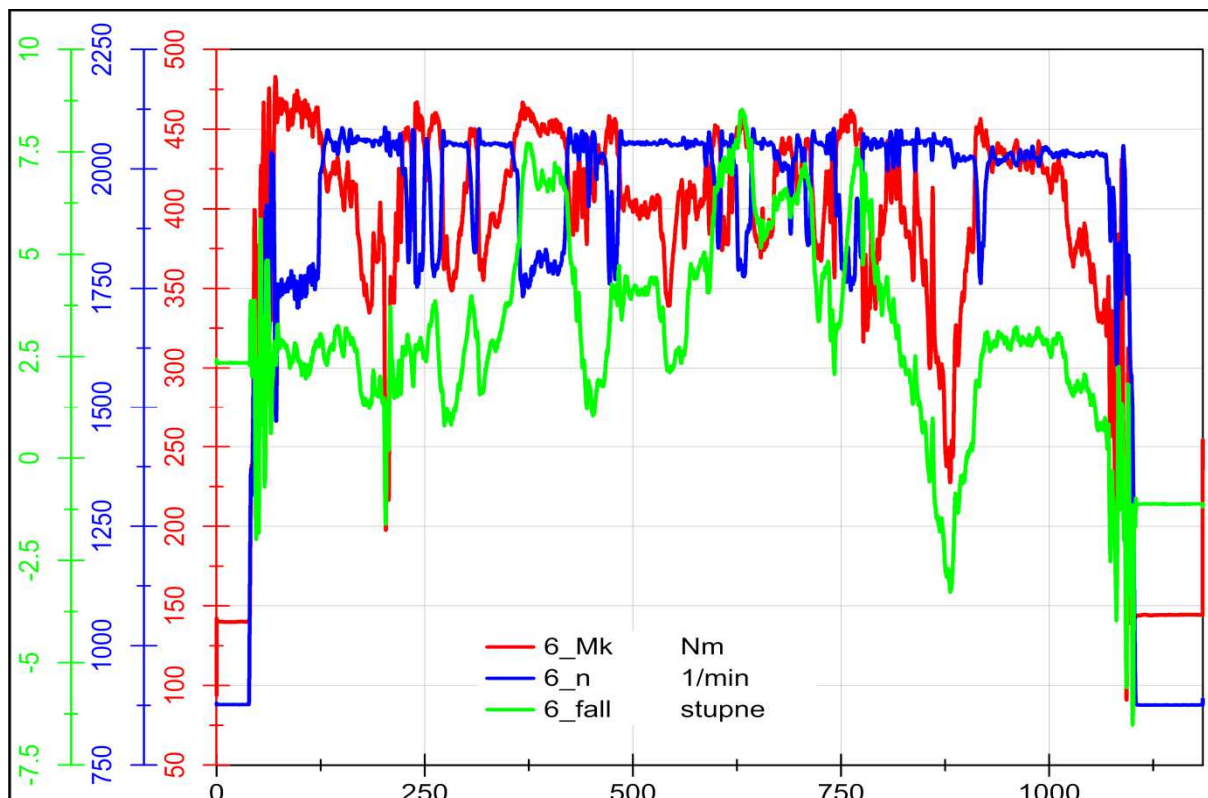
Obr. 165 Záznam průběhu tlaků za čerpadlem pojazdu (p oil pump 01) a (p oil pump 02), přeložená souprava

8.2.2 Testování LVS710 na asfaltové komunikaci

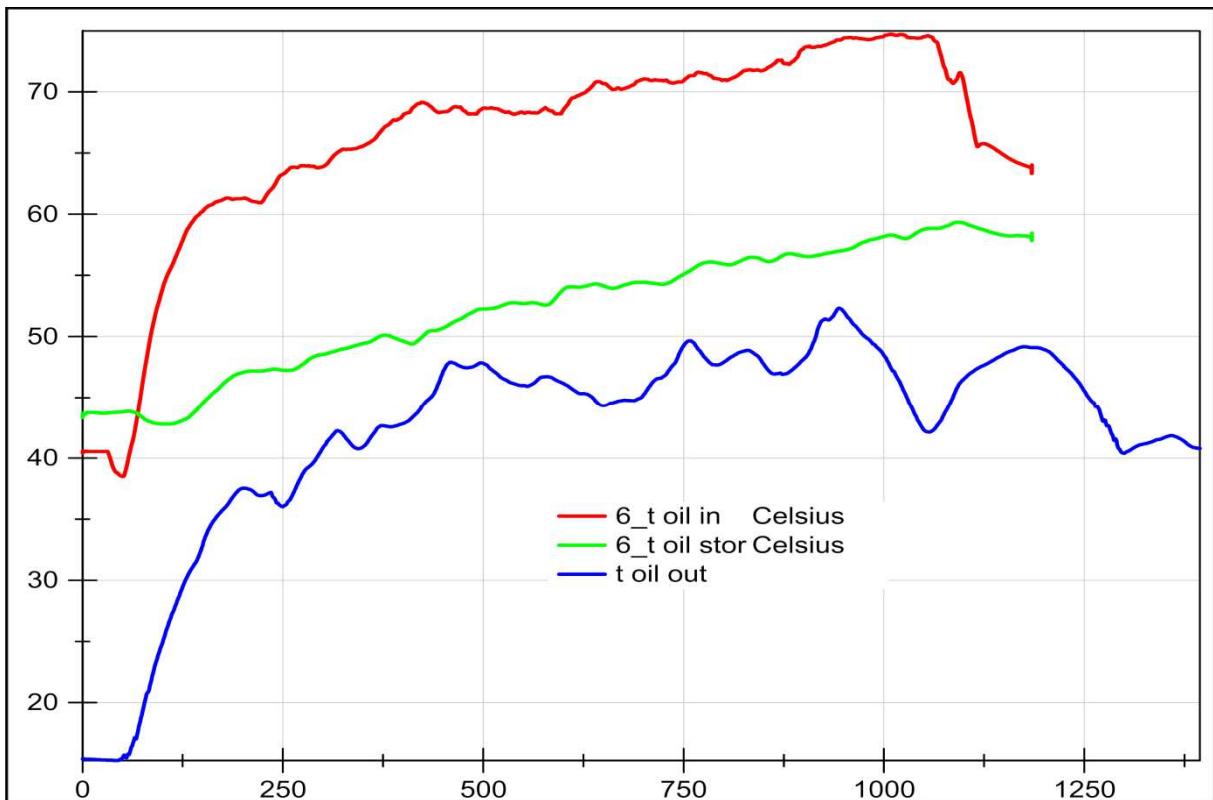
Jízda po asfaltové cestě byla zkoušena na zařazený rychlostní stupeň „zajíc“. Celková hmotnost plně naložené vyvážecí soupravy je 15,5 t. Záznam točivého momentu (Mk) a otáček (n) kardanového hřídele při jízdě po asfaltové cestě do kopce je na obr. 166. Maximální moment je 450 Nm, otáčky však velmi často klesají až na 1800 ot/min. Při jízdě plně naložené soupravy do kopce se sklonem nad 4° na rychlostní stupeň „zajíc“ výrazně chybí výkon.

Teplota hydraulického oleje před chladičem během jízdy do kopce vystoupala ze 40 °C na 75 °C, teplota hydraulického oleje za chladičem vystoupala z 15 °C na 50 °C. (obr. 167) Teplotní diference na chladiči hydraulického oleje byla udržována na hodnotě 35 °C p celou dobu jízdy. Teplota hydraulického oleje v nádrži se lineárně zvyšovala z 43 °C na 60 °C.

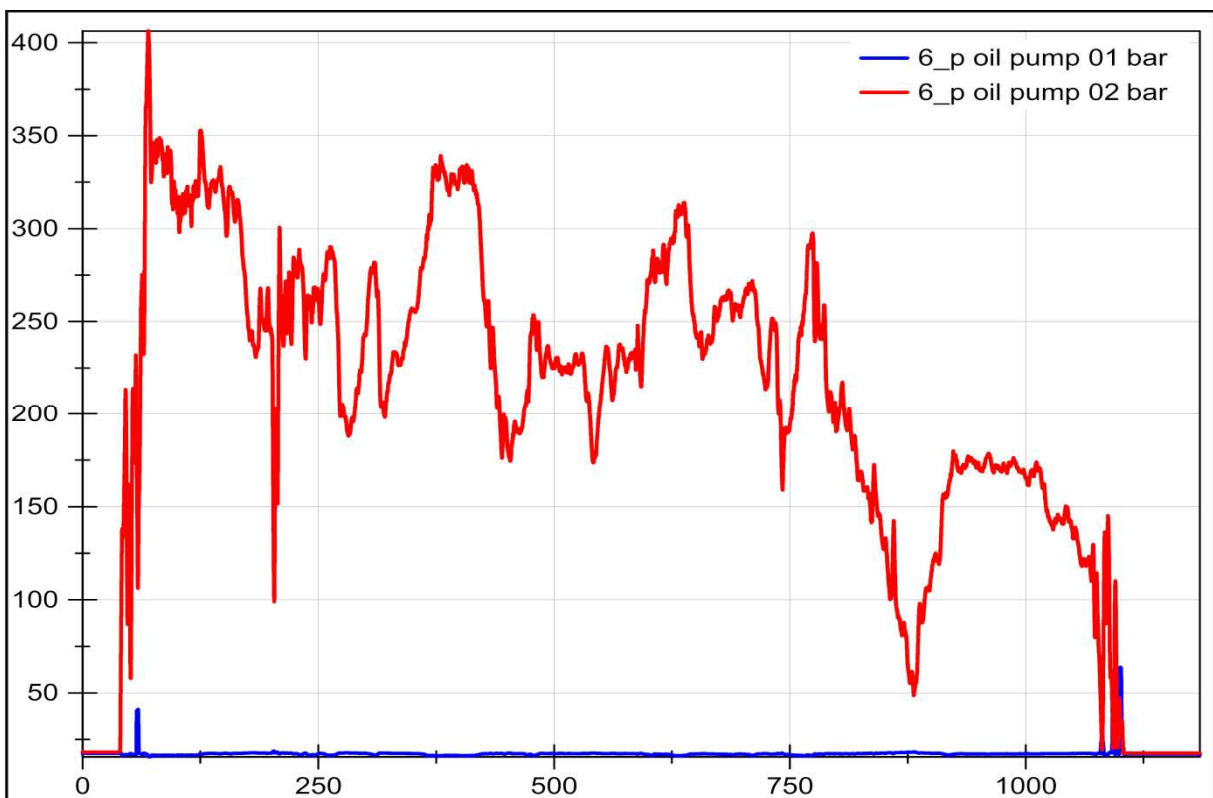
Tlaková diference hydraulického čerpadla pojezdu je znázorněna na obrázku č. 168. Průběh tlaků na čidle č. 31 (p oil pump 02) odpovídá průběhu točivého momentu (Mk) na kardanové hřídeli a průběhu podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu do kopce. Maximální dosahovaný tlak je 325 bar. Při rozjezdu na rychlostní stupeň „zajíc“ vzniká na výstupu čerpadla pojezdu tlaková špička (obr. 168), jejímž důsledkem je přetížení motoru projevující se poklesem a významným kolísáním otáček a točivého momentu na kardanu (obr. 166). Popsaná situace v některých případech vede až k zastavení motoru, jak dokumentuje jiný rozjezd na zajíce zaznamenaný na obr. 169. Je tedy nutné zabránit vzniku tlakových špiček na výstupu čerpadla pojezdu (signál „p oil pump 02“ na obr. 168).



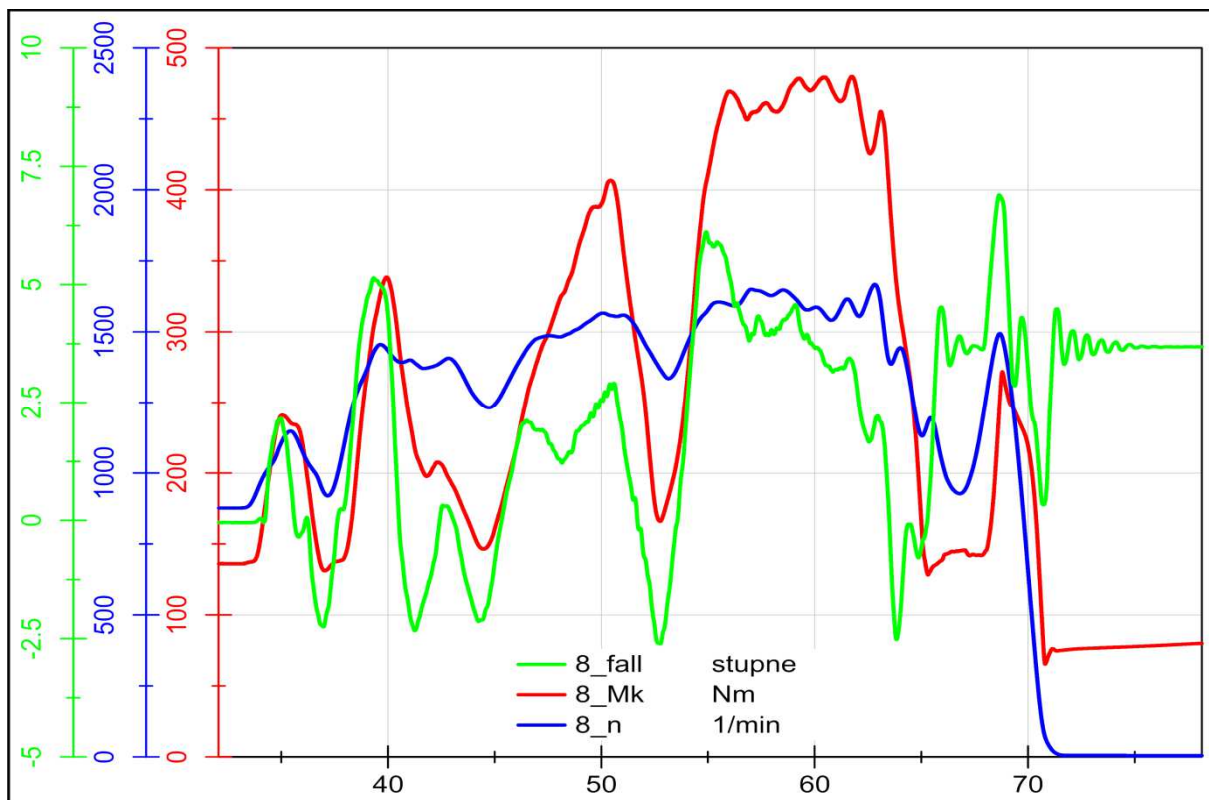
Obr. 166 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro jízdu plně naložené vyvážecí soupravy, asfaltová cesta



Obr. 167 Záznam průběhu teplot hydraulického oleje před chladičem (t oil in), za chladičem (t oil out) a v nádrži (t oil stor), plně naložená souprava, asfaltová cesta



Obr. 168 Záznam průběhu tlaků za čerpadlem pojazdu (p oil pump 01) a (p oil pump 02), plně naložená souprava, asfaltová cesta



Obr. 169 Záznam průběhu točivého momentu (Mk), otáček (n) a podélného sklonu terénu (fall) pro rozjezd plně naložené vyvážecí soupravy na „zajíce“, motor zastaven

9 Závěr

9.1 Výroba pelet

Na základě provedených experimentů měření spotřeby elektrické energie malé peletovací linky MGL200 firmy Kovo Novák je dosahovaná spotřeba elektrické energie v intervalu od 60 kWh/t do 140 kWh/t pro vlastní peletování. Řada autorů, například [REED & BRYANT, 1978; MILES & MILES, 1980; TABIL & SOKHANSANJ, 1996] uvádí pro peletovací lisy středních a velkých výkonů přibližně poloviční hodnoty spotřeby elektrické energie vlastního peletování. V případě zahrnutí celkové spotřeby energií na výrobu pelety včetně sušení a dezintegrace jde o hodnoty 80 až 980 kWh/t [MANI et al., 2006]. Velká variabilita hodnot je dána velkým rozptylem vstupních vlhkostí zpracovávané biomasy. U linek malých výkonů se předpokládá využití zbytkové biomasy z dřevařských provozoven o vlhkosti do 10 % nebo přirozeně sušené biomasy z polí o vlhkosti do 14 % bez umělého sušení. Celkové energetické nároky na malé peletovací linky jsou tak nižší, zato nároky na vstupní biomasu jsou vysoké.

Pro směs frakcí odpadního dřeva z výroby biodesek ve složení piliny, hobliny a brusný prach není třeba další dezintegrace ani sušení. Výkon linky MGL200 pro tuto směs byl 100 kg za hodinu, testovaná mechanická odolnost výsledných pelet 98 %. Spotřeba elektrické energie linky 0,12 kWh/kg, tedy při ceně elektrické energie 5 Kč/kWh je cena zabudované energie 0,6 Kč/kg. Vzhledem ke složení peletované směsi lze počítat s výhřevností 4,8 kWh/kg a velkoobchodní cenou pelet bez DPH 4 Kč/kg. Za těchto podmínek a při dvojsměnném provozu linky lze počítat s návratností investice 200 000 Kč za čtyři měsíce. V rámci dalšího výzkumu by bylo vhodné analyzovat vliv brusného prachu na množství a vlastnosti popela.

9.2 Výroba krátkého kusového dříví

Na našem pracovišti byl testován drtič větví Rojek DH10sp, který produkuje z větví krátké kusové dříví [KLEPÁRNÍK, et al., 2008; KLEPÁRNÍK & VEVERKA, 2011]. Vzhledem k rozměrným výstupním frakcím krátkého kusového dříví ve srovnání se štěpkou má drtič DH10sp velmi nízkou spotřebu paliva, která se pohybuje v rozmezí od 0,5 do 0,7 litru benzínu za hodinu s hodinovým výkonem 0,5 až 3 m³. Z hlediska dřevin je největšího výkonu dosahováno u větví, které tvoří košatou korunu, například jasan a líska. Naopak biomasa z prořezávek sadů, zejména jabloní, vyžaduje ruční dělení větví motorovou pilou nebo sekerou před vlastním zpracováním drtičem. Čerstvé jasanové větve lze zpracovávat bez problémů až do tloušťky 12 cm. Suché větve listnáčů lze zpracovat pouze do průměru 5 cm.

Po provedené úpravě podvozku drtiče DH10sp jej lze provozovat přímo v terénu a tak lze dosahovat výkonu až 3 m³ za hodinu. Budeme-li v méně příznivých podmínkách zpracování borovicového klestu uvažovat s výkonem jen 2 m³ za hodinu při sypné hmotnosti vzduchosuchého dříví 208 kg/m³ a výhřevnosti 3,8 kWh/kg, dopravovanou vzdáleností z lesa 10 km, mzdovými náklady ve výši 200 Kč/h, spotřebou benzínu drtičem 0,6 l/h a pracovní dobou 10 hodin denně, lze vyrobit množství paliva pro vytápění běžné novostavby rodinného domu za jeden den, pro starší nezateplený dům pak za čtyři dny. Budeme-li uvažovat s alternativním vytápěním kusovým dřívím zakoupeným za cenu 1 200 Kč/PLM (stejný komfort obsluhy kotle), bude návratnost investice 85 000 Kč do drtiče DH10sp 2,5 roku pro starý nezateplený dům, 11,5 roku pro běžnou novostavbu a 40,5 roků pro dům s téměř nulovou spotřebou energie. Nákup drtiče je výhodnou investicí pro zásobování palivem starších nemovitostí bez zateplení a nebo jako sdílená investice několika majiteli nemovitostí. V případě sdílení investice více uživateli významně klesne návratnost. V rámci dalšího výzkumu by bylo vhodné zajistit konstrukční úpravy drtiče vedoucí ke snížení emisí hluku.

9.3 Vlastností tuhých biopaliv

Byla provedena literární rešerše fyzikálních a mechanických vlastností tuhých biopaliv s ohledem na jejich měření. V souladu s nově vyhlášenými evropskými normami pro testování vlastností tuhých biopaliv bylo na našem pracovišti vyrobeno několik funkčních vzorků přístrojů určených pro stanovení obsahu vlhkosti [KLEPÁRNÍK & KADLEC, 2010], obsahu fixního uhlíku, prchavé hořlaviny a popeloviny [KLEPÁRNÍK, 2010b], pro stanovení mechanické odolnosti pelet přístroj PeITest [KLEPÁRNÍK, 2009a]. Sestavených přístrojů je používáno k ověřování vlastností pelet vyráběných na lince MGL200.

9.4 Využití tuhých biopaliv

Byla provedena analýza celkových nákladů na vytápění vybraných rodinných domů. Z hlediska využití tuhých biopaliv byly porovnány technologie výroby tepla využívající pelety, kusové dříví a krátké kusové dříví. Z důvodu porovnání konkurenčních paliv a energií byly posuzovány varianty, které využívají zemní plyn a elektrickou energii v podobě akumulárních i přímotopných zdrojů a tepelná čerpadla.

Tabulka tab. 37 Porovnání kotlů o jmenovitém výkonu do 60kW spalujících tuhá biopaliva.

kotel	výhody	nevýhody
s odhoříváním nebo prohoříváním paliva	<ul style="list-style-type: none">• jednoduchá konstrukce kotle• nízká cena• vysoká životnost u litinové verze• nenáročný na frakci a vlhkost paliva	<ul style="list-style-type: none">• vysoké emise• špatná regulace výkonu• krátké intervaly přikládání• nižší účinnost
pyrolytický	<ul style="list-style-type: none">• nízké emise• dobrá regulace výkonu• intervaly přikládání až 12 hodin	<ul style="list-style-type: none">• nižší životnost• vyšší cena• náročné na vlhkost a frakci paliva
automat spalující štěpku	<ul style="list-style-type: none">• vysoký komfort obsluhy• relativně levné palivo• nízké emise• výborná regulace výkonu• v uvedených výkonech pouze ojedinělé řešení	<ul style="list-style-type: none">• obvykle vyšší spotřeba elektrické energie• vysoká náročnost na skladovací prostory paliva• velké pořizovací náklady
automat spalující pelety	<ul style="list-style-type: none">• vysoký až velmi vysoký komfort obsluhy• nízká náročnost na skladovací prostory paliva• velmi nízké emise• výborná regulace výkonu• vysoká účinnost	<ul style="list-style-type: none">• vyšší pořizovací náklady• relativně drahé palivo• většina kotlů vyžaduje palivo vysoké kvality

Neexistuje jedna univerzálně použitelná technologie výroby tepla. Díky tomu lze udržet optimální palivový mix umožňující využití všech zdrojů energie v rozumné míře. Peletové automaty spalující bílou peletu jsou výhodné zejména v neplynofikovaných lokalitách. Současná horní cena pelet 6 Kč/kg nemůže však na místním trhu v masivním měřítku konkurovat zdrojům tepla, které využívají zemní plyn. U domů s vysokou spotřebou energie je vhodnou konkurencí tepelné čerpadlo, především v případě vyššího stupně elektrizace

domácnosti. U nízkoenergetických až pasivních domů je ekonomicky vysoce efektivní vytápění elektrickou energií v podobě přímotopů, nebo akumulace s akumulací energie do hmoty stavby pomocí elektrických topných kabelů.

Použití investičně nákladných peletových automatů (Guntamatic) je ekonomicky opodstatněné díky vysoké účinnosti, dlouhé životnosti a možnosti nízkoteplotního provozu výměníku tepla. Náhrada kvalitní bílé pelety levnou agropeletou u kotlů s retortovým hořákem nepřináší očekávaný ekonomický efekt. Konstrukce univerzálních automatů na tuhá paliva (retortový hořák), které vedle pelet umožňují spalovat hnědé uhlí je perspektivní. Využití kusového dřeva jako primárního zdroje energie pro vytápění znamená výrazně nižší komfort obsluhy bez možnosti vyššího stupně regulace (kotel bez akumulace). Výrazného zvýšení komfortu obsluhy a regulovatelnosti zdroje lze dosáhnout použitím akumulčních nádrží. Uvedená alternativa je však ekonomicky neefektivní (úspora max. 15 % proti použití ZP) při současných cenách palivového dříví. Vytápění kusovým dřívím je tak výhodné především pro soukromé vlastníky lesa. Z tohoto pohledu má význam využití dosud přehlížených zdrojů biomasy jako je klest.

Investičně nákladná technologie má smysl v případě velké spotřeby energie. V nízkoenergetických až pasivních domech je vhodné topit elektrickou energií nebo zemním plynem a biomasu použít jako doplňkový, investičně nenákladný, zdroj tepla.

9.5 Automatické zapalování paliva

Na základě nejednoznačných informací na trhu automatických kotlů malých výkonů, ohledně nákladů na automatické zapalování, byly provedeny série testů vedoucí k jejich zpřesnění. Za tímto účelem byl sestaven tester iniciace paliva [KLEPÁRNÍK, 2009b] a přístroj pro měření činného výkonu [KLEPÁRNÍK, 2010a]. V následujících experimentech byl studován vliv geometrie horkovzdušné zapalovací trysky (úhel sklonu trysky od horizontální roviny a její vzdálenost od paliva), teploty vzduchu a druhu zapalovaných pelet na rychlost zapálení a spotřebu energie při zapalování.

Při teplotě 850 °C na výstupu zapalovací trysky neovlivňuje geometrie trysky rychlost zapálení tak výrazně, jako při teplotě 600 °C. Větší vliv na rychlost zapálení má geometrie trysky minimalizující rozfoukávání pelet, než vlastní teplota horkého vzduchu na trysce. Nejnižší teplota použitelná pro bezproblémové zapálení paliva musí být bezpečně vyšší, než teplota iniciace. Této podmínce odpovídá teplota 500 °C. Při experimentech byla zkoušena nejnižší teplota 600 °C. Vzdálenost trysky 20 mm od zapalovaného paliva při sklonu 60° je optimální geometrií trysky. Menší úhel a vzdálenost způsobuje intenzivnější rozfoukávání pelet. Větší úhel je nevhodný z důvodu ochrany generátoru horkého vzduchu před vysokými teplotami v době provozu hořáku na plný výkon. Větší vzdálenost trysky pak způsobuje nespolehlivé zapálení pelet díky nízké rychlosti ohřevu paliva. Rozdíl ve spotřebě energie mezi jednotlivými skupinami testovaných pelet (pelety ze dřeva, sena, slámy, slunečnicových slupek) je menší, než rozdíl ve spotřebě času potřebného k zapálení. To je dáno snižujícím se výkonem zapalovacího tělesa při snížení teploty. Pro stanovené optimální řešení nastavení geometrie trysky a teploty horkého vzduchu byla stanovena spotřeba elektrické energie s přihlédnutím k nedokonalosti řešení zpětné vazby regulační techniky procesu zapalování na max. 0,07 kWh na jedno zapálení.

Domácnosti, kde je aplikováno vytápění peletami, využívají elektrickou energii nejčastěji v tarifu D02 (ohřev teplé vody peletami či solární energií). Zde je pak cena elektrické energie 4,70 Kč/kWh (ceník od 1.1.2011, E.ON). V případě využití elektrického boileru pro ohřev TV je využit tarif D25 s průměrnou cenou 4,10 Kč/kWh (stejný ceník). Výsledná cena energie na jedno zapálení kotle tak vychází na 0,29 Kč (D25) až 0,33 Kč (D02). Dle výpočtů

provedených v kapitole 6.3.1 „Návrh akumulčního zásobníku“ je počet startů peletového automatu spolupracujícího s akumulční nádrží pro dům s tepelnou ztrátou 12 kW v intervalu 300 až 500 startů za rok dle parametrů akumulace. FUČÍK [2004] uvádí počet startů špičkových kondenzačních plynových kotlů Geminox ve výši 3500 za rok, navrhovaná technologie má 10krát méně startů. To představuje úsporu 86 až 165 Kč za rok. Uvedenou spotřebu elektrické energie tak lze považovat za zanedbatelnou.

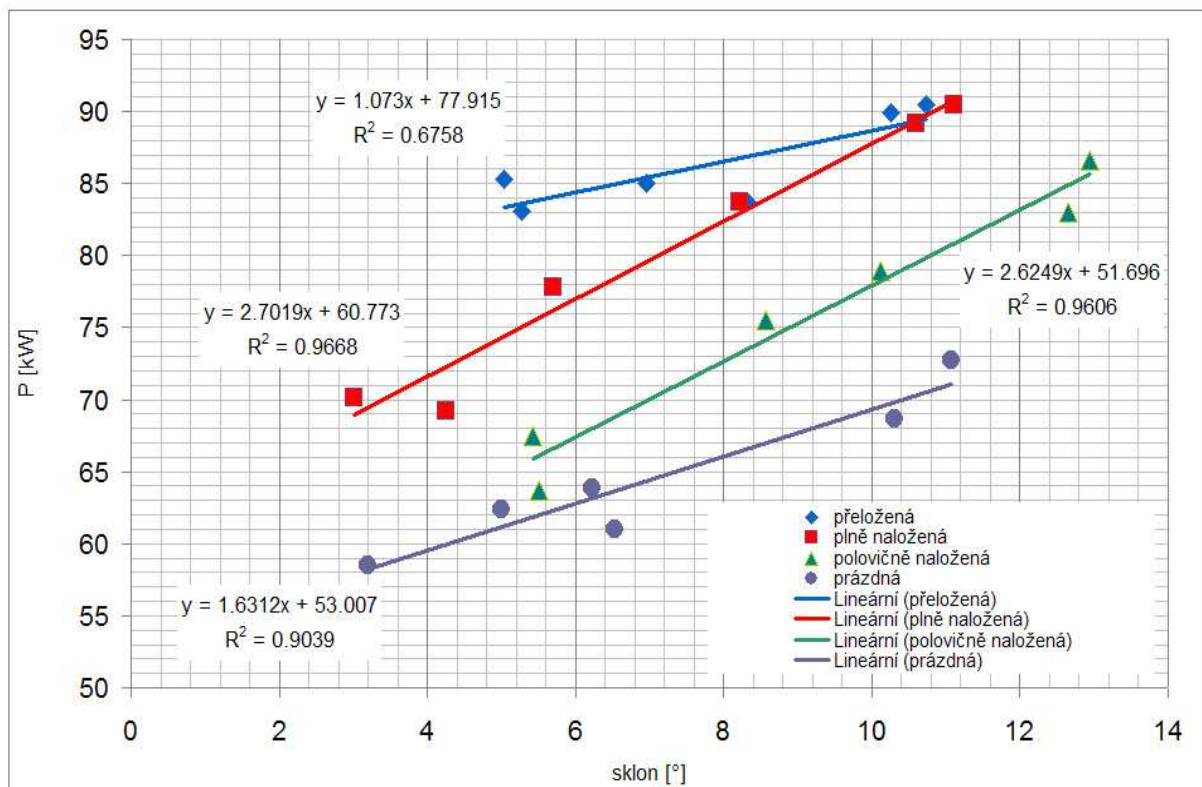
Světově novým přístupem k automatickému zapalování je použití elektrického žhavicího odporu z karbidu křemíku, který může být za běžného provozu zatěžován teplotou až 900 °C a je stabilní až do teploty 1 200 °C. Proud vzduchu kolem žhaveného odporu umístěného přímo mezi nadávkované pelety způsobí jejich zapálení. Elektrický příkon žhavicího odporu je 275 W [Rauschert, 2010]. Příkon velmi rozšířeného horkovzdušného zapalování je však několikanásobně větší. Použití žhavicího odporu je tedy ekonomičtější variantou.

Keramický povrch zapalovacích tělísek o vysoké teplotě požaduje pouze asi jednu desetinu energie, která se spotřebuje při použití generátorů horkého vzduchu. Výkon keramických zapalovacích tělísek leží mezi 120 a 200 Watty. Konkrétní hodnota je závislá na pozici zapalovacího tělíska v kotli. Doba zapálení 60 až 90 sekund je extrémně krátká, a tím jsou i nízké emise vznikající při zapalování. Spotřeba energie je 120·60 Ws až 200·90 Ws. To znamená, že při ceně 5 Kč/kWh, je cena jeden až dva a půl haléře na jedno zapálení! Proti měřenému generátoru horkého vzduchu jde o hodnoty dvacetkrát nižší! Doba zapálení je asi poloviční. Tato úvaha je však založena pouze na informaci z firemní dokumentace výrobce zapalovače [Rauschert, 2010]. Je velmi žádoucí tyto informace ověřit experimenty za srovnatelných podmínek, jako v případě již provedených měření.

9.6 Vyhodnocení jízdy lesní vyvážecí soupravy LVS710

V rámci probíhající spolupráce mezi naším pracovištěm a firmou Strojírna Novotný, výrobce lesních vyvážecích souprav (LVS), byl testován prototyp LVS710. Na našem pracovišti byl realizován měřicí systém prototypu LVS710 [KLEPÁRNÍK & VEVERKA, 2013] a následně proběhla první série testů, ze kterých uvádím závěry z testování pojezdů na terénním polygonu v Josefově.

S narůstajícím sklonem terénu roste potřebný výkon motoru. Pro vyvážecí soupravu o větší celkové hmotnosti je nárůst výkonu v závislosti na sklonu terénu intenzivnější – směrnice přímkou dosahuje větších hodnot. Uvedená skutečnost, sledovaná na obrázku 170, platí pouze pro prázdnou a polovičně naloženou odvozní soupravu. Při plně naložené soupravě již byl výkon dodávaný motorem nižší než výkon požadovaný. Směrnice červené a zelené přímkou je téměř shodná. Extrémní situace nastává u přeložené vyvážecí soupravy, tedy při hmotnosti soupravy 17,5 t. Směrnice modré přímkou dosahuje dokonce menších hodnot než směrnice přímkou fialové (prázdná LVS), takto naložená vyvážecí souprava má dostatečný výkon pouze pro jízdu po rovině. V případě práce v listnatých porostech s větší hustotou dřeva než je smrk používaný při testech, je hmotnost soupravy 17,5 t zcela reálné zatížení. Upozorňuji, že zde užívaný termín „přeložená“ souprava je vztažen k použitému smrkovému dříví, kdy zatížení 17,5 t bylo dosaženo naložením dříví nad klanice.



Obr. 170 Závislost výkonu přenášeného kardanem na zatížení vyvážecí soupravy a sklonu terénu. Celkové hmotnosti vyvážecí soupravy: fialová 9 t, zelená 14 t, červená 15,5 t, modrá 17,5 t.

Na základě provedených testů je nyní výrobcem upravováno zapojení hydraulických čerpadel k pohonu stroje, včetně úpravy software řízení. Testování a ověřování strojů externích komerčních subjektů v rámci vzájemné spolupráce mají tedy přínos pro zlepšování jejich výrobků.

9.7 Přínos práce

Přínos práce v teoretické rovině je především komplexní analýza nákladů na energie napříč všemi energetickými standarty domů pro bydlení v ČR se zvláštním zřetelem na využití biomasy. Energetická optimalizace zdroje tepla pro vytápění je teoreticky práce energetického specialisty nebo zodpovědného projektanta TZB. Reálná praxe je však taková, že díky tlaku na neustálé snižování cen projektů a posudků není časový prostor pro optimalizaci zdroje tepla ani v jedné z uvedených profesí. Kvalitně provedená optimalizace vyžaduje znalosti z několika oborů stavební praxe, protože pouze dosažením synergického efektu jednotlivých částí celku lze dosáhnout investorem požadovaného výsledku.

Praktický přínos práce lze spatřovat především ve spolupráci s komerční sférou na vývoji či optimalizaci strojů používaných v oblasti přípravy tuhých biopaliv. Konkrétně jde o testování vlastností a následně provedené konstrukční úpravy drtiče DH10sp, která umožňuje díky jeho intenzivnějšímu využití zkrácení doby návratnosti investice (spolupráce s firmou Rojek). V současné době probíhá příprava k novému testování lesní vyvážecí soupravy LVS710 po provedených konstrukčních úpravách hydraulických okruhů pojezdu (spolupráce s firmou Strojírna Novotný).

10 Summary

The thesis deals with the production of solid biofuels (pellets and chunky wood), their properties and use. There is studied the power consumption of pellet automatic ignition. The final part of the thesis presents partial results of measurements using a forwarder prototype.

10.1 Pellet production

Measurement of power energy consumption of a small-scale pellets mill MGL200 by the Kovo Novák company was carried out. The line capacity is 100 - 200 kg pellets per hour. The achieved power energy consumption is within the range of 60 kWh/t - 140 kWh/t. Low-performance lines are expected to use residual biomass from the timber shops with humidity up to 10%, or naturally dried biomass from the fields with humidity up to 14% with no artificial drying. The total energy requirements for small-scale pellets mills are therefore higher comparing to large ones, however, input biomass requirements are high.

10.2 Chunky wood production

On our workplace there was tested a chunker Rojek DH10sp, making chunky wood from branches. Considering large-dimensional chunky wood output comparing to wood chips, the chunker DH10sp has a very low fuel consumption ranging from 0.5 – 0.7 l of gasoline and hourly output 0.5 - 3 m³. In terms of woody species, the highest performance is achieved by using branches from non-spreading crowns such as ash and hazel. On the contrary, biomass originating from orchard thinning, in particular apple trees, calls for manual cutting with a power saw or axe before processing using a chunker. Raw ash branches can be processed without troubles up to 12 cm thickness. Dry broadleaved trees branches can be processed only up to 5mm diameter.

10.3 Properties of solid biofuels

Literature search covering physical and mechanical properties of solid biofuels referring to their measurement was accomplished. In compliance with the newly declared European standards of solid biofuels testing, several purposeful samples of devices was made in order to determine moisture content, fixed carbon content, volatile matter content, ash content and pellet mechanical durability.

10.4 Use of solid biofuels

The total costs of heating selected family houses were accomplished. Referring to the solid biofuel use there were compared domestic biomass-burning appliances using pellets, log wood and chunky wood.

There is no versatile domestic heating technology, which can be used. Due to that fact, the optimum fuel mix can be maintained allowing reasonable use of all energy sources. Pellet boilers burning wood pellets are especially beneficial in localities where gas installation cannot be carried out. The current top pellet price 6 CZK/kg at the local market cannot compete in massive scale with heat sources that use earth gas.

Applying capital-intensive pellet boilers (Guantamatic) is economically justifiable due to high efficiency, long life and low temperature heat exchanger use. Substituting a cheap agropellet for a quality wood pellet for boilers with a retort burner does not bring expected economic effect. Construction of versatile solid fuel boilers allowing to burn brown coal in addition to pellets is promising. Significant increase in operator's comfort and log wood burning boilers controllability can be achieved via using heat storage tanks. The presented alternative,

however, is economically inefficient (saving max. 15 % comparing to earth gas) at current firewood prices. Log wood heating is therefore beneficial particularly for private forest owners. Considering this perspective, using biomass resources such as slash, which has been disregarded so far, has its significance.

10.5 Fuel automatic ignition

Resulting from ambiguous information within the low-performance automatic boiler market referring to automatic ignition, series of tests were accomplished in order to nail it down. There were studied the impact of hot-air ignition jet geometry (nozzle angle from horizontal plane and its distance from the fuel), air temperature and type of ignited pellets on the speed of ignition and energy consumption at the ignition process. In order to determine the optimal solution for setting the nozzle geometry and hot air temperature, the power consumption was quantified max. 0.07kWh per one ignition; the solution imperfections of ignition process regulators loopback were considered.

10.6 Forwarder LVS710 ride evaluation

A prototype LVS710 was tested as a part of ongoing collaboration between our department and the company Strojírna Novotný, a forwarder (LVS) producer. Our department carried out a LVS710 prototype measuring system, further the first series of tests was accomplished. Resulting from tests performed, the producer modifies connecting hydraulic pumps to the machine drive, including driving software adaptation.

11 Literatura

11.1 Vědecká a odborná literatura

- Adapa, P., Tabil, L., Schoenau, G. (2011) Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw. *Biomass and Bioenergy* 35: 549 – 562.
- Amos, W.A. (1998) Report on Biomass Drying Technology, NREL Contract No. DE-AC36-83CH10093, National Renewable Energy Laboratory
- Bakker, R., and Jenkins, B. (1996) 'Feasibility of fuel leaching to reduce ash fouling in biomass combustion systems', in Proceedings of the 9th European Bioenergy Conference, volume 2, Elsevier Science Ltd, Oxford
- Balantinez, J. J. (1983) The potential role of densification in biomass utilization. In *Biomass Utilization*, 181-190. W.A. Cote, ed. New York, NY: Plenum Press.
- Bašta J., (2001) Otopné plochy. ČVUT, Praha. 80-0102365-6.
- Bennett F. (2011) Energy Efficient Air Drying of Biomass. BioPro Expo & Marketplace. Atlanta, GA. March 16 2011
- Beuchat, L. (1981) Microbial stability as affected by water activity. *Cereal Foods World* 26, 345–351.
- Brown, R.C. (2003) *Biorenewable Resources, Engineering New Products from Agriculture*. Ames, IA: Iowa State Press.
- Bufka A. (2011) Ceny pevných paliv pro domácnosti: Výsledky statistických zjišťování k červnu 2011. MPO.
- Fexa, J., Šíroky, K. (1983) *Měření vlhkosti*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 262 s.
- Franke, M., Rey A. (2006) Pelleting quality. *World Grain*. May 2006: 78-79.
- Gaur, S., Reed, T.B. (1995) *An Atlas of Thermal Data For Biomass and Other Fuels*. National Renewable Energy Laboratory 1995.
- Grover, P.D., Mishra, S.K. (1996) *Biomass Briquetting: Technology and Practices*. Regional Wood Energy Development Program in Asia, Field Document No. 46. Bangkok, Thailand: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Hartmann, H., Böhm, T., Jensen, P.D., Temmerman, M., Rabier, F., Jirjis, R., Hersener, J.L., Rathbauer, J. (2004) Methods for Bulk Density Determination of Solid Biofuels. In: Van Swaaij, W. P. M.; Fjällström, T.; Helm, P.; Grassi, A. (Eds.): *2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, pp662-665.
- Holmberg, H. (2007) *Biofuel Drying as a Concept to Improve the Energy Efficiency of an Industrial CHP Plant*, PhD Thesis, Helsinki University of Technology
- Huffman B. (1991) Application Note 42. Voltage Reference Circuit Collection. June 1991. 32p. p 10-11
- Humm O. (1999) *Nízkoenergetické domy*. Grada. 80-7169-657-9.
- Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles, Jr. T.R., Miles, T.R. (1998) Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54 _1998. 17–46

- Jensen, P.D., Hartmann, H., Böhm, T., Temmerman, M., Rabier, F., Morsing, M., (2006) Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. *Biomass and Bioenergy* 30 (2006) 935–943.
- Klepárník, J. (2008a) Náklady na vytápění peletami. *SILVA REGINA, BVV* 2008.
- Klepárník, J. (2008b) Vytápění dřevem - budoucnost patří automatům. *Ateliér otvorových výplní, izolací a vybavení staveb.* 12 (6). 28-30.
- Klepárník, J. (2009a) PelTest – přístroj pro zjišťování mechanické odolnosti pelet. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J. (2009b) Tester iniciace paliva. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J. (2010a) Přístroj pro měření činného výkonu s dataloggerem. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J. (2010b) TGtest – přístroj pro stanovení vlhkosti, prchavé hořlaviny, fixního uhlíku a popeloviny tuhých biopaliv. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J. (2010c) Vytápění s využitím automatických kotlů na tuhá paliva. *Výstavba měst a obcí.* 3 (2). 15.
- Klepárník, J., Kadlec, J., (2010) Laboratorní sušárna. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J., Nevrkla, P., (2010) Přípravek pro měření činného výkonu. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J., Skoupý, A., Veselý, J., (2008) Snímač energetických parametrů drtiče dřeva. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J., Veverka, T. (2011) Podvozek drtiče DH10. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Klepárník, J., Veverka, T. (2013) Měřicí systém provozních parametrů prototypu lesní vyvážecí soupravy LVS710. Funkční vzorek. Mendelova univerzita v Brně.
- Kollmann, Coté, (1968) *Principles of Wood Science and Technology.* Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 1968 edition (July 31, 2012). ISBN-10: 3642879306
- Koloničný, J., Horák, J., Ševčíková, S. (2009) *Kachlová kamna.* VŠB TU Ostrava. 978-80-248-2071-2.
- Lázňovský, M., Kubín, M., Fischer, P. (1996) *Vytápění rodinných domků.* T Malina, Praha. 80-9019752-3.
- Lyčka, Z. (2008) Co je a odkud se vzala retorta aneb litinové retortové hořáky v domovních kotelnách. *Topenářství instalace.* (xx)5. 46-50.
- MacBain, R. (1966) *Pelleting Animal Feed.* Chicago, IL: American Feed Manufacturing Association.
- Maloušková, L. (2012) *Vývoj úrovně znečištění ovzduší: minulost, současnost.* ČHMU, Úsek ochrany čistoty ovzduší, Praha
- Mani, S., Sokhansanj, S., Bi, X., Tabil, L.G. (2005) Modeling of biomass drying and densification processes. ASAE Paper No. 056144. St. Joseph, Mich.: ASABE
- Mani, S., Sokhansanj, S., Bi, X., Turhollow. (2006) Economics of producing fuel pellets from biomass. *Applied Eng. in Agric.* 22(3): 421-426.

- Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S. (2004) Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy* 27: 339 – 352.
- Miao, Z., Grift, T.E., Hansen, A.C., Ting, K.C. (2011) Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties. *Industrial Crops and Products* 33: p.504–513.
- Miles, T.R. and Miles, Jr. T.R. (1980) Densification systems for agricultural residues. In: *Thermal conversion of solid wastes and biomass*, American Chemical Society, Washington DC, pp. 179-191.
- Nasswetrová, A., Nikl, K., Zejda, J., Sebera, V., Klepárník, J., 2013. The analysis and optimization of high-frequency electromagnetic field homogeneity by mechanical homogenizers within the space of wood microwave heating device. *Wood Research*, 58 (1). 11-24.
- Neale, M.A. (1986) Straw compaction research. *Agricultural Engineer* 4(4): 126-130.
- Nikolaisen, L. et al., (1998) *Straw for energy production – Technology – Environment – Economy*, 2nd edn, Centre for Biomass Technology, Denmark
- Noskievič, P., Koloničný, J., Ochodek, T. (2004) *Malé zdroje znečišťování*. VŠB TU Ostrava.
- Nussbaumer, T., Oser, M. (2004) Evaluation of Biomass Combustion based Energy Systems by Cumulative Energy Demand and Energy Yield Coefficient. *Verenum*, CH – 8006 Zurich, Switzerland. p.10
- Obernberger, I., Brunner, T., Bärnthaler, G. (2006) Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy* 30 (2006) 973–982
- Obernberger, I., Thek, G. (2004) Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy* 27 (2004) 653–669.
- Obernberger, I., Thek, G. (2010) *The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*. Routledge (September 28, 2010). ISBN-10: 1844076318
- Ochodek, T., Koloničný, J., Branc, M. (2007) *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*. Studie. VŠB TU Ostrava. 978-80-248-1426-1.
- Payne, J.D. (1978) Improving quality of pellet feeds. *Milling Feed and Fertilizer* 162(May): 34-41.
- Payne, J.D. (2006) *Troubleshooting the Pelleting Process*. Feed Technology Technical Report Series, American Soybean Association International Marketing Southeast Asia, Singapore, pp. 17-23.
- Rabier, F., Temmerman, M., Böhm, T., Hartmann, H., Jensen, P.D., Rathbauer, J., Carrasco, J., Fernández, M. (2006) Particle density determination of pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy* 30 (2006) 954–963.
- Rédr, M., Příhoda, M. (1991) *Základy tepelné techniky*. SNTL, Praha. 80-03-00366-0.
- Reed, T.B., Bryant, B. (1978). *Densified biomass: A new form of solid fuel*. SERI-35, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, p. 30.
- Regan, T. (2005) Application Note 105. *Current Sense Circuit Collection*. P 9, (76p) December 2005.

- Reisinger K. et al., (1996) BIOBIB- a Database for Biofuels, THERMIE- Conference: Renewable Energy Databases, Harwell (United Kingdom), 1996.
- Rotz, C.A., Chen, Y. (1985) Alfalfa drying model for the field environment. *Trans. ASAE* 28(5): 1686-1691.
- Sander, B. (1997) 'Properties of Danish biofuels and the requirements for power production', *Biomass and Bioenergy*, vol 12, no 3, pp177–183
- Simanov, V. (1995) Energetické využívání dříví: Možné způsoby energetického využívání těžebního odpadu a dalších opomíjených zdrojů dříví. Terrapolis Olomouc.
- Stahl, M., Wikstrom, F. (2009) Swedish perspective on wood fuel pellets for household heating: A modified standard for pellets could reduce end-user problems. *Biomass and Bioenergy* 33 (2009) 803–809.
- Štencl, J., Fajman, M., Sedlak, P., Janstova, B., Klepárník J., Štencl, J., Jr. (2010) Sorption characteristics of amaranthus stems under storage conditions and water activity prediction, *Bioresource Technology* 101 (2010) 9395–9398
- Štorkan, M. (2000) Historický vývoj prvních automatických kotlů na pevná paliva pro ústřední vytápění. *Topenářství instalace*. 1-3.
- Tabil, L.G., Sokhansanj, S. (1996) Compression and Compaction Behavior of Alfalfa Grinds, Part 1: Compression Behavior, Powder Handling and Processing 8(1): 17-23.
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen P.D., Hartmann, H., Böhm, T. (2006) Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes, *Biomass and Bioenergy* 30 (2006) 964–972
- Turner, R. (1995) Bottomline in feed processing: achieving optimum pellet quality. *Feed Mgmt.* 46(12): 30-33.
- Tywoniak, J. (2005) Nízkoenergetické domy. Principy a příklady. Grada. 80-247-1101-X.
- Valenta, V. et al. (2007) Topenářská příručka 3: Návody na projektování tepelných zařízení. Agentura ČSTZ, Praha. 978-80-86028-13-2.
- van der Drift, A., van Doorn, J. (1998) Phyllis ECN. Operationeel maken – fase 2 (in Dutch). ECN-CX—98-138, Netherlands Energy Research Foundation, Petten, Netherlands
- van Deventer, H.C. (2004) Industrial Superheated Steam Drying, TNO report R 2004/239
- van Loo, S., Koppejan, J. (2008) *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Routledge; Reprint edition (July 2, 2010). ISBN-10: 1849711046
- Williams, J. (1985) Application Note 6. Application of New Precision Op Amps. January 1985. 8p, p2-3.
- Williams, J. (1987) Application Note 23. Micropower Circuits for Signal Conditioning. April 1987. 24p (p. 1)
- Williams, J. (1990) Application Note 43. Bridge Circuits. June 1990.
- Worley, M. (2011) Biomass Drying Technology Update. BioPro Expo & Marketplace. Atlanta, GA. March 16 2011.

11.2 Normy a zákony

ASAE S269.4. (1996) Cubes, pellets and crumbles—definitions and methods for determining density, durability and moisture content.

CEN/TS 15370-1:2006. Solid biofuels – Method for the determination of ash melting behaviour – Part 1: Characteristic temperatures method

ČSN 060210:1994 Výpočet tepelných ztrát budov při ústředním vytápění. (zrušena k 1.9.2008)

ČSN 730540-2:2011 Tepelná ochrana budov. Část 2: Požadavky

ČSN EN 15316-3-1:2010 Tepelné soustavy v budovách. Výpočtová metoda pro stanovení potřeb energie a účinnosti soustavy. Část 3.1: Soustavy teplé vody, charakteristiky potřeb.

ČSN EN 12831:2005 Tepelné soustavy v budovách. Výpočet tepelného výkonu.

ČSN EN 14588:2011. Tuhá biopaliva - Terminologie, definice a popis

ČSN EN 14774-1:2010. Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 1: Celková voda - Referenční metoda

ČSN EN 14774-2:2010. Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 2: Celková voda - Zjednodušená metoda

ČSN EN 14774-3:2010. Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu vody - Metoda sušení v sušárně - Část 3: Voda v analytickém vzorku pro obecný rozbor

ČSN EN 14775:2010 Tuhá biopaliva - Stanovení obsahu popela

ČSN EN 14780:2011. Tuhá biopaliva. Příprava vzorku.

ČSN EN 14785:2007 Spotřebiče spalující dřevěné pelety k vytápění obytných prostorů - Požadavky a zkušební metody

ČSN EN 14918:2010. Tuhá biopaliva - Stanovení spalného tepla a výhřevnosti

ČSN EN 14961-1:2010. Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky

ČSN EN 14961-2:2011. Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 2: Dřevní pelety pro maloodběratele

ČSN EN 14961-3:2011. Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 3: Dřevní brikety pro maloodběratele

ČSN EN 14961-4:2011. Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 4: Dřevní štěrka pro maloodběratele

ČSN EN 14961-5:2011. Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 5: Palivové dřevo pro maloodběratele

ČSN EN 14961-6:2012. Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 6: Nedřevní pelety pro maloodběratele

ČSN EN 15103:2010. Tuhá biopaliva - Stanovení sypné hmotnosti

ČSN EN 15150:2012. Tuhá biopaliva - Stanovení hustoty částice

ČSN EN 15210-12010. Tuhá biopaliva - Stanovení mechanické odolnosti pelet a briket - Část 1: Pelety

ČSN EN 15270:2010 Hořáky spalující pelety pro kotle malých výkonů - Terminologie, požadavky, zkoušení, značení

ČSN EN 303-5:2000 Kotle pro ústřední vytápění. Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém výkonu nejvýše 300 kW. Terminologie, požadavky, zkoušení a značení. (zrušena k 1.2.2013)

ČSN EN 303-5:2013 Kotle pro ústřední vytápění. Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém výkonu nejvýše 500 kW. Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.

DIN 51731:1996. Testing of solid fuels - Compressed untreated wood - Requirements and testing. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard) / 01-Oct-1996 / 4 pages (již neplatná – 10.9.2012)

ÖNORM M 7135 (2000) Preßlinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassender Rinde-Pellets und Briketts -Anforderungen und Prufbestimmungen.

Směrnice 2000/76/ES o spalování odpadů. Směrnice evropského parlamentu a rady.

Zákon ČR. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a související předpisy. (účinnost od: 1.9.2012)

11.3 Firemní literatura

Agromechanika (2009) Návod k obsluze a údržbě pro teplovodní kotle na spalování dřeva AM Energo. Agromechanika v.o.s. Lhenice.

Agromachanika (2010) Návod k obsluze a údržbě pro automatický teplovodní kotel na pevná paliva AM Licotherm. Agromechanika v.o.s. Lhenice.

Atea (2010) Sláma - nevyužitý zdroj energie. Atea Praha s.r.o. Rudná u Prahy.

Benekov (2012) Návod k obsluze a instalaci kotle Benekov R15, R25 a R50. Benekov term s.r.o. Horní Benešov.

Benekov (2013a) Návod k obsluze a instalaci kotle Benekov C16, C26 a C51. Benekov term s.r.o. Horní Benešov.

Benekov (2013b) Technické podklady k instalacím automatických kotlů na pevná paliva a biomasu Benekov. Benekov term s.r.o. Horní Benešov.

Buderus (2013a) Tepelné čerpadlo vzduch - voda Logatherm WPL. Projekční podklady. Bosch Termotechnika s.r.o. Praha.

Buderus (2013b) Tepelné čerpadlo vzduch - voda Logatherm WPLS. Projekční podklady. Bosch Termotechnika s.r.o. Praha.

Dakon (2013) Projekční podklady kotlů na tuhá paliva Dakkon DOR F a Dakon FB 2. Bosch Termotechnika s.r.o. Praha. p.12

DZ Dražice (2012) Návod k obsluze a instalaci akumulární nádrže typ NAD. Družstevní závody Dražice - strojírna s.r.o. Dražice.

DZ Dražice (2013) Návod k obsluze a instalaci nepřímý otopný ohříváč vody OKC NTR/HP. Družstevní závody Dražice - strojírna s.r.o. Dražice.

Ecoflex (2007) Ecoflex G. Návod k použití. Fenix Trading s.r.o. Jeseník.

Ecoflex (2012) Ecoflex ET. Instalační a uživatelská příručka. Fenix Trading s.r.o. Jeseník.

Esel (2011) Ceník Guntamatic. Esel Technologies s.r.o. Kostelec nad Černými lesy.

Guntamatic (2008) Kotel na spalování pelet Biostar Flex / Box / W. Plánovací podklady. Esel Technologies s.r.o. Kostelec nad Černými lesy.

Guntamatic (2010) Pellet Boiler Biostar flex/box/w. Instalation instructions. Guntamatic Heating GmbH, Peuerbach, Austria.

Guntamatic (2013) Guntamatic Biomass Boiler Heating Range. Guntamatic Heating GmbH, Peuerbach, Austria.

Junkers (2007) Junkers Ceraclass. Obslužný návod. Bosch Termotechnika s.r.o. Obchodní divize Junkers, Praha

Junkers (2013) Prospekt Ceraclass, Cerastar, Ceramini. Bosch Termotechnika s.r.o. Obchodní divize Junkers, Praha

Korado (2013) Desková otopná tělesa Radik. Korado, a.s. Česká Třebová.

Ponast (2013) Informační a plánovací návod. Systémy pro vytápění peletami s kotly KP11, KP11.1, KP12, KP12S, KP21, KP22, KP22S, KP51, KP52S, KP61, KP62, KP62S, KP82, KP82S. Ponast s.r.o. Valašské Meziříčí.

Prodesa. (2010a) DIRECT DRYING DRUM.

Prodesa. (2010b) LOW TEMPERATURE BELT DRYING FOR WOOD.

Rauschert (2010) The Experts for Innovative Heating technology. Rauschert Steinbach GmbH Steinbach am Wald.

Revel (2013) Systém Revel-PEX. Revel s.r.o. Příbram.

Verner (2005) Projekční podklady zapojení kotle s akumulací nádrží systémem Verner. Verner a.s. Červený Kostelec.

Verner (2010a) Projekční podklady teplovodní kotle Verner V140 a V210. Verner a.s. Červený Kostelec.

Verner (2010b) Projekční podklady pro automatické kotle Verner A251 a A501. Verner a.s. Červený Kostelec.

Verner (2011) Projekční podklady interiérový kotel Verner 13/10. Verner a.s. Červený Kostelec.

Viadrus (2013) Viadrus Herkules U28. Návod k obsluze a instalaci kotle. Viadrus a.s. Bohumín.

11.4 Web

Fučík, Z. (2004) Vytápění domů s malou energetickou ztrátou není zcela jednoduché. URL: <http://www.tzb-info.cz/1910-vytapeni-domu-s-malou-energetickou-ztratou-neni-zcela-jednoduche>. [navštíveno: 05.09.2011]

Revel (2012) URL: <http://www.revel-pex.com/system-revel-pex/grafy-a-tabulky/>. [navštíveno: 05.09.2011]

Ryšavý, Z. (2006a) Porovnání výpočtů tepelných ztrát podle ČSN 06 0210 a ČSN EN 12831. URL: <http://www.tzb-info.cz/2987-porovnani-vypoctu-tepelnych-ztrat-podle-csn-06-0210-a-csn-en-12831>. [navštíveno: 05.09.2011]

Ryšavý, Z. (2006b) Porovnání výpočtu RD podle ČSN 06 0210 a ČSN EN 12831. URL: <http://www.tzb-info.cz/3555-porovnani-vypoctu-rd-podle-csn-06-0210-a-csn-en-12831>. [navštíveno: 05.09.2011]

Soviš, I. (2007) Jak se zapaluje automatický kotel na pelety. URL: www.i-ekis.cz/?idp=5937 [navštíveno: 05.09.2011]

TZB-info (2013a) Původní kalkulačka nákladů na paliva. URL: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/139-porovnani-nakladu-na-vytapani-podle-druhu-paliva> [navštíveno: 31.1.2014]

TZB-info (2013b) Nová kalkulačka nákladů na energie. URL: <http://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/138-porovnani-nakladu-na-vytapani-tzb-info> [navštíveno: 31.1.2014]

12 Seznam zkratek

A	Popel (Ash)
ANSI	American National Standards Institute (Americký národní standardizační institut)
ASAE	American Society of Association Executives
BD	Sypná hmotnost (Bulk Density)
BIOBIB	Databáze biopaliv. Institut für Verfahrenstechnik Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften. Technische Universität Wien, Österreich.
CO	Oxid uhelnatý
COP	Coefficient of Performance
ČSN	Česká státní norma
D	Průměr (Diameter)
db	vztaženo k sušině (dry basis)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Německý ústav pro průmyslovou normalizaci)
DU	Mechanická odolnost (Durability)
ECN	Energy research Centre of the Netherlands
EN	Evropská norma
F	Jemné částice (Fine particle)
FT	Teplota tečení (Flow Temperature)
GCV	Spalné teplo (Gross Calorific Value)
HT	Teplota polokulovitěho tvaru (Hemisphere Temperature)
HU O2	Hnědé uhlí, frakce ořech dva
IEA	International Energy Agency
IO	Integrovaný obvod
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní organizace pro normalizaci)
KKD	Krátké kusové dříví
L	Délka (Length)
LVS	Lesní vyvážecí souprava
M	Vlhkost (Moisture)
MaR	Měření a regulace
NCV	Výhřevnost (Net Calorific Value)
NIR	Blízké infračervené spektrum (Near Infrared Spectrum)
NOx	Oxidy dusíku souhrnně (NO ₂ a N ₂ O)
OGC	Celkový organický uhlík
OGC	Organický uhlík (Organic Carbon)
ONORM	Osterreichischer Normenausschuss für Industrie und Gewerbe (Rakouský normalizační institut)
OZ	Operační zesilovač
PD	Hustota částic (Particle Density)
PHYLLIS	Databáze biopaliv. Energy research Centre of the Netherlands. Petten, Netherlands.
PLM	Plnometr
PM ₁₀	Prachové částice pod 10 μm
PRM	Prostorový metr MALÝMI NEBO VELKÝMI???
PTC	Pozistor
Q	Výhřevnost
ST	Teplota smršnění (Sphere temperature)
TD	Teplota deformace (Deformation Temperature)
TV	Teplá voda
TZB	Technické zařízení budov
TZL	Tuhé znečišťující látky
VM	Prchavá hořlavina (Volatile matter)
wb	vztaženo k vlhké hmotě (wet basis)