

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE



Technická  
fakulta

TECHNICKÁ FAKULTA

**Mechanické chování semen olejnin pod tlakovým  
zatížením**

Katedra mechaniky a strojnictví

Doktorská disertační práce

Monika Divišová

2020

<b>Program:</b>	<b>Zemědělské inženýrství</b>
<b>Obor:</b>	<b>Technika zemědělských technologických systémů</b>
<b>Disertační práce:</b>	<b>Mechanické chování semen olejnin pod tlakovým zatížením</b>
<b>Školitel:</b>	<b>prof. Ing. David Herák, Ph.D.</b>
<b>Jméno a příjmení doktoranda:</b>	<b>Ing. Monika Divišová</b>

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracovala samostatně pod vedením školitele a uvedla veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Monika Divišová

PODPIS:

DATUM: 08. 10. 2020

## Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu disertační práce prof. Ing. Davidu Herákovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této disertační práce. Za pomoc dále děkuji kolegovi doc. Ing. Abrahamovi Kabutey, Ph.D. a za osobní inspiraci paní Ing. Janě Burianové.

## **Abstrakt**

Pro experiment byla použita semene řepky olejné. Semena byla ochlazená na  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a zahřátá na  $20\text{ }^{\circ}$  –  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mimo teplot, byly použity i odlišné vlhkosti a to 0 %, – 9 % (w.b). 5% je měřená standardní vlhkost při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Semena byla lisována v ocelové nádobě do maximální stanovené síly 100 kN, poté následovala relaxace. Energie pro lisování byla stanovena jako plocha pod křivkou zaznamenanou při lisování. Zisk oleje byl určen rozdílem hmotností. Jednotkový zisk oleje byl určen poměrem zisku oleje ke spotřebované energii. Všechny naměřené výsledky byly zpracovány pomocí počítačového programu Mathcad 14 (MathCAD 14, PTC Software, Needham, MA, USA) pomocí algoritmu Marquardt-Levenberg pro stanovení matematických modelů. K výsledkům byly vytvořeny apopsány přechodové křivky. Model křivky zisku oleje při různých teplotách může být popsán jako tranzitní křivka. Statistická analýza ANOVA ukazuje, že naměřené hodnoty zisku oleje, energie a jednotek a výsledky získané z jednotlivých modelů jsou statisticky významné při hladině pravděpodobnosti 0,05. Pro popis mechanického chování lisování lze použít tangentní a reologické modely. Jako nejvhodnější se ukázal reologický model se dvěma větvemi pro kompresi a třemi větvemi pro relaxaci. Hodnoty pro jednotlivé větve modelu byly vyčísleny a jsou statisticky významné. Reologické modely vychází z obecného Maxwelllova modelu reologického modelu. Experiment prokázal, že s nižší teplotou klesá zisk oleje, s vyšší teplotou stoupá. S nižší vlhkostí zisk oleje stoupá, ale stoupá i energie potřebná na lisování.

**Klíčová slova:** analýza dat, semena olejnin, mechanické vlastnosti, tlakové zatížení

## **Abstract**

Rape seeds stored at a standard humidity of 5 % and laboratory temperature of 20 °C were used for the experiment. The seeds were pre-treated at different moisture contents ranging from 0 %, to 9 % (wb) and temperature from -40 ° C to 80° C. The seeds were pressed to a maximum force of 100 kN, followed by relaxation process. The energy was determined as the area under the force-deformation curve. The oil gain was determined by the difference in weight. The unit oil gain was determined by the ratio of oil gain to energy consumed. All measured results were processed using the computer program Mathcad 14 (MathCAD 14, PTC Software, Needham, MA, USA) using the Marquardt-Levenberg algorithm for determining mathematical models. The oil gain curve can be interpreted as a transit curve, where the obtained values were interpolated by a mathematical model. Statistical analysis ANOVA shows that the measured values of oil, energy and unit gain and the results obtained from individual models were statistically significant at a probability level of 0.05. Transition curves were created and described for the results. Tangent models and rheological models can be used to describe the mechanical behaviour of pressing behaviour. A rheological model with two branches proved to be the most suitable. The values for the individual branches of the model were statistically significant. For relaxation, which was part of the experiment, a model with three branches was suitable. Both models are based on Maxwell's general rheological model. The experiment showed that with a lower temperature the oil gain decreased whereas with a higher temperature it increased.

**Key words:** mechanical properties, compression test, data analysis, oil bearing seeds

1	Úvod.....	1
2	Cíle práce .....	4
3	Přehled publikovaných informací .....	5
3.1	Jedlé a nejedlé olejniny .....	5
3.2	Fyzikální a mechanické vlastnosti olejin .....	7
3.2.1	Vliv vlhkosti .....	8
3.2.2	Tepelné zpracování semen olejin .....	9
3.2.3	Tepelná vodivost .....	11
3.2.4	Entalpie.....	11
3.2.5	Koaguace bílkovin.....	12
3.2.6	Průchod oleje buňkami .....	12
3.2.7	Pasivní transport .....	13
3.2.8	Latentní teplo.....	16
3.2.9	Viskozita.....	17
3.2.10	Koeficient filtrace.....	22
3.2.11	Tlak a propustnost .....	22
3.2.12	Energetická spotřeba – lisy .....	22
3.2.13	Manipulace a skladování .....	23
3.2.14	Bod olejnatosti.....	24
3.2.15	Způsoby extrahování oleje z olejnatých plodin.....	24
3.3	Matematické modely popisující mechanické chování semen olejin.....	27
3.3.1	Empirické metody .....	27
3.3.2	Teoretické modely.....	27
3.3.3	Lineární lisování semen – křivka tangens .....	28
3.3.4	Teorie reciproční transformace .....	34
3.3.5	Reologické modely.....	39
3.3.6	Creep (tečení) .....	40
3.3.7	Relaxace .....	42
3.3.8	FEM Modely .....	44
4	Materiály a metody .....	47
4.1	Stanovení základních parametrů .....	47
4.1.1	Stanovení množství (hmotnosti).....	47
4.1.2	Stanovení teploty.....	47
4.1.3	Stanovení vlhkosti.....	49
4.1.4	Stanovení porozity.....	49

4.2	Stanovení průběhu experimentu .....	50
4.2.1	Kompresní zkouška .....	50
4.2.2	Relaxační zkouška.....	51
4.2.3	Energie .....	52
4.2.4	Zisk oleje .....	52
4.2.5	Jednotková energie .....	53
4.2.6	Matematické modely komprese .....	53
4.2.7	Matematický model relaxace.....	54
4.2.8	Stanovení bodu olejnatosti .....	55
4.2.9	Analýza dat.....	56
5	Výsledky a diskuze .....	57
5.1	Vliv teploty – kompresní zkouška .....	57
5.1.1	Modely – vliv teploty na zisk oleje a množství energie .....	64
5.1.2	Tangentní modely.....	67
5.1.3	Reologické modely stlačování – vliv teploty .....	69
5.1.4	Body olejnatosti.....	71
5.2	Vliv teploty – relaxace .....	73
5.3	Vliv vlhkosti – kompresní zkouška.....	76
5.3.1	Modely – vliv vlhkosti .....	80
5.3.2	Vliv vlhkosti – tangentní model .....	81
5.3.3	Vliv vlhkosti – reologický model komprese .....	83
5.4	Vliv vlhkosti – relaxace .....	85
5.5	Bod olejnatosti – vliv vlhkosti .....	87
5.6	Citlivostní analýza .....	88
5.7	Obecná diskuze .....	90
6	Závěr .....	92
7	Použitá literatura .....	94



## Seznam obrázků

Obr. 1 Buněčná stěna (Cosgrove, 2005; Schopfer, 2001) .....	12
Obr. 2 Dynamická a kinematičká viskozita – závislost na teplotě (Pirkl, 2005) .....	17
Obr. 3 Toková a viskozitní křivka newtonovské kapaliny (Pirkl, 2005) .....	18
Obr. 4 Tokové a viskozitní charakteristiky nenewtonovských kapalin (Pirkl, 2005) .....	20
Obr. 5 Schéma lineárního lisování, Herák a kol., 2011 .....	29
Obr. 6 Lineární lisování, závislost síly a deformace, Herák a kol., 2011 .....	32
Obr. 7 Koeficient tlakové síly, Kabutey a kol., 2018 .....	32
Obr. 8 Deformační koeficient, Kabutey a kol. 2018 .....	33
Obr. 9 Závislost mezi tlakovou silou a deformací v počáteční lis. výšce (Herák a kol. 2014) 35	
Obr. 10 Závislost mezi RST a napětím jako funkce parametru počáteční lisovací výšky .....	36
Obr. 11 Závislost RST jako funkce počáteční lisovací výšky (Herák a kol., 2014) .....	36
Obr. 12 Závislost tlakové síly a RST na relativní deformaci Herák a kol., 2014 .....	37
Obr. 13 Creep křivky, porovnání naměřených hodnot a modelu, Mizera a kol., 2019 .....	40
Obr. 14 Schéma Kelvin-Voight modelu creepových vlastností vláken (Mizera a kol., 2019) 41	
Obr. 15 Vztah mezi napětím a dobou relaxace při lisování jatrophy (Herák a kol., 2015).....	42
Obr. 16 Schéma Wichertova modelu A a Wiechertova model B, (Herák a kol., 2015) .....	42
Obr. 17 Vizualizace experimentu lisování jatrophy a modelu FEM, (Petrů a kol., 2014).....	45
Obr. 18: Závislost Von Misesova napětí a FEM modeůy semen (Petrů a kol., 2014).....	46
Obr. 19 Zařizení na ohřev nádoby.....	48
Obr. 20 Lisování při teplotě -40 °C.....	48
Obr. 21 Parametry lisovací nádoby, Herák a kol. 2009 .....	50
Obr. 22 Průběh relaxace, Herák a kol. 2017 .....	51
Obr. 23 Výpočet energie – plocha pod deformační křivkou .....	52
Obr. 24 Reologický model – dvě větve (Herák, Sedláček, 2017).....	54
Obr. 25 Reologický model, tři větve (Herák a kol., 2015).....	54
Obr. 26 Lisovací zařizení LabTest 5.50ST.....	55
Obr. 27 Sestava lisovacího a záznamového zařizení.....	55
Obr. 28 Křivky průběhu lisování při různých teplotách.....	57
<i>Obr. 29 Křivky stlačování z naměřených dat pro různé teploty .....</i>	<i>58</i>
Obr. 30 Křivky relaxace z naměřených dat pro různé teploty.....	58
<i>Obr. 31 Naměřené hodnoty .....</i>	<i>59</i>
Obr. 32 Vliv teploty na zisk oleje velikost energie .....	60

Obr. 33	Matematický model pro zjištěné hodnoty .....	64
Obr. 34	Ukázka naměřené hodnoty vs. model tangens .....	67
Obr. 35	Modely tangens pro lisování při odlišných teplotách .....	67
Obr. 36	První větev reologického modelu, vliv teploty .....	69
Obr. 37	Druhá větev modelu, vliv teploty .....	70
Obr. 38	Druhá větev modelu, detail .....	71
Obr. 39	Počáteční body olejnatosti při 80 °C a -40 °C .....	71
Obr. 40	Ukázka uvolnění oleje před koncem experimentu .....	72
Obr. 41	Bod olejnatosti – energie .....	72
Obr. 42	Relaxační křivky – vliv teploty .....	73
Obr. 43	Provnání relaxace (vliv teploty) v rozdílných časech .....	74
Obr. 44	Koeficienty elasticity reologického modelu .....	75
Obr. 45	Koeficienty viskozity reologického modelu .....	75
Obr. 46	Průběh lisování, komprese a relaxace, různé hodnoty vlhkosti .....	76
Obr. 47	Naměřené hodnoty pro různé vlhkosti, fáze komprese .....	76
Obr. 48	Naměřené hodnoty pro různé vlhkosti, fáze relaxace .....	77
Obr. 49	Porovnání parametrů experimentu v závislosti na vlhkosti .....	78
Obr. 50	Vliv vlhkosti – modely .....	80
Obr. 51	Koeficienty tangentního modelu .....	81
Obr. 52	První větev modelu, vliv vlhkosti .....	83
Obr. 53	Druhá větev modelu, vliv vlhkosti .....	84
Obr. 54	Reologický model, hodnoty modulů pružnosti .....	85
Obr. 55	Reologický model, hodnoty viskozity .....	86
Obr. 56	Bod olejnatosti – závislost na vlhkosti .....	87
Obr. 57	Citlivostní analýza – vliv na energii .....	88
Obr. 58	Citlivostní analýza – vliv na jednotkovou energii .....	89
Obr. 59	Citlivostní analýza – vliv na zisk oleje .....	89

## Seznam tabulek

Tab. 1 Základní parametry lisované směsi semen.....	47
Tab. 2 Naměřené hodnoty pro jednotlivé teploty.....	59
Tab. 3 Hodnoty modelu pro jednotlivé parametry rovnice .....	64
Tab. 4 Statistická analýza ANOVA .....	65
Tab. 5 Koeficienty modelu tangens - A a B .....	68
Tab. 6 Tabulka reologického modelu.....	69
Tab. 7 Reologický model – vliv teploty, relaxace.....	74
Tab. 8 Zjištěné hodnoty pro lisování při různých vlhkostech .....	77
Tab. 9 Hodnoty pro zjištěný matematický model .....	80
Tab. 10 Hodnoty pro matematický model tangens při různých vlhkostech.....	81
Tab. 11 Reologický model relaxace – vliv vlhkosti.....	83
Tab. 12 Reologický model, vliv vlhkosti relaxace.....	85

## 1 Úvod

Vhodným nastavením velikosti lisovací síly lze získat optimální množství oleje v poměru k minimální vstupní energii. Velikost lisovací síly také může při určitých podmínkách nepřímo ovlivnit výstupní kvalitu oleje. Při vyšších lisovacích rychlostech a síle může dojít vlivem vnitřního tření semen k zahřátí směsi a tím k tepelnému ovlivnění získaného oleje. Při velkých lisovacích silách se ale může porušit vnitřní struktura oleje. V odborné literatuře nebylo v současné době dostatečně popsáno mechanické chování směsi semen olejnin pod tlakovým zatížením. Výrobní technologie používané pro zpracování semen olejnin jsou konstruovány většinou podle praktických zkušeností získaných z provozu těchto technologií (metodou pokus omyl). Výrobní podniky produkující lisy na zpracování těchto rostlin se snaží již několik let popsat mechanické chování semen olejnin a aplikovat tento model mechanického chování do konstrukce lisovacích technologií. Do současné doby se však nepodařilo uspokojivě popsat mechanické chování semen olejnin pod tlakovým zatížením a vytvořit a aplikovat model tohoto mechanického chování do návrhů průmyslových technologií lisování.

Olejnin, jako řepka, slunečnice, palma olejná, jatropha a další, představují významnou složku moderního zemědělství, zvláště pro jejich dostupnost a vysoký obsah živin jak pro lidi, tak pro chovná zvířata (Bargale, 1997). Olej může být extrahován z mnoha surovin, avšak ne všechny obsahují jedlý olej. Potravinářské oleje mohou být získány na základě živočišné, či rostlinné výroby (Akinoso a kol. 2006). Oleje z rostlin tvoří skupinu rostlinných olejů. Hlavním zdrojem rostlinných olejů jsou jednoleté rostliny, jako sójové boby, bavlna, podzemnice olejná, slunečnice, řepka, sezamová semena (Frank, 1998; O'Brien, 1998). Dalším zdrojem jsou olejnaté vytrvalé rostliny, jako je oliva, kokos, shea, kešu a palma (Atiku a kol., 2004). V současné době panuje celosvětově vysoká poptávka po rostlinných olejích díky vzrůstajícímu domácímu i průmyslovému užití. Obsah oleje v semenech se pohybuje od 3 % do 70 % celkové hmotnosti semene, ořechu, jádra, či ovoce (Bachman, 2004). Průmysl má tak důvod k produkci kvalitních olejních produktů za přijatelnou cenu (Akinoso a kol., 2006).

Olej je získáván ze semen buď chemickou extrakcí, nebo mechanickým lisováním. Chemická extrakce je populární například v Severní Americe a je vysoce efektivní (zisk až 98 %). Tato metoda nicméně vyžaduje rozvinutou infrastrukturu a vysoké počáteční náklady. Dále hrozí nebezpečí požáru, či znečištění z důvodu užívání velkého počtu vysoce hořlavých rozpouštědel (Bargale, 1997).

Mechanická extrakce pomocí šroubového, či hydraulického lisu je nejběžnější metodou pro extrakci oleje ze semen (Mrema a McNulty, 1985). Tato metoda je obvyklá pro rozvojové země a zahrnuje nízké vstupní a provozní náklady. Ve srovnání s metodou chemické extrakce. Zároveň je osvobozena od jakýchkoli hořlavých, chemických a nebezpečných substancí. V Indii, z celkových vyprodukovaných 24 milionů tun olejnin, je téměř 90 % lisováno použitím mechanických metod (Singh a Bargale, 2000). Hlavní důvody stojící za popularitou mechanických lisů jak v Indii, tak v dalších rozvojových zemích představuje silná konstrukce zařízení, snadná údržba a manipulace pro personál, rychlá adaptace na různorodé plodiny a rychlé získání produktu po několika minutách od začátku lisování. Oproti chemickým metodám, mechanické lisování produkuje na proteiny bohatý produkt bez jakýchkoli chemických látek (Singh a Bargale 2000). Mechanická extrakce, za užití lisů je užívána pro kapacitu v rozsahu od 25 do 1000 kg·hod<sup>-1</sup> (Karaj a Muller, 2011; Singh a Bargale, 2000). Nicméně mechanické lisy jsou stále relativně neefektivní. Efektivita extrakce zřídka přesáhne 80 % ve srovnání se chemickou metodou, která je schopna dosáhnout až 98% zisku oleje (Bargale a kol., 2000). Užitím mechanických postupů zbývá 8–14 % oleje stále v drcené hmotě (Srikantha, 1980).

Další metody extrakce oleje zahrnují vodní enzymatické extrakce oleje (AEOE) a super – kritická fluidní extrakce (SFE). Jedna nevýhoda spojená s (AEOE) je dlouhý čas procesu, který je potřebný pro enzymy k opuštění olejových buňek. To brání použití celé metody (Shah a kol., 2004). Super – kritická fluidní extrakce je efektivní stejně jako chemická extrakce, ale chybí informace o jejím užívání na komerční úrovni (Bargale, 1997). Mnoho úsilí bylo vynaloženo v minulosti i dnes ke zlepšení efektivity mechanických lisů skrz modifikaci návrhu lisu a optimalizaci procesních parametrů (Ohlson, 1992; Singh a kol., 2002). Ty mohou být například mechanické (loupání, drcení), tepelné (předehřívání, suchá extruze), hydrotermální (máčení v horké vodě, páře) a chemické (enzymová hydrolýza).

Ošetření semen před samotnou extrakcí je užíváno ke zvýšení zisku extrahovaného oleje (Tindale a Hass, 1976; Khan a Hanna, 1983; Bargale a kol., 1999). Další významnou proměnnou ovlivňující výkon mechanických lisů je vlhkost semen během doby lisování. Vysoká obsažená vlhkost semen navyšuje plasticitu a úroveň stlačování a tím přispívá k nižší výnosnosti oleje. Dále působí jako mazadlo v komoře šroubového lisu, kde způsobuje neefektivní tření během lisování (Singh a kol., 2002).

Při pokusu navýšení výkonů mechanických lisů skrz geometrii lisů a optimalizaci procesních parametrů jsou používány matematické simulace (Mrema a McNulty, 1985; Vadke a kol., 1988; Sukuraman a Singh, 1989; Singh a Singh, 1991; Sivala a kol., 1991; Hamzat a Clarke, 1993). Tyto studie jsou založeny na konceptu rovnic toku kapalin zahrnující Tersaghiho rovnici pro ustálení nasyceného oleje, soužící k vyjádření chování lisované směsi, Hagen – Poiseuillovu rovnici pro tok kapalin skrz trubice, sloužící k vyjádření toku oleje skrz póry v buněčných stěnách a Darcyho zákon pro tok skrz propustné médium (Mrema a McNulty, 1985). Pro modely pro zvýšení zisku oleje byly použity počítačové programy zahrnující lineární program pro optimalizaci (Akinoso a kol., 2006), reakci povrchu (Sivakumaran a Goodrum 1987) a oddělení prvků včetně mnohočlenné regrese (Owolarafe a kol., 2008). Za účelem optimalizace mechanických extrakčních metod, jako je šroubový lis, je nezbytné porozumět jak mechanickým, tak i chemickým vlastnostem semen olejnatých plodin.

## 2 Cíle práce

Určit vlivy teploty a vlhkosti na proces lisování směsi semen řepky olejné (*Brassica napus* L.)

Stanovit energetickou náročnost lisování, najít optimum, kdy za při nejmenší energii dojde k největšímu zisku oleje.

Stanovit závislost mezi spotřebovanou energií a teplotou směsi semen při lisování.

Stanovit závislost mezi spotřebovanou energií a vlhkostí směsi semen při lisování.

Stanovit závislost mezi ziskem oleje a teplotou směsi semen při lisování.

Stanovit závislost mezi ziskem oleje a vlhkostí směsi semen při lisování.

Stanovit body olejnatosti.

Vytvořit matematické modely popisující mechanické chování olejnin pod tlakovým zatížením pro různé teploty a vlhkosti.

### 3 Přehled publikovaných informací

Semena olejnin, například sóji, řepky a slunečnice, obsahují velký podíl olejů bohatých na proteiny. Oleje, získávané ze semen olejnin či rostlin, patří mezi rostlinné oleje. Rostlinné oleje se považují za nejstarší druh chemických sloučenin, které lidstvo zná (Hasenhuettl a kol., 1991). Větší výtěžnost lze dosáhnout ve třech oblastech: v samotné výtěžnosti olejů, kvalitě olejů a ve výrobních nákladech. Vedle dalšího zlepšování stávajících technologií se objevuje řada nových technologií. (Willems, 2007)

#### 3.1 Jedlé a nejedlé olejniny

##### Jedlé olejniny

Přestože většina rostlin obsahuje určitý podíl oleje, komerční zpracování olejnin je omezeno na poměrně malý počet druhů. Základními rostlinami, zpracovávanými v dnešní době průmyslově pro výrobu jedlých olejů, jsou tyto:

- sójové boby,
- semena řepky (Canola),
- plody palmy olejná,
- semena bavlníku,
- podzemnice olejná,
- semena slunečnice,
- olivy,
- kokos,
- světlice barvířská,
- sezam.

##### Nejedlé olejniny

Řada hospodářsky využitelných rostlin produkuje semena s velkým obsahem olejů. Vzhledem k obsahu toxických látek, hořkosti, velkému obsahu méně známých mastných kyselin a dalším nežádoucím fyzickým vlastnostem, se tyto olejniny jen málokdy používají k výrobě jedlých olejů.



Jejich specifické chemické vlastnosti jsou převážně používány komerčně ve výrobě některých průmyslových výrobků, například: maziv, tuků, mýdel, kosmetických výrobků, zpracování kůže, textilu, léků, pryskyřic, nylonu, plastů, lepidel, insekticidů, pojiv při výrobě barev a laků, náhražek běžně používaných vosků, uretanových pěn, svíček, nátěrových hmot, petrochemie, mastných kyselin, syntetických vůní, elektrických izolací a k dalším účelům. Díky jejich značnému průmyslovému využití odpadá nutnost použití běžných jedlých olejů k nepotravinářským účelům. Výlisky z olejin se také používají jako krmiva či hnojiva.

### 3.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti olejnin

Údaje o mechanických vlastnostech či parametry deformace olejnin při lisování jsou potřebné pro navržení efektivního systému lisování a také pro zlepšení výrobního procesu a výstupních parametrů (Gupta a Das, 2000). Parametry deformace řepky a sóji byly poprvé popsány Bilanským (Bilanský, 1996), který změřil sílu potřebnou pro prasknutí semen sójových bobů. Rozsáhlejší zkoušky se sójovými boby provedl Poulsen (Poulsen, 1978), který změřil tlakovou sílu, deformaci a pevnost při kvazistatickém zatížení. Ze studií rovněž vyplynulo, že podíl vlhkosti v semenech značně ovlivňuje mechanické vlastnosti semen olejnin. (Kabutey a kol., 2011; Gupta a Das, 2000).

Gupta a Das (Gupta a Das, 2000) zpracovali studii pro stanovení průměrné síly, míry deformace a energie potřebné pro prasknutí slupek slunečnicových semen a jader při podílu vlhkosti mezi 4 – 20 % (d.b.) v případě svisle či vodorovně orientovaného zatížení v závislosti na kvazistatickém tlaku. Z výsledků těchto studií vyplývá, že pro jakýkoliv podíl vlhkosti a pro jakoukoliv orientaci zatížení tlakové síly na slupku semene nebo na jádro klesá v závislosti na zvýšení deformace. Energie, absorbovaná jednotkou objemu při prasknutí, se rovněž zvyšuje s růstem podílu vlhkosti. Semena stlačovaná vertikálně pohlcují více energie před prasknutím než semena stlačovaná horizontálně.

Podobná studie byla provedena Karajem a Mullerem (Karaj a Muller, 2010) u plodu *Jatropha curcas L.* Síla potřebná k prasknutí, deformace v bodě prasknutí a deformace v závislosti na bodu prasknutí, tvrdost semene a energie potřebná k prasknutí byly změřeny ve třech základních směrech. Zjistilo se, že v případě vertikálního umístění je zapotřebí větší síly pro prasknutí jak pro semena, tak pro jádra.

Nejnižší hodnoty pro sílu prasknutí byly zaznamenány v příčném směru pro semena a ve vodorovném směru pro jádra. Síla potřebná k prasknutí byla větší u skořápky než u jádra. Tato skutečnost je dána tvrdostí skořápky semene a měkčí strukturou jader (Sirisomboon a kol., 2007). Deformace v bodě prasknutí a deformace v závislosti na dosažení bodu prasknutí u jader vykazovala celkově vyšší hodnoty než u semen, protože k prasknutí semen je nutný nižší tlak.

Zpracovávání olejnin patří mezi významná průmyslová odvětví celosvětové ekonomiky a výrobci potravin stále hledají nové možnosti využití jedlých rostlinných olejů. Použití správných výrobních postupů snižuje vstupní náklady na zpracování semen olejnin a zvyšuje kvalitu a výtěžnost oleje. Zásady a způsoby zpracování olejnin jsou popsány níže.

Znalost fyzikálních vlastností takových olejnatých plodin jako sójové boby, řepka olejná a slunečnice, je nezbytná pro navrhování konstrukce strojů a zařízení pro manipulaci, přepravu, třídění, loupání, sušení, skladování (Kachru a Rai, 1993). Důležitým ukazatelem je podíl vlhkosti, protože zpravidla ovlivňuje fyzikální vlastnosti semen olejnin, na což upozorňuje ve svých studiích řada výzkumných pracovníků (Kibar a Ozturk 2008; Izli a kol., 2009, Gupta a DaS 1996).

### 3.2.1 Vliv vlhkosti

Voda má sklon vylučovat se na povrchu pevných látek či tvořit s jinými látkami roztoky. V těchto případech se vytváří mezi vodou a příslušnou látkou vazba, jejíž pevnost závisí nejen na složení látky, ale i na její struktuře. Obecně nazýváme spojování látky a vlastnost látky vázat vodu hydroskopičnost.

Spojování vody s látkou má několik příčin. Voda ve vodném roztoku některé látky je na tuto látku obvykle vázána slabými chemickými vazbami vzniklými například disociací či hydratací molekul rozpuštěné látky. Vázanost vody na povrch pevné látky silnými, leč vratnými chemickými vazbami, je základem tzv. chemické adsorpce vody látkou.

Voda vylučující se na povrchu pevné látky může být k povrchu pevné látky vázaná také slabými chemickými vazbami či vzniklými elektrickými silami (polarizace). Pro tento jev je zaveden pojem fyzikální adsorpce vody v látce.

Dalším významným zdrojem vázanosti vody na povrch pevných látek jsou kapilární kondenzace vody. V látce jsou kapilární síly, jejichž působení je základem kapilární kondenzace vody v látce. Vznikají zejména v porézních materiálech tvořených drobnými strukturními prvky oddělenými od sebe póry. Proti vazbě vody v pevné látce působí kromě odpařování zejména vnější síly vyvolávající přetlak v dané látce či pod tlakem na jejích povrchu.

Kibar a Ozturk například uvádějí, že parametry (délka, šířka, tloušťka) sójových bobů se zvyšují, když se zvýší podíl vlhkosti o 8 až 16 (% v sušině), což svědčí o pozitivním vlivu vlhkosti obsažené v plodinách na tyto parametry (Kibar a Ozturk, 2008).

Podobné výsledky byly zjištěny také pro odrůdy Capitol, Jefneuf a Samurai řepky olejné při podílu vlhkosti 8,3 až 25,9 (%) (Izli a kol. 2009). Slunečnicová semena s podílem vlhkosti mezi 10,06 a 27,06 (% db) vykazují obdobné výsledky (Gupta a Das 1996).

Velikost bobů i jejich plocha povrchu roste společně s růstem podílu vlhkosti. Objemová hmotnost, hustota a pórovitost bobů klesá přímo úměrně zvýšení podílu vlhkosti. Izli a kol. (Izli a kol., 2009) zjistili, že vyšší podíl vlhkosti u řepky vede zakulacenému tvaru a k pórovitosti. I u slunečnicových semen se při vyšší vlhkosti více zakulacují, hustota a pórovitost se též zvyšují. (Isik a Izli 2007).

Kibar a Ozturk (2008) uvádějí, že úhel vnitřního tření a statický koeficient pro sóju se zvyšuje při tření na dřevěných plochách, betonu a oceli tehdy, když se zvyšuje vlhkost. Tato závislost je dána zvýšenou přilnavostí plodů sóji k povrchům materiálů při vysoké vlhkosti. Ze všech povrchů byly zaznamenány nejvyšší hodnoty statického součinitele tření u betonu, nižší u dřevěných povrchů a pozinkované oceli. Podobné výsledky byly zjištěny, podle Isika a Izliho (2007), také pro slunečnici.

### **3.2.2 Tepelné zpracování semen olejnin**

Téměř u všech olejnin je získávání oleje snazší, pokud se olejnin dostatečně zahřejí před jejich mechanickým zpracováním nebo extrahováním. Tento krok je velmi důležitý pro zvýšení výtěžnosti oleje při lisování vřetenovými lisami (Taylor 1937; Bargale 1997). Teploty zahřívání se mohou pohybovat v rozmezí 70 až 110 °C podle druhu semen a způsobu extrahování.

Důvody pro zahřívání jsou následující (Sosulski 1993; Bargale 1997):

- roztržení olejových „kuliček“ a jejich splnutí do kapek,
- zvýšení tekutosti oleje,
- stmelování bílkovin v membránách pro větší propustnost olejů v buněčných stěnách,
- zvýšení plasticity drcených semen pro rychlé a efektivní lisování,
- denaturace bílkovinných aleuronových klíčků a nižší rozpustnost bílkovinných složek buněk v oleji,
- detoxikace ničí složky jako gossypol, inhibitory trypsinu, plísně a bakterie (není však účinná vůči alfatoxinům),
- insolubilizace nebo aktivace řady fosfatidových materiálů, snížení požadavků na rafinaci,
- deaktivace lipáz, uvolňujících nemastné kyseliny a zvýšení ztrát při rafinaci,
- zničení škodlivých a kvalitu oleje zhoršujících enzymů, např. lipoxygenázy a myrosinázy.

Při zahřívání dochází k prasknutí buněčné stěny díky jejímu zvětšení, což usnadňuje vytékání oleje. Bod tlaku u oleje klesá, kdežto tlak se zvyšuje v důsledku zvýšené viskozity. Třením se uvnitř nádoby vytváří teplo, a to se předává olejům. Například při zpracovávání řepky by teplota oleje neměla být vyšší než 40 °C, protože další zvyšování teploty zvyšuje podíl fosforu ve vylisovaném oleji. Při určité hladině množství fosforu a změně kyselosti dochází k negativnímu vlivu na výkon např. motoru.

Vysoký podíl fosforu je nežádoucí charakteristika paliva, protože může dojít ke vzniku usazenin a k následnému ucpávání. Aby se zabránilo zahřátí oleje na teplotu vyšší než 40 °C, teplota v blízkosti zápusky lisu, tj. tam kde vzniká, by měla být nejvýše mezi 60 °C a 80 °C. Pokud je však výstupní teplota hmoty příliš nízká, je podíl pevných látek v oleji příliš vysoký a nevhodný (Ferchau 2000).

Průměrná tepelná kapacita (specifické teplo), je množství tepla potřebné ke zvýšení teploty jednotky hmotnosti o jeden stupeň. Za předpokladu, že nedojde ke změně fáze, množství tepla, které musí být přidáno k jednotce, aby se zvýšila její teplota z  $t_1$ , může být kalkulováno ze spekulativního tepla pomocí následující rov. č.1.

$$Q = m \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (J) \quad (1)$$

Kde  $m$  (g) je množství materiálu,  $c_p$  ( $J \cdot kg^{-1}$ ) je tepelná kapacita a  $T$  je teplota (°C) (rozdíl teplot) (Strochine, 200) Specifické teplo se určuje při konstantním tlaku. Při práci s plyny se měrné teplo obvykle určuje při konstantním objemu.

Hodnoty měrného tepla u běžných zemědělských materiálů a potravinářských výrobků jsou většinou známy. Pokud měrné teplo potravinářského nebo zemědělského materiálu není známo, lze jej odhadnout z jeho složení. Voda je součástí většiny zemědělských materiálů a potravin. V těch materiálech, kde je převládající složkou voda, se specifické teplo těchto materiálů blíží specifickému teplu vody.

Specifické zahřívání olejů a tuků je obvykle asi polovina měrného tepla suchého materiálu v zrnech a práscích, přibližně jedna třetina až jedna čtvrtina tepla vody. Obecně jsou měrná zahřívání materiálů obsahujících vysoké procento vody větší než měrná zahřívání suchých materiálů.

Led má specifické teplo asi poloviční než voda. Proto musí být přidáno méně tepla ke zvýšení teploty jednotky zmrazených zemědělských materiálů než ke zvýšení teploty po rozmrazení potravin. Měrné teploty pod bodem mrazu jsou přibližně polovinou měrného tepla než nad nulou. Měřené specifické teplo se mění s teplotou, pro rozsahy blízké pokojové teplotě je změna relativně malá. (Storchine,2000)

### 3.2.3 Tepelná vodivost

Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí, rov. 2.

$$\frac{Q}{tS} = \lambda \frac{\Delta T}{d} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (2)$$

Kde  $Q$ , je množství tepla, které za čas  $t$  projde mezi dvěma shodnými plochami obsahu  $S$  kolmými ke směru toku a vzájemně posunutými v tomto směru o vzdálenost  $d$ , je-li mezi nimi rozdíl teplot  $\Delta T$ .

Když je voda zmrzlá, její tepelná vodivost se zvýší na přibližně 2,2 W/m·K a čím nižší je teplota, tím je větší její tepelná vodivost. V důsledku toho je teplotní vodivost zmrazených materiálů obvykle vyšší. Dalšími faktory, které významně ovlivňují tepelnou konduktivitu, jsou pórovitost a orientace vláken. (Storchine, 2000)

### 3.2.4 Entalpie

Vychází z 1. termodynamického zákona, veličina vyjadřující tepelnou energii uloženou v dané látce. (Labík, 2015) Jednotkou je v soustavě SI kJ·kg<sup>-1</sup>, častěji je uváděno cal·g<sup>-1</sup>, viz. rov. č.3. (Storchine, 2000)

$$\Delta Q = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (\text{J, kJ}) \quad (3)$$

Kde  $m$  (g) je množství materiálu,  $h_2$  je entalpie při teplotě  $T_2$  a,  $h_1$  je entalpie při teplotě  $T_1$ .

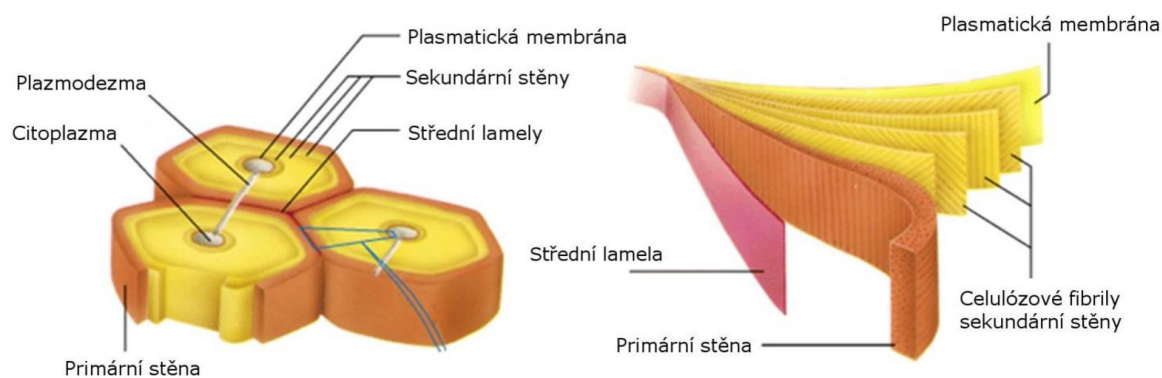
### 3.2.5 Koaguace bílkovin

Vratná změna sekundární a terciární struktury bílkovin se nazývá koagulace. Koagulaci způsobují vodné roztoky některých solí, např. NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Protože v koagulovaném stavu jsou bílkoviny nerozpustné ve vodě (týká se to pochopitelně jen těch, které v přirozeném (nativním) stavu rozpustné jsou), využívá se možnosti koagulace k oddělování bílkovin od rozpustných látek. Bílkoviny, které jsou rozpustné ve vodě, tvoří koloidní roztoky. Koloidní roztoky se vyznačují velikostí rozpuštěných (přesněji v rozpouštědle rozptýlených) částic. Koloidní roztoky jsou obtížně filtrovatelné. (Biochemie Mendelu, 2020)

### 3.2.6 Průchod oleje buňkami

Struktura buněčné stěny je spleená dohromady pomocí pektinu a ligninu. Ve srovnání s živočišnými buňkami mají rostlinné buňky buněčnou stěnu, která odpovídá za mechanickou stabilitu. V závislosti na vývojové fázi se rostlinná buněčná stěna skládá z jedné nebo několika vrstev s různou tloušťkou a chemickou strukturou (obr. 1). (Cosgrove, 2005; Schopfer, 2001)



Obr. 1 Buněčná stěna (Cosgrove, 2005; Schopfer, 2001)

O rychlosti pohybu rozhoduje, jak již zmíněno, gradient tlaku, který se vytvoří v tekutině v pórech. Pro pohyb tekutiny pórovitým materiálem, jehož póry jsou zcela vyplněny tekutinou, je uplatněn Darcyho zákon, rov. 4.

$$v_x = -K \frac{dp}{dx} \quad (4)$$

Kde  $V_x$  ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) je rychlost proudění tekutiny do směru  $x$  vzhledem k fázi pevné, vztažená na celý průřez materiálu, tj. včetně průřezu vyplněného částicemi pevné fáze,  $dp/dx$  je výše zmíněný gradient tlaku ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ve směru  $x$  a  $K$  je konstanta nazývaná koeficient filtrace ( $\text{m}^3\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). Koeficient  $K$  je základním parametrem pro hodnocení procesu filtrace. Stanovuje se pro dané podmínky měření. Jde o vyvolání definovaného gradientu tlaku ve filtrované tekutině a stanovení množství propuštěné tekutiny.

Z představ o kapilární struktuře porézního materiálu lze odvodit vztah pro koeficient filtrace, tzv. Kozenyovu – Karmanovu rovnici, rov. 5.

$$K = \frac{n_p^3}{1-n_p^2} \cdot \frac{1}{k \cdot S_0^2 \cdot \eta \cdot \rho_p^2} \quad (5)$$

Kde  $n_p$  je pórovitost daného materiálu (předpokládají se póry vyplněné tekutinou),  $S_0$  je měrný vnitřní povrch materiálu ( $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ), dynamická viskozita ( $\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a  $\rho$  hustota strukturních prvků materiálu a  $k$  Karmanova konstanta (-).

Přínos spočívá především v možnosti odhadu velikosti koeficientu filtrace u materiálů, u nichž je známa pórovitost a měrný vnitřní povrch. Při nízkých hodnotách pórovitosti materiálu ( $n_p$  je menší než 0,3) lze faktor  $\frac{n_p^3}{1-n_p^2}$  v rovnici vyjádřit funkcí

$$\frac{n_p^3}{1-n_p^2} \cong n_p^3 \quad (6)$$

To znamená, že za předpokladu stálé hodnoty měrného vnitřního povrchu materiálu a stálé hodnoty Karmanovy konstanty, koeficient filtrace materiálu klesá v oblasti nízkých hodnot pórovitosti a třetí mocninou pórovitosti materiálu. (Storchine, 2000)

### 3.2.7 Pasivní transport

Je přenos látek přes buněčnou membránu, který probíhá samovolně prostřednictvím kanálů a přenašečových proteinů. Na rozdíl od aktivního transportu tento děj nespotřebává žádnou chemickou energii (ATP).



Pasivní transport závisí na propustnosti buněčné membrány, která závisí na uspořádání dvojité vrstvy fosfolipidů a vmezeřených bílkovin. (Švíglerová, 2009). Základními typy pasivního transportu jsou prostá difuze, usnadněná difuze a osmóza. Při usnadněné difuzi musí látky na rozdíl od prosté difuze použít přenašeče či kanály.

### Difuze

Difuze nastává z důvodu neuspořádaného tepelného pohybu částic. Pohyb částic je v zásadě náhodný, ale látky mají tendenci přecházet z prostředí o vyšší koncentraci do prostředí s nižší koncentrací. (Slavíková, Švíglerová, 2012). Přírozenou vlastností látek je, že pokud se její částice mohou pohybovat, tak se rozptylují do celého prostoru a postupně ve všech jeho částech vyrovnají koncentraci. Říkáme, že látky difundují. Během difuze se nepotřebává energie.

### Osmóza

Osmóza je typ pasivního transportu, při kterém přestupuje rozpouštědlo (nejčastěji voda) přes polopropustnou membránu z prostoru s méně koncentrovaným roztokem do prostoru s více koncentrovaným roztokem. Polopropustná membrána je v tomto případě propustná pro rozpouštědlo a méně propustná nebo nepropustná pro rozpuštěné látky. Je-li polopropustná membrána alespoň částečně propustná pro rozpuštěné látky, může voda přestupující přes membránu strhávat s sebou i molekuly, rozpuštěné látky – viz tah rozpouštědla.

Velikost osmózy je dána rozdílem osmotických tlaků na obou stranách polopropustné membrány. Osmóza je vlastně specifickým příkladem difúze – molekuly rozpouštědla difundují po svém koncentračním gradientu. (Navrátil, 2005)

### Osmotický tlak

Koncentrací rozpuštěné látky v okolní kapalině je ovlivněn osmotický potenciál a tlak turgoru (Turgor – latinsky opuchlost, nadutost, termín je používán v biologických vědách k popisu vnitřního tlaku pletiv a tkání). Tento tlak je výsledkem součtu napětí a tlaků jednotlivých buněk, ze kterých je tato tkáň/pletivo složena. Rostlinám dává turgor jejich pevnost a tuhost. Např. v zvadlé rostlině chybí.

Vodní potenciál souvisí s relativní vlhkostí okolního vzduchu. Stav vody v buňkách lze regulovat zmrazením. Během tvorby ledu při teplotách pod bodem mrazu ovlivňují osmotické procesy jak kvalitu zmrazení potravin, tak přežití živých buněk, viz. rov. 7.

$$\pi = c \cdot R \cdot T \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

Kde  $c$  je molární koncentrace,  $R$  – je molární plynová konstanta a  $T$  – je absolutní teplota.

Když se v roztoku tvoří led, pouze část vody se stává ledem, zatímco zbývající nezmrzlá frakce obsahuje vodu a všechny rozpuštěné látky. Soluty (rozpuštěné látky) jsou koncentráty v nezmrazené frakci, protože tvorba ledových krystalů je vylučuje. Procento vody, které se stane ledem, je vyšší při nižších teplotách a toto procento může být určeno rovnovážným fázovým diagramem pro konkrétní roztok (Franks, 1982).

Čím více je roztok koncentrován, tím nižší je bod tuhnutí, rovněž čím nižší je teplota, tím koncentrovanější je nezamrzlá frakce roztoku (rov. 8).

$$c = \frac{-T}{1,86} \quad (8)$$

Pokud jsou splněny určité podmínky, buňka ponořená do zmrazeného roztoku reaguje na prostředí těchto změn. Například rov. 11 jsou platné pouze tehdy, pokud roztok obsahuje nukleační činidla, tj. nečistoty, které působí jako místa pro zahájení růstu ledových krystalů. Většina vody v přírodním prostředí obsahuje nukleační činidla, a proto je tvorba ledu při nebo blízko 0 °C běžná.

Roztok uvnitř buněk však neobsahuje nukleační činidla. V důsledku toho mohou být buňky suspendované v olejovém médiu nebo v roztoku bez ledu chlazeny až na -40 °C bez zmrazení (nezmrzne). Nezmrzlá buňka nebo roztok s koncentrací solutu, ochlazené na teplotu pod teplotou danou rovnicí je super-chlazené. (Strochine, 2000)

Při teplotách pod bodem mrazu se mimo buňku tvoří led. Ve zmrazené frakci mimo buňku je vysoká koncentrace nemražených solutů a uvnitř buňky je relativně nízká koncentrace solutů, kde nedochází k tvorbě ledu. Proto vodní potenciál uvnitř buněk překračuje potenciál mimo buňku a v průběhu času dojde k exosmóze (odtok vody), dokud vnitřní a vnější roztoky nejsou v rovnováze.

Rozsah této dehydratace vyvolané mrazem lze předpovědět pomocí Boyle-Van't Hoffovo pravidla, ve kterém se předpokládá, že tlak v buňce je nulový a v buňce není led, rov. 9.

$$\frac{V}{V_0} = b + \frac{(1-b) \cdot c_1}{c} \quad (9)$$

Kde  $V$  je objem buněk,  $V_0$  je počáteční objem,  $c_i$  je počáteční koncentrace solutů (osmotická koncentrace)  $b$  je konstanta.

U zmrazených přírodnin je hydratace indukovaná zmrazením nežádoucí, protože volná extracelulární tekutina bude vytékat z produktu, když je rozmrazena, buňky budou měkké a nebudou zatažené. Aby se tomu zabránilo, potraviny se zmrazují rychlým ochlazením – tak rychle, jak je to možné. Omezuje čas, který je k dispozici pro exosmózu, což způsobuje, že je buňka značně podchlazena.

Vysoce podchlazená buňka v přítomnosti vnějšího ledu bude mít tendenci podléhat intracelulární tvorbě ledu, která potom vylučuje exosmózu, protože nezmrzlá frakce uvnitř buňky bude mít stejnou koncentraci rozpuštěné látky jako vnější buňka.

Strategie zmrazování potravin je v kontrastu se strategií zmrazování živých buněk. Suspenze životaschopných buněk při nízké teplotě se nazývá kryokonzervace. (Strochine, 2000)

### 3.2.8 Latentní teplo

Při okolních teplotách je přenos tepla do zemědělských materiálů a potravinářských výrobků nebo z nich zpravidla doprovázen měřitelnou změnou teploty. Protože tyto změny mohou být „snímány“ dotykem nebo měřeny teploměrem, nazývají se páry. Změna z jedné fáze do druhé je doprovázena přenosem tepelné energie bez doprovodné změny teploty.

Latentní teplo je teplo, které se vyměňuje během změny fáze. Při atmosférickém tlaku, když se voda mění z kapaliny na pevnou látku – pevná (0°C) 355 kJ·kg<sup>-1</sup>, do páry 2257 kJ·kg<sup>-1</sup>, 90 kJ·kg<sup>-1</sup> z pokojové teploty na 0 °C a až 4x tolik na mrazení. (Strochine, 2000).

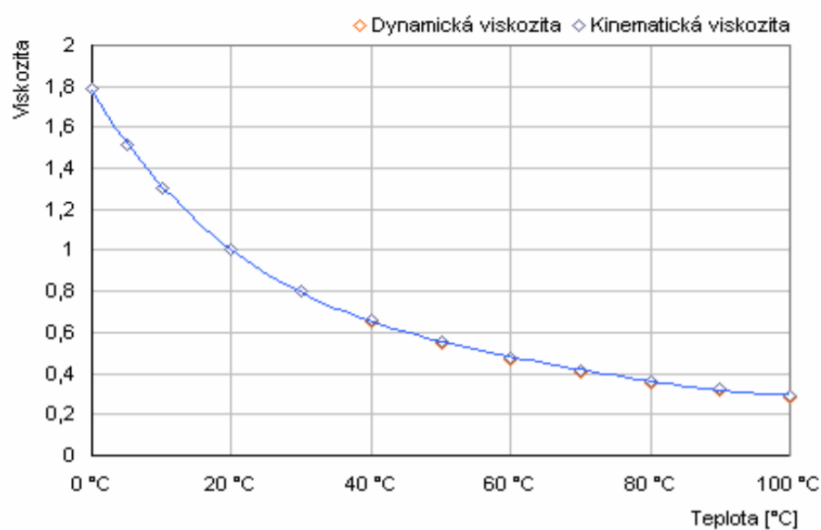
### 3.2.9 Viskozita

Základní parametr charakterizující tokové chování kapalin a polotekutých potravin je viskozita. Viskozita je zásadním parametrem a mírou odporu kapaliny vůči pohybu (tečení) při působení smykového napětí. Podle tokového chování 14 (závislosti napětí-deformace) je možno potraviny rozdělit na newtonské a nnewtonovské. Tokové chování materiálů může (např. při jeho zpracování) vykazovat výraznou variabilitu.

To je důsledkem faktu, že jeho konzistence může být velmi výrazně ovlivněna mícháním, ohřevem, chlazením, směřováním, aerací, homogenizací, krystalizací atd. (Severa, 2008).

Reologické chování tekutých materiálů hraje důležitou roli v řadě technologických operací. Znalost základních reologických veličin, viskozity, meze toku a modulů pružnosti je potřebná nejen k charakterizování surovin, event. produktů, ale i k řešení mnoha technických úloh a inženýrských výpočtů při navrhování, zdokonalování a kontrole různých výrobních a dopravních zařízení. Matematickým vyjádřením tokových vlastností kapalin jsou reologické stavové rovnice, které zpravidla vyjadřují vztah mezi deformačním smykovým (tečným, vazkým) napětím  $\tau$  a deformací kapaliny. Jejich grafickou podobou jsou tokové křivky. (Pirkl, 2005)

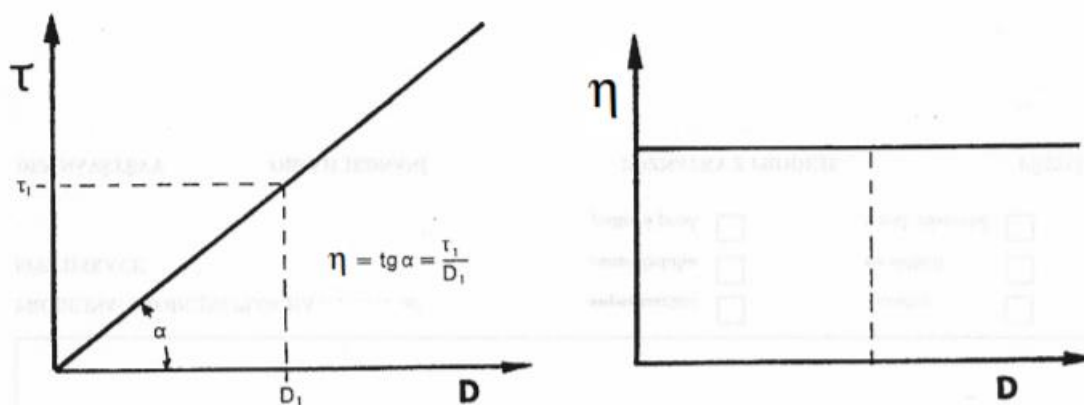
Dynamická a kinematická viskozita, viz. obr. č. 2, závisí na teplotě a tlaku. U tekutin se při stálém tlaku snižuje s rostoucí teplotou, protože se snižují přitažlivé síly mezi molekulami tekutiny.



Obr. 2 Dynamická a kinematická viskozita – závislost na teplotě (Pirkl, 2005)

Dynamická viskozita je látkovou charakteristikou, jejíž hodnota závisí na teplotě a tlaku. U plynů s teplotou roste, u kapalin naopak klesá. V soustavě SI je jednotkou pascal sekunda ( $\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}$ ). Dříve se udávala dynamická viskozita nejčastěji v poisech (P) nebo centipoisech [cP]. Platí  $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P}$ . Převratná hodnota dynamické viskozity  $\phi = 1/\eta$  se nazývá fluidita (tekutost). Podíl dynamické viskozity  $\eta$  a hustoty tekutiny  $\rho$  se nazývá kinematická viskozita  $\nu = \eta / \rho [\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$ . Starší jednotkou je stok ( $\text{St} = \text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ), platí  $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ . (Holubová, 2014)

Kinematickou viskozitu je výhodné užívat při popisu dějů závisících jak na viskozitě, tak na hustotě, např. při popisu hydrodynamiky kapalin. Tekutiny řídící se Newtonovým zákonem se označují jako newtonské a jsou to zpravidla nízkomolekulární látky. Viskozita těchto tekutin nezávisí na vazkém napětí a jejich toková křivka je znázorněna na obr. č. 3. Platí  $\eta = \text{tg } \alpha$



Obr. 3 Toková a viskozitní křivka newtonovské kapaliny (Pirkl, 2005)

Znalosti základů viskozity jsou nutné pro pochopení způsobu tvorby mazací vrstvy. Každá kapalina, ať už je to olej nebo voda, ať má jakékoliv složení či polaritu, vykazuje určité tření a tím i ztráty energie při jejím toku. Vnitřní odpory kapalin, specifické co do vlastností pro každou kapalinu, způsobené relativním posuvem olejových částic po sobě. Viskozita pochází z odporu, který má svoji příčinu v nedostatku hladkosti částic kapaliny. (Kovář, 1990)

Obecně platí: čím větší viskozita oleje, tím je větší únosnost mazacího filmu, ovšem pak rostou energetické ztráty vynaložené na tření ve viskózním oleji.

Tento vztah se nazývá Hagenův-Poiseuillův zákon, z něhož vyplývá, že pro zadaný objem kapaliny roste velikost přetlaku s viskozitou. (BUCHAR, 1990). U newtonovských kapalin, za které oleje v našem případě mohou být považovány, viskozita klesá se zvyšující se teplotou.

### Newtonské kapaliny

V případě ideálně viskozního materiálu platí pro tečné napětí klasický Newtonův zákon, rov. 10.

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad (10)$$

Kde součinitel  $\eta$  je dynamická viskozita charakterizující vnitřní tření newtonské kapaliny, to je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o  $dx$  a  $D$  je tzv. gradient rychlosti (rychlost deformace, rychlost smyku), který charakterizuje tvarové změny v proudící tekutině. (Pirkl 2005)

### Nenewtonské kapaliny

Vedle newtonských kapalin existují i kapaliny reologicky složitější, které se Newtonovým zákonem neřídí. Označují se proto jako nenewtonské kapaliny a jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, suspenze, různé pasty apod. Platí pro ně analogicky s Newtonovým zákonem rovnice

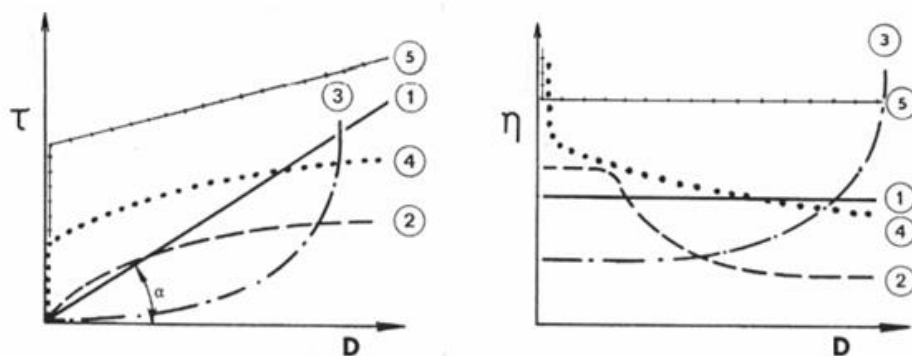
$$\tau = \eta \cdot D \quad (11)$$

Kde  $\eta$  je ovšem tzv. zdánlivá viskozita, která není látkovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace nebo tečném napětí.

K charakterizaci toku nenewtonských kapalin je proto nutno znát průběh závislosti  $\eta = \eta(D)$  v širším intervalu  $D$ . Základní typy nenewtonských kapalin jsou:

#### a) Pseudoplastické kapaliny

Jejichž zdánlivá viskozita se s rostoucím gradientem rychlosti zmenšuje. Pseudoplastické kapaliny a strukturně viskozní kapaliny, u nichž lze stanovit dvě limitní hodnoty zdánlivé viskozity (obr. 4). Jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, roztoky mýdel a detergentů, některé suspenze apod.



Obr. 4 Tokové a viskozitní charakteristiky nenewtonovských kapalin (Pirkl, 2005)

Obr. 4. Tokové a viskozitní charakteristiky některých nenewtonovských kapalin 1- newtonská kapalina 2- strukturně viskózní kapalina 3- dilatantní kapalina 4- plastická kapalina (pseudoplastická s mezí toku) 5- binghamská kapalina hodnoty zdánlivé viskozity. Jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, roztoky mýdel a detergentů, některé suspenze apod.

Z technického hlediska je pseudoplasticita obr. 4. Toková a viskozitní křivka strukturně viskózní kapaliny zpravidla vítanou vlastností, poněvadž snižuje energetickou náročnost při míchání, toku kapalin potrubím apod.

#### b) Dilatantní kapaliny,

jejichž zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti. Toto chování je poměrně řídké a bylo pozorováno v některých vysoce koncentrovaných suspenzích (např. v PVC plastisolech). Poněvadž zpravidla komplikuje technologické procesy, je žádoucí dilataci pokud možno potlačit změnou složení.

K vyjádření průběhu tokových křivek uvedených nenewtonovských kapalin se užívají rovnice empirické nebo poloempirické povahy, např. typu  $D = K \tau^n$  pro pseudoplasticitu  $n < 1$  pro dilataci kde  $K, n$  jsou empirické látkové parametry charakterizující vlastnosti toku nenewtonovské kapaliny a závisejí pouze na teplotě. Parametr  $K$  se nazývá součinitel (koeficient) konzistence a parametr  $n$  je index (nebo exponent) toku.  $\eta$

#### c) Binghamské kapaliny

jsou kapaliny s plastickou složkou deformace, u nichž dochází k toku až po překročení určitého prahového smykového napětí, tzv. meze toku (kluzu)  $\tau_k$  (viz obr. 4). Pro tyto plastické kapaliny platí  $\tau - \tau_k = \eta_0 \cdot D$ . Patří sem např. koncentrované průmyslové a odpadní (spláskové) kaly, kašovitě suspenze křídly a vápna aj.

Nejvyšších hodnot nabývá viskozita při počáteční teplotě 19 °C. Nejintenzivnější pokles viskozity probíhal do teploty 40 °C, o 50 % počáteční hodnoty viskozity na hodnotu 53 MPa.s<sup>-1</sup>. Při dalším zvyšování teploty nebyl pokles viskozity tak intenzivní. Po dosažení koncové teploty 82 °C byla naměřena hodnota viskozity 33 mPa.s<sup>-1</sup>. (Pirkl, 2015)



### 3.2.10 Koeficient filtrace

Přínos spočívá především v možnosti odhadu velikosti koeficientu filtrace u materiálů, u nichž je známa pórovitost a měrný vnitřní povrch. Při nízkých hodnotách pórovitosti materiálu ( $n_p$  je menší než 0,3) lze faktor  $\frac{n_p^3}{1-n_p^2}$  v rovnici vyjádřit funkcí

$$\frac{n_p^3}{1-n_p^2} \cong n_p^3 \quad (12)$$

To znamená, že za předpokladu stálé hodnoty měrného vnitřního povrchu materiálu a stálé hodnoty Karmanovy konstanty, koeficient filtrace materiálu klesá v oblasti nízkých hodnot pórovitosti a třetí mocninou pórovitosti materiálu. (Storchine, 2015)

### 3.2.11 Tlak a propustnost

Úroveň tlaku by se měla přizpůsobit výtěžnosti oleje. Obecně lze říci, že vyšší tlak znamená více zpracovaného oleje. Propustnost udává množství materiálu zpracovaného za jednotku času ( $\text{kg}\cdot\text{hod}^{-1}$ ). Při vyšší propustnosti se dosahuje nižší výtěžnosti oleje z 1 kg semen z důvodu kratší doby lisování. Nižší propustnost často znamená vysokou výtěžnost oleje. Propustnost se nastavuje změnami otáček šroubovice. Propustnost lze využít k odůvodnění výtěžnosti oleje a jde o důležitý ukazatel průmyslového zpracování olejů.

### 3.2.12 Energetická spotřeba – lisy

Spotřeba energie pravděpodobně souvisí s tlakem uvnitř lisovací hlavy. Kromě toho množství potřebné energie je závislé na viskozitě lisovaného materiálu a na otáčkách. K lisování semen olejnin stejně jako k dalším výrobním procesům je nutná výstupní energie. Malé lisy, např. Bielenbergův, lze pohánět ručně za pomoci jedné či dvou osob. Výkonnost je zpravidla 3-5 kg semen /hod s produkcí 1 litr oleje. Spotřeba energie v tomto případě je  $0,85 \text{ kWh}\cdot\text{litr}^{-1}$ . Obvykle 1 – 2 % energie obsažené ve zpracovaném oleji se používá pro zajištění vstupního napájení. Je-li poháněn vznětovým motorem, pak je zapotřebí 5 – 10% energie ze zpracovaného oleje pro zajištění vstupní energie (Jongh a kol. 2008). Navíc produkce kvalitnějších olejů snižuje výkon expelerů až o  $100 - 200 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  nebo  $0,30 \text{ kWh}\cdot\text{l}^{-1}$

### 3.2.13 Manipulace a skladování

Správná manipulace s olejinami během sklizně a po ní je důležitá z hlediska jejich další přeměny na kvalitní výrobky. Poškozená či nalomená semena obsahují vysoký podíl volných mastných kyselin a snižují tak kvalitu oleje. Proto je důležité, aby manipulace se semeny probíhala opatrně. Podíl vlhkosti v olejinách v době jejich sklizně je zpravidla vysoký a není vhodný pro jejich bezprostřední skladování. Například podíl vlhkosti u čerstvě sklizených semen slunečnice může dosahovat až 20 %. Pro zajištění bezpečného a vhodného skladování se semena musí sušit až na podíl vlhkosti ne vyšší než 10 %.

V případě řepky olejné s podílem vlhkosti ve výši 9-10 % je bezpečné skladování možné maximálně do 3 měsíců za vhodných podmínek. K delšímu skladování jsou vhodná semena obsahující méně než 9 % vlhkosti (Schuler a kol. 1980). Metoda sušení na slunci je nejrozšířenější tradiční metodou používanou v rozvojových zemích. Vyspělé země používají k sušení semen elektrické sušičky. Suší většinou při teplotě 105 – 110 °C. Způsob a účinnost sušení ovlivňuje výslednou kvalitu oleje. Neúplné sušení podporuje mikrobiální aktivitu a může produkovat znehodnotit. Mikrobiální aktivita zvyšuje podíl rozpustných pigmentů a volných mastných kyselin v extrahovaných olejích (Salunkhe a kol. 1992).

#### Skladování

Nejdůležitějším faktorem pro správné skladování olejin je podíl vlhkosti. Vlhkost se udržuje v semenech přírodní cestou nebo chemicky. Změny podílu vlhkosti, popř. další kapilární porézní koloidní přípravky mohou ovlivňovat kvalitu.

Kritický podíl vlhkosti během skladování pro slunečnici je 8,5 %, pro podzemnici olejnou je 9,0 %, len je 10,5 % a pro sóju je 13,0 %. Vyšší vlhkost a relativní vlhkost skladovacích podmínek příznivě ovlivňuje činnost lipolytických enzymů a ty následně zvyšují podíl nemastných kyselin v olejích. (Robertson 1975). (Sastry a kol. 1969). (Pant 2010).

### 3.2.14 Bod olejnatosti

Bod olejnatosti je stupněm stlačení, jenž se nachází těsně před vytečením oleje z pevných stlačených částic (Sukumaran a Singh, 1989). Bod olejnatosti teoreticky vychází z hustoty jader olejnin (Faborode a Favier 1996). Materiál, který se stlačuje, se skládá z pevných látek olejových částic. Olej, uvolněný z pevných látek, vytéká na povrch semen a vyplňuje dutiny mezi částicemi (Sukumaran a Singh 1989). Výtěžnost oleje je pravděpodobně závislá na tlaku na materiál, převyšující tlak nutný pro dosažení bodu oleje. Sukuraman a Singh (1989) zjistili, že buněčné stěny nejsou při dosažení bodu olejnatosti porušeny, a proto se k vytečení oleje nepotřebuje roztržení buněčných stěn.

Olej může opustit buňku plasmodesmaty (póry) v buněčných stěnách (Faborode a Favier 1996). Bod olejnatosti je závislý na rychlosti deformace v  $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$  (převádí rychlost do šroubu v případě expeleru) a na vlhkosti. Zkoušky lisování, provedené Sukuramanem a Singh (1989) s použitím podávacího pístu ukázaly, že tlak stoupá se zvyšující se vlhkostí a se zvýšenou deformací. Nejvýraznější účinky způsobuje vlhkost. S využitím stejného principu u expelerů lze očekávat, že bod olejnatosti se u materiálu zvyšuje při vyšší hladině vlhkosti a rychlosti šneku. Snížením velikosti a teploty lze dosáhnout zvýšení stlačitelnosti semen a snížit tak bod olejnatosti (Faborode a Favier 1996, Beerens 2007).

### 3.2.15 Způsoby extrahování oleje z olejnatých plodin

Extrahování oleje je jedním z hlavních procesů při zpracovávání olejnin. Proces extrahování oleje, se provádí tak, aby získaný olej měl vysokou kvalitu a minimum nežádoucích složek, aby byla dosažena vysoká výtěžnost extrahování a vyrobený produkt měl vysokou výživovou hodnotu.

V rozvojových zemích se extrahování provádí většinou tradiční metodou (lisováním). Extrahování pomocí rozpouštědel, metoda vodní enzymatické extrakce oleje (AEOE) a metoda super-kritické fluidní extrakce (SFE) se běžně používají ve vyspělých zemích. Způsob zpracování je tedy závislý na úrovni industrializace země. Dále jsou uvedeny tradiční a moderní způsoby získávání oleje ze semen olejnatých plodin.

### Vřetenové lisy

Běžně navrhované vřetenové lisy se liší především geometrií vřeten, výstupy oleje a omezením vedlejších produktů a dalšími parametry ovlivňujícími vřetenové lisování (Beerens 2007)

### Filtrační lis

U tohoto typu lisu se vřetenový šroub otáčí v koši z tvrzených ocelových tyčí připomínajících cedník. Mezery mezi ocelovými tyčemi umožňují vypouštění oleje při zvyšování tlaku působícího na vstupní suroviny. Mezery v mřížce umožňují nastavit potřebnou průchodnost oleje. Díky nastavitelnosti lze přizpůsobovat tlak v závislosti na použitých vstupních surovinách. Vřetenový lis umožňuje posunutí podstatně většího objemu ze vstupní na výstupní části (Beerens, 2007). Výsledkem je zvyšující se tlak, který pohání olej přes filtr (Khan a Hanna, 1983). Pro dosažení větší flexibility jsou často dostupné různé typy šroubů nebo jsou jejich části výměnné. Odpad je vytlačen přes nastavitelný sytič. Mezery sytiče musí být přizpůsobeny síle tlaku, tvaru a obsahu oleje ve vytlačované hmotě. U menších strojů se k nastavení sytiče používá ruční kolečko na opačném konci šroubu (Khan a Hanna, 1983). Filtrační lisy se dodávají o výkonnosti 15 až 2000 kg · hod<sup>-1</sup>. (Ferchau 2000).

### Válcový lis

Pomocí tohoto typu lisu se olej vytlačuje přes otvory vyvrtanými na cylindrických válcích. Zvyšující se tlak pohání lisovanou hmotu ke kruhové trysce na konci válce. Aby se předešlo případnému zablokování lisu, oblast kolem trysky (hlava lisu) se zpravidla před zpracováním předeřeje, čímž se sníží viskozita lisované hmoty. Úroveň tlaku při lisování je závislá na průměru trysky, tvaru šroubu a na samotných semenech. Tlak se zvyšuje podle zmenšení velikosti trysky. Malá tryska může přivodit řadu negativních následků. Za prvé, u menších průměrů trysky dochází ke snižování propustnosti semen. Za druhé, v důsledku zvyšování odporu se zvyšuje teplota uvnitř lisu. Toto může způsobit, že teplota oleje překročí prahovou hodnotu nebo dojde k rychlejšímu opotřebení zařízení. Za třetí, podíl pevných složek je vyšší u odstředěných olejů při vyšším tlaku (Ferchau, 2000). A nakonec se možnost zablokování stuje zvyšuje se zmenšením průměru trysky. Přizpůsobení je možné u filtrů pracujících na principu vřetenových lisů.

### Ostatní modely

Objevilo se několik dalších variant vřetenových lisů, kromě běžných expelerů (Bereens, 2007). Jednou z takových variant je dvouvřetenový extrudér, který udával velmi vysokou výtěžnost u vyloupaných semen ve srovnání s běžnými typy jednovřetenových lisů (Dufaure a kol. 1999).

Další variantou je vstřikování rozpouštědla do extruderu (Foidla, 2007).

### **3.3 Matematické modely popisující mechanické chování semen olejnin**

Většina návrhů či výzkumných prací v oblasti zpracovávání potravin vychází z různých matematických modelů popisujících průběhy těchto procesů. To vyžaduje dostatečné znalosti proměnných ovlivňujících tento proces a také jejich číselné vyjádření většinou stanovené z experimentálních měření. V zásadě existují dva druhy matematických modelů: empirické modely a teoretické modely (Bargale 1997).

#### **3.3.1 Empirické metody**

Empirické modely vycházejí z výsledků několika experimentálních procesů, kde se vstupní veličiny mění a výstupní proměnné korelují statisticky nebo jinak podle výstupů. V publikacích lze najít řadu empirických modelů mechanické extrakce olejů z olejnin. Jde například o studie prováděné Kooem (1942) a Bargalem (1997) na příkladu sedmi různých olejnatých plodin: sóji, bavlníku, řepky olejné, podzemnice olejnaté, tungových ořechů, sezamu a skočce obecného s využitím jednoduchého ručního hydraulického lisu schopného generovat tlak až 34,5 MPa při sledování čtyř různých faktorů: podílu vlhkosti, teploty, tlaku a doby lisování. Podobnou studii provedly Khan a Hanna (1984) na předpřipravených vzorcích drtě sóji, které zkoumali z hlediska vlivu různých provozních proměnných, včetně teploty, podílu vlhkosti, tlaku a doby lisování. Z těchto výsledků podle Bargaleho (1997) vyplývá, že výtěžnost oleje je přímo úměrná odmocnině tlaku a nepřímo úměrná odmocnině kinematické viskozity, která je funkcí teploty. Bylo také zjištěno, že doba lisování má menší vliv na výtěžnost oleje.

#### **3.3.2 Teoretické modely**

Teoretické modely vycházejí z rovnic základních zákonů příslušných fyzikálních procesů, jejichž platnost je podpořena experimentem. Aplikace těchto modelů vyžaduje identifikaci fyzikálních procesů, porozumění jejich mechanismům a následné použití takových základních zákonů, které s největší pravděpodobností zkoumané procesy simulují. Proces mechanického lisování oleje ze semen olejnin byl úspěšně popsán v matematickém modelu založeném na třech základních rovnicích: Hagen Poiseulleho rovnici kapilárních toků určujících tok olejů přes póry buněčných stěn, Darcyho zákonu průtoku kapalin přes porézní látky určující průtok oleje dutinami uvnitř semen a modifikované formě Terzaghiho rovnice (Mrema a McNulty 1985).

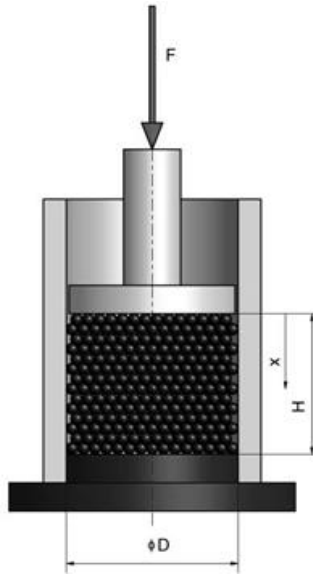
### 3.3.3 Lineární lisování semen – křivka tangens

Jeden z hlavních faktorů ovlivňujících energetickou náročnost získávání rostlinného oleje je velikost lisovací síly. Vhodným nastavením velikosti lisovací síly můžeme získat optimální množství oleje v poměru k minimální vstupní energii. Správné nastavení velikosti lisovací síly umožňuje hospodárnější využití lisovacího stroje a tím i jeho zařazení do technologické linky. Velikost lisovací síly, respektive velikost vznikajícího tlakového napětí v semeni, je velmi důležitý údaj, který ovlivňuje velikost poměru vstupní energie ku výstupní energii.

Velikost lisovací síly také může při určitých podmínkách nepřímo ovlivnit výstupní kvalitu oleje. Při vyšší lisovací rychlosti a síle může dojít vlivem vnitřního tření semen k zahřátí směsi a tím k tepelnému ovlivnění získaného oleje. U nenasycených mastných kyselin dochází při teplotě nad  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  k chemickým změnám, které mají za následek, z důvodu přerušování dvojitých vazeb, porušení vnitřní struktury oleje. Stanovení modulu pružnosti v tlaku semen olejnatých rostlin je důležité pro správné určení tuhosti a tvrdosti semen (Herák a kol. 2011).

Znalost mechanického chování olejnin je důležitá pro správný návrh matematického modelu (Karaj a Muller, 2010). V současné době je znám model mechanického chování pomocí křivky tangens (Herák a kol., 2010), která byla navržena pomocí programu MathCAD 14 za použití algoritmu Levenberg – Marquardt. Model byl experimentálně ověřen na semenech olejnin, např. Jatropha, slunečnice, řepka, hrášek a fazole (Herák a kol., 2011). V článcích bylo popsáno mechanické chování a deformační křivky. Křivku tangens, jako matematický model, lze použít u volně ložených semen olejnin, které jsou umístěny v lisovací nádobě. Vliv na výslednou křivku má vlhkost semen, pórovitost, tření mezi jednotlivými semeny a tření semen o lisovací nádobu (Herák a kol., 2010; Kabutey a kol., 2011).

Popis mechanického chování a deformačních charakteristik olejnatých semen při lineárním zatížení (obr. 5), kde  $F$  je síla,  $D$  je průměr lisovací nádoby,  $H$  je výška směsi semen a  $x$  značí deformaci (Herák a kol., 2011)



Obr. 5 Schéma lineárního lisování, Herák a kol., 2011

Experimentální závislost mezi silou a deformační charakteristikou je popsána rovnicí, rov. 13.:

$$F(x) = f(x) \quad (13)$$

Kde  $F$  je síla (N),  $x$  je deformace semen (mm) a jsou funkcí síly a deformace.

Stanovené závislosti velikosti lisovací síly na velikosti deformaci semene můžeme matematicky vyjádřit pomocí rovnice s koeficienty (rov. č. 14)  $A$ ,  $B$ .  $A$  jako koeficient síly (N),  $B$  jako koeficient deformace ( $\text{mm}^{-1}$ ) a  $n$  je exponent (-), viz. rov. č. 16. (Herák a kol., 2011)

$$F(x) = A \cdot [\tan(B \cdot x)]^n \quad (14)$$

Software MathCAD 14 s algoritmem Levenberg – Marquardt poskytuje velmi jednoduchý matematický algoritmus pro tvorbu matematického modelu kopírující křivku tangens. Software MathCAD nevyžaduje, na rozdíl od simulačních programů, např. metody konečných prvků vysokou kapacitu paměti počítače (Petrů a kol., 2012).

Matematický model tangenciální křivky splňuje mezní podmínky lineárního experimentu: Když se tlaková síla zvýší na nekonečno, deformace dosáhne maximálního limitu, nulová tlaková síla znamená nulovou deformaci a nedílnou součástí funkce tangenciální křivky je energie (Herák a kol. 2010).



Deformaci (mm) lze popsat také matematicky, jak je znázorněno v (rov. 15) (Herák a kol., 2012).

$$x = \frac{1}{B} \arctan \left( \sqrt[n]{\frac{F(x)}{A}} \right) \quad (15)$$

Když se síla blíží k nekonečnu (rov. 18), pak se limitní deformace,  $\delta$  (mm) (rov. 16), která je závislá na výšce (množství) semen  $H$  (mm), vyjádří deformačním koeficientem (Herák a kol., 2013).

$$\delta = \lim_{F(x) \rightarrow \infty} x = \frac{\pi}{2 \cdot B} \quad (16)$$

vztah mezi koeficientem tlakové síly  $G$  (N) a deformačním koeficientem mechanického chování,  $B$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) může být vyjádřen tak, jak je uvedeno v (rov. 17).

$$G = B \cdot H \quad (17)$$

Nahrazením  $B$  od (rov. 19) do (rov. 20) lze mezní deformaci (rov. 18) také vyjádřit jako poměr mezi koeficientem tlakové síly a počáteční výškou semen.

$$\delta = \frac{\pi \cdot H}{2 \cdot G} \quad (18)$$

kde  $H$  je výška, do které je nádoba naplněna semeny (mm), která ovlivňuje koeficient deformace mechanického chování,  $B$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) (Herák a kol., 2013). Za pomoci (rov.18) může být ideální metoda pro regresi pomocí Levenberg – Marquardtova algoritmu (Marquardt 1963) poskytující numerická řešení problému minimalizace odchylek v nelineárních funkcích ve vztahu k funkčním parametrům. Použití Levenberg-Marquardtova algoritmu pro stanovení koeficientů funkce tečné křivky pro přizpůsobení lineárních experimentálních dat s ohledem na závislost mezi silou a deformací. Nejdůležitější je, že proces Levenberg – Marquardt se používá v softwaru Mathcad 14 (MathCAD 14, PTC Software, Needham, MA, USA), (Pritchard 1998), který pracuje s funkcí „genfit“, a proto spolupracuje s algoritmem Levenberg-Marquardt pro vývoj matematického modelu tečné křivky.

Model tečné křivky naznačuje, že lineární experimentální data, to znamená závislost mezi silou a deformační křivkou, lze stanovit na základě průměru jedné nádoby a výšky (objemu) semen v nádobě. Z hlediska vztahu mezi silovými a deformačními charakteristickými křivkami ve vztahu k různým průměrům nádob a výškám, do kterých je nádoba naplněna semeny, vyžaduje model tečné křivky modifikaci.

Tato teorie byla potvrzena experimentem (Herák a kol., 2013; Kabutey a kol., 2013) na semenech *Jatropha curcas*. Na základě experimentálních výsledků získaných autory byla rovnice tečné křivky matematicky modifikována (rov. 19) jako:

$$F(x, D, H) = C \cdot D^2 \cdot \left[ \tan\left(G \cdot \frac{x}{H}\right) \right]^2 \quad (19)$$

Kde  $C$  je součinitel mechanického chování ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ),  $D$  je průměr nádoby (mm),  $G$  je koeficient tlakové síly (-) a  $H$  je výška, do které jsou v nádobě semena nasypána, (mm). Pomocí rov. 21, lze teoreticky popsat závislost mezi křivkami síly a deformace ve vztahu k průměru nádoby a výšce lisovaného objemu semen.

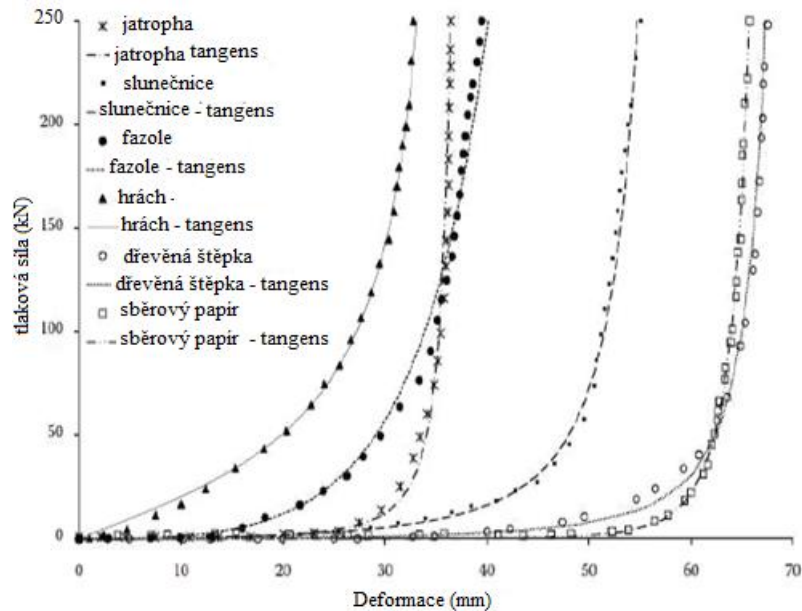
Je třeba zmínit koeficienty modelu tečné křivky (rovnice 2 a 7) v praktické i teoretické rovině. Zjištěné koeficienty modelu křivky tangens platné mezi hodnotami síly od 0 do 100 kN a nulovou deformací do maximální deformace, integrace modelů křivky tangens (na základě nulové deformace do maximální deformace a funkce křivky tangens představují energii (J). Příkladem je experiment na semenech *Jatropha curcas*, integrál ukázal energetické rovnice (rov. 20) a (rov. 21) pro jednotlivé průměry nádob.

$$\int A \cdot (\tan(B \cdot x))^2 dx = \frac{A \cdot (\tan(B \cdot x) - B \cdot x)}{B} \quad (20)$$

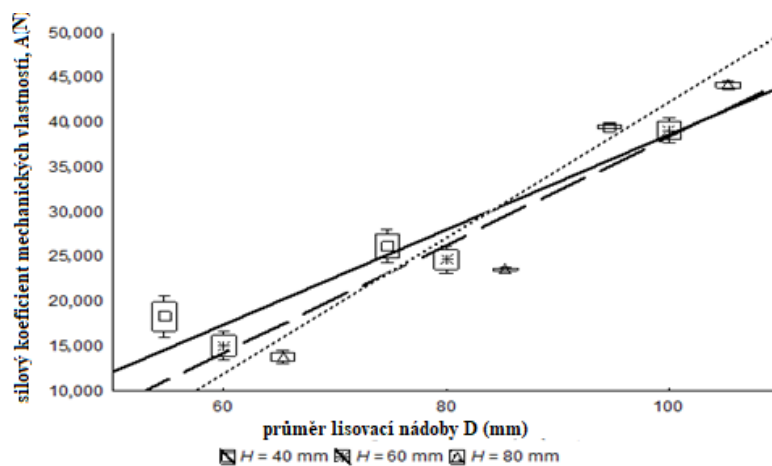
$$\int C \cdot D^2 \cdot \left( \tan\left(G \cdot \frac{x}{H}\right) \right)^2 dx = \frac{C \cdot D^2 \cdot H \cdot \left( \tan\left(\frac{G \cdot x}{H}\right) - \frac{G \cdot x}{H} \right)}{G} \quad (21)$$

Křivka funkce tangens popisuje experimentální data, která byla statisticky významná ( $p > 0,05$ ) s velmi vysokým korelačním koeficientem,  $R^2$  stanoveného pomocí softwaru MathCAD. Toto platí, pokud síla nabývá hodnoty 0 – 100 kN a platí pro nulovou až maximální deformaci. Koeficient síly  $A$  (N) ovlivňuje sklon deformačních křivek, koeficient deformace  $B$  (mm) ovlivňuje velikost deformace, tzn. poměr koeficientu síly a deformace ukazuje počáteční tuhost celého systému. Exponent funkce  $n$  (-) také určuje nejvhodnější hodnotu funkce tangens pro přizpůsobení závislosti síly a deformace. (Herák a kol., 2012). Lisování jako takové mohou ovlivnit odrůda, stadia zralosti semen a vlhkost (Kabutey a kol., 2011).

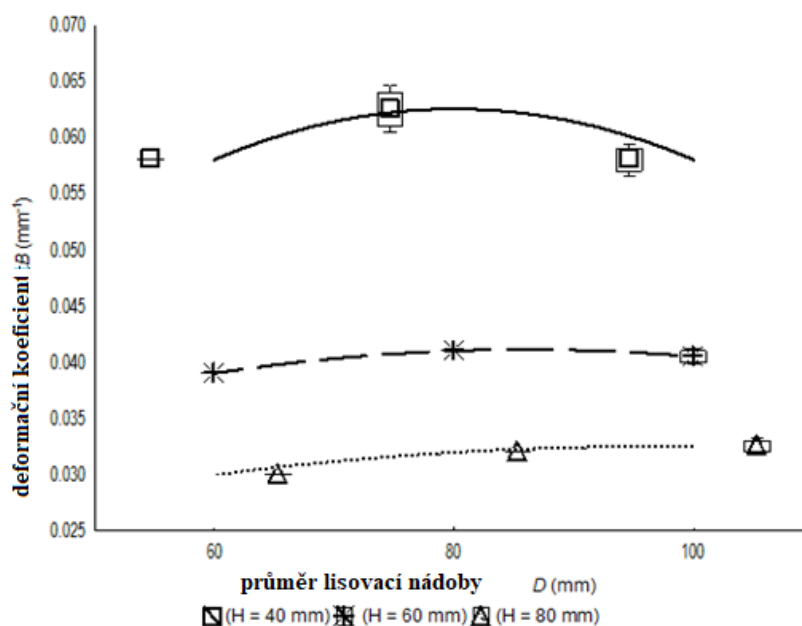
Koeficient tlakové síly a deformační koeficient mechanického chování versus průměr lisovací nádoby ve vztahu k objemovým olejovým palmovým jádrům byl popsán, jak je znázorněno na obr. 6, 7 a obr. 8 (Kabutey a kol., 2018).



Obr. 6 Lineární lisování, závislost síly a deformace, Herák a kol., 2011



Obr. 7 Koeficient tlakové síly, Kabutey a kol., 2018



Obr. 8 Deformační koeficient, Kabutey a kol. 2018

Průběh experimentu lineárního lisování semen olejnin ovlivňují, jak již zmíněno, obsah vlhkosti, pórovitost, odrůda a stupeň zralosti. (Kabutey a kol., 2011) uvedli, že zvýšení obsahu vlhkosti semen způsobilo změnu křivky deformace silou tím, že se ukázal tzv. „vlnový efekt“ (Kabutey a kol, 2011; Herák a kol., 2012a), který zvětšil deformaci semen (Grzegorz, 2007). Matematický model křivky funkce tangens, již diskutovaný v předchozích částech, ukazuje, že výše uvedené vlivy na deformaci byly konstantní, proto je nutné zkoumat jejich proměnlivý účinek na koeficienty křivky funkce tangens. Je známa reciproční transformace (RST) a metoda nejmenších čtverců (LSM), která byla aplikována na semena *jatropha curcas* (Herák a kol., 2014). Z hlediska simulačních modelů byla k popisu mechanického chování jenom semene *jatrophy* použita metoda konečných prvků (Petrů a kol., 2012).

### 3.3.4 Teorie reciproční transformace

Teorie reciproční transformace sklonu (RST) identifikuje dvě odlišné proměnné, nezávislé a závislé. (Blahovec 2011; Blaszak a Sergyeyev 2009; Blahovec a Yanniotis 2009). Aplikaci teorie na lineární lisování lze popsat jako deformaci volně ložených semen olejnin, kde deformace  $x$  (mm) je nezávislá proměnná a tlaková síla  $F$  (N) jako závislá proměnná. Transformace závislé proměnné však může vytvořit novou závislou  $[F]$ , která je definována rovnicí (rov. 22) jako:

$$[F] = \frac{x}{F} \quad (22)$$

Na základě rov.24 lze popis vztahu mezi tlakovou silou a deformací pomocí reciproční transformace sklonu použít ve formě dané rov. 23.

$$F = \frac{x}{[F]} \quad (23)$$

Bylo dokázáno, že vztah nové závislé RST a vhodné nezávislé lze zjednodušit pomocí metody nejmenších čtverců (Blahovec a Yanniotis, 2009; Blahovec, 2011). Závislost mezi tlakovou silou  $F$  (N) a odpovídající deformací,  $x$  (mm), může být transformována pomocí reciproční transformace sklonu rovnice 11 do formy dané rovnicí 24:

$$T = \frac{x}{F} \quad (24)$$

kde  $T$  ( $\text{mm} \cdot \text{N}^{-1}$ ) je transformovaná tlaková síla. Získaný vztah  $T(x)$  lze aproximovat polynomickou funkcí třetího řádu (rovnice 25):

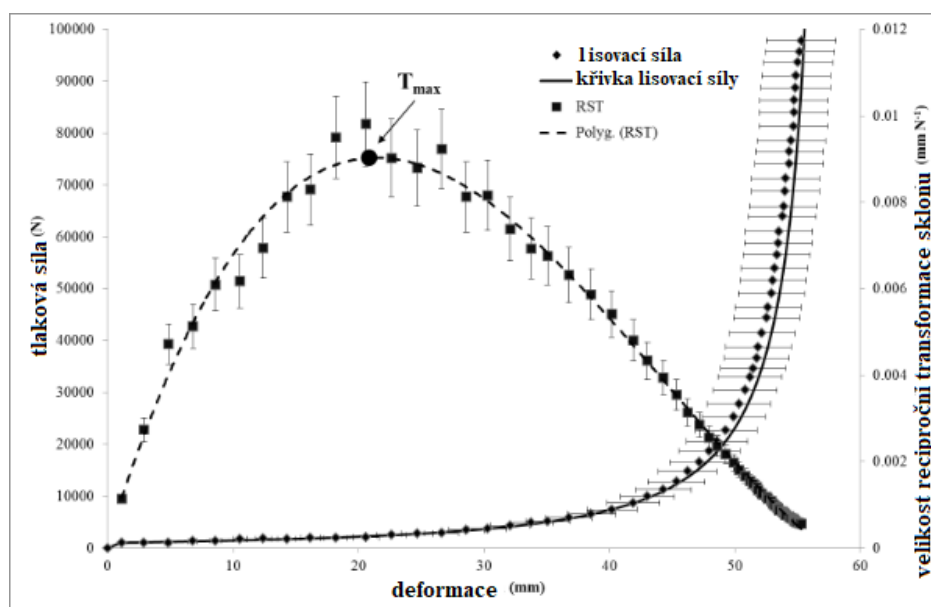
$$T(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (25)$$

Koeficienty polynomické funkce  $a$  ( $\text{N}^{-1} \text{mm}^{-2}$ ),  $b$  ( $\text{N}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ),  $c$  ( $\text{N}^{-1}$ ) a  $d$  ( $\text{N}^{-1} \text{mm}^1$ ) byly vypočteny metodou nejmenších čtverců za použití softwaru MathCAD (MathCAD 14, PTC Software, Needham, MA, USA). Stlačovací síla  $F$  (N) (rov. 28) může být potom vyjádřena z výsledků (rov. 24 a 25) jako:

$$F(x) = \frac{x}{ax^3 + bx^2 + cx + d} \quad (26)$$

V rovnici. 28, tlakové síly  $F$  (N) a deformace,  $x$  (mm) lze také změnit na napětí a pevnost, jak uvádí Blahovec (2008), kde je napětí určeno jako tlaková síla dělená plochou lisovací nádoby a pevnost je určena jako deformace dělená počáteční výškou lisování semen olejnin v tlakové nádobě. Byla popsána individuální závislost mezi tlakovou silou a charakteristikou deformace ve vztahu k počáteční výšce lisovaných semen olejnin v tlakovém nádobě (Herák a kol. 2014).

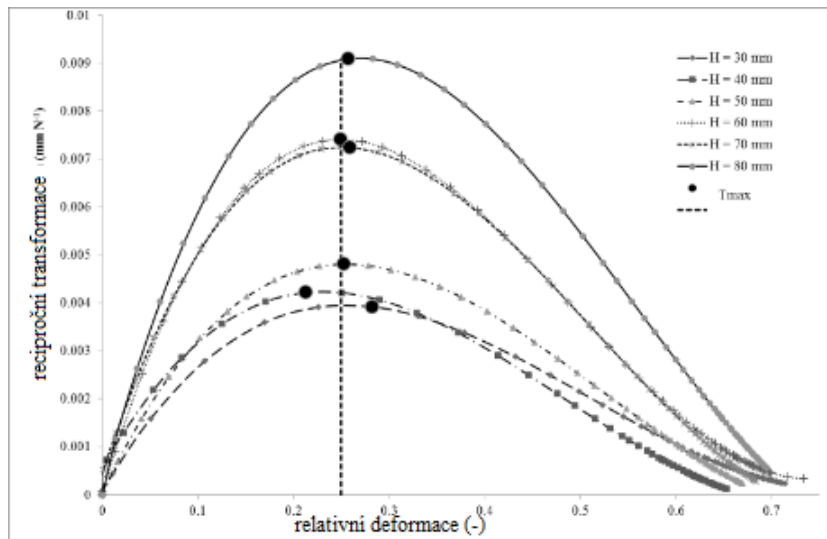
Bylo zjištěno, že tyto závislosti byly v souladu s výsledky dříve publikovanými Herákem a kol. (2013) a Kabutey a kol. (2013). Tlaková síla a deformace, jakož i reciproční transformace sklonu (RST) síly a deformace, které byly zjednodušeny metodou nejmenších čtverců, jsou znázorněny na obr. č. 9.



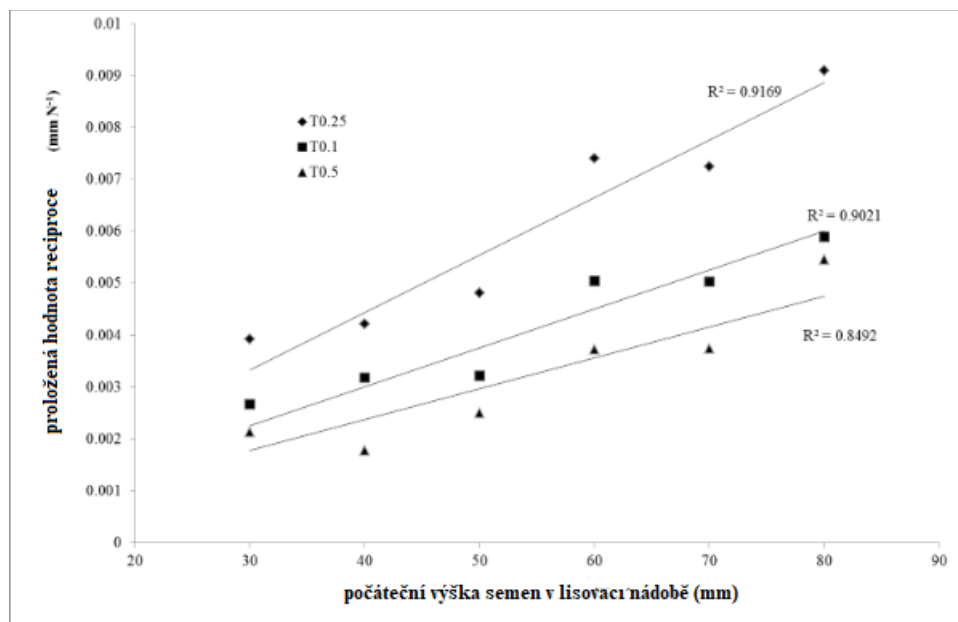
Obr. 9 Závislost mezi tlakovou silou a deformací v počáteční lis. výšce (Herák a kol. 2014)

Podle autorů Herák kol. (2014) hodnoty koeficientů polynomické funkce reciproční transformace sklonu pro každou počáteční lisovací výšku semen olejnin v lisovací nádobě ukázaly, že vytvořená matematická rovnice uvažuje experimentální okrajové podmínky lineárního lisování olejnatých semen ve vztahu k jejich mechanickému chování. Hraniční podmínky naznačují, že počátek deformační křivky začíná nulovou silou a nulovou deformací, po které následuje zvyšující se funkce v celém rozsahu lisování a když se tlaková síla blíží k nekonečnu, pak deformace dosáhne maximální hranice (Herák a kol., 2013; Kabutey a kol., 2013; Herák a kol., 2011). Na druhé straně mohou být hodnoty deformace v lokálním maximu funkce vzájemné transformace sklonu (rov. 28) převedeny na hodnoty deformace.

Vztah mezi přizpůsobením vzájemné transformace sklonu a počáteční lisovací výšky pro hodnoty napětí 0,1, 0,25 a 0,5 byl popsán pro semena *Jatropha curcas*, viz. obr. 10. Hodnoty RST pro odpovídající počáteční lisovací výšce a ve vztahu k deformaci vykazovaly lineární funkci pro popis mechanického chování semen jatrophy, obr. 11.

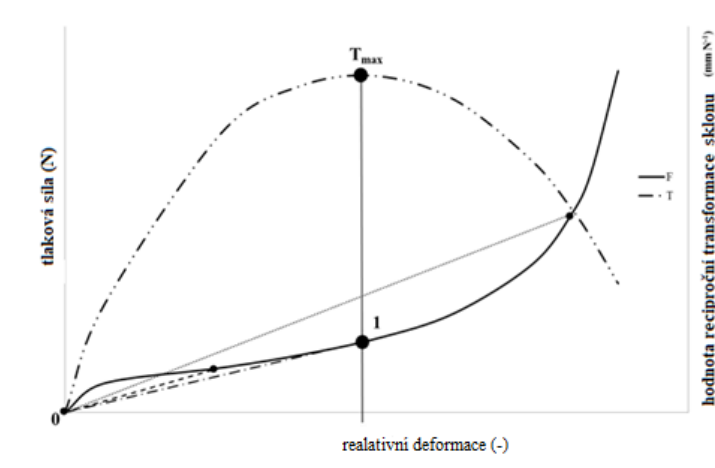


Obr. 10 Závislost mezi RST a napětím jako funkce parametru počáteční lisovací výšky (Herák a kol., 2014)



Obr. 11 Závislost RST jako funkce počáteční lisovací výšky (Herák a kol., 2014)

Autoři dále popsali maximální hodnotu RST odpovídající minimální hodnotě sklonu čáry spojující bod 0 křivky deformace síly rostoucí do bodu 1, jak je znázorněno na obr. 12.



Obr. 12 Závislost tlakové síly a RST na relativní deformaci Herák a kol., 2014

Autoři naznačili, že závislost RST vykazovala podobnost s teoretickou závislostí založenou na distribuční funkci RST s reciproční transformací (Blahovec, 2011). Zjištěná hodnota koeficientů RST (rov.28) znamenala inverzní hodnotu tuhosti systému lineárního lisování olejnin, které reagují na tlakovou sílu (Blahovec 2008; Neckar a Das 2012), kde lze popsat jednotlivé koeficienty. Kromě toho součinitel polynomické funkce třetího řádu založený na RST také ovlivňuje popis mechanického chování. Koeficienty  $d$  označují počáteční poddajnost (závislost mezi silou a deformací);  $c \cdot x$  jako lineární tuhost;  $b \cdot x^2$  skutečná tuhost a  $a \cdot x^3$  jako objemová tuhost podle teorie publikované Neckarem a Dasem (Neckar a Das, 2012) o struktuře a mechanice vláknitých materiálů.

Na základě rovnic (Herák a kol., 2014) lze mechanické chování semen *Jatropha* charakterizovat jako malou deformaci při počátečním i lineárním souladu; při střední deformaci lze popsat souladem počáteční, lineární a reálné.

Metoda RST tedy přesně popisuje deformační charakteristické křivky semen *Jatropha curcas*, než jiné metody dříve publikované Herák a kol., 2013. Nejdůležitější je, že vztah mezi tlakovou silou a deformací závisí také na obsahu vlhkosti a teplotě lisování (Herák a kol., 2010; Kabutey a kol., 2011).



Například výsledky publikované Herák a kol., 2010; Kabutey a kol., 2011; Herák a kol., 2010 ukázaly, že změna obsahu vlhkosti, lisovací teploty a fáze zralosti semen *Jatropha* ovlivnila tvar a polohu deformační křivky a také energetickou náročnost na získání oleje. Bylo však také uvedeno, že únik oleje během procesu lisování nemá žádný vliv na závislost mezi křivkami síly a deformace ve vztahu k měnícím se průměrům lisovacích nádob a objemům lisovacích výšek nádob s lisovanými semeny olejnin (Herák a kol., 2013; Kabutey a kol., 2013).

### 3.3.5 Reologické modely

Přírodní materiály, které jsou vystaveny tahu nebo napětí, se chovají jako viskoelastické materiály (Rao a kol., 2005; Datta a Morrow, 1983; Peleg, 1976a) Byly navrženy experimentální postupy, které umožňují nahlédnout do reologického modelování těchto materiálů, aby je charakterizovaly a předpovídaly jejich chování ve reálných podmínkách. Tyto viskoelastické modely obsahují různé kombinace Hookova pevného komplexu (pružiny) a newtonovských tekutin (tlumič).

Reologické konstanty pro viskoelastické materiály jsou reprezentovány matematickými rovnicemi pro různé modely, kde je modul vyjádřen jako funkce času. Reologické modely jsou velmi užitečnými nástroji při předpovídání mechanické reakce biologických materiálů na specifické podmínky stresu a napětí, kde poskytl seznam podmínek, které musí splnit při konstrukci reologického modelu, který představuje přírodní materiál:

- (i) Model musí umožňovat predikci skutečného chování při jakékoliv silové deformaci.
- (ii) Model by měl být schopen reagovat na kladné i záporné působení síly a deformace (tj. tah a stlačení).
- (iii) Změny vyskytující se v chování skutečného materiálu musí být vysvětleny prostřednictvím parametrů daného modelu.

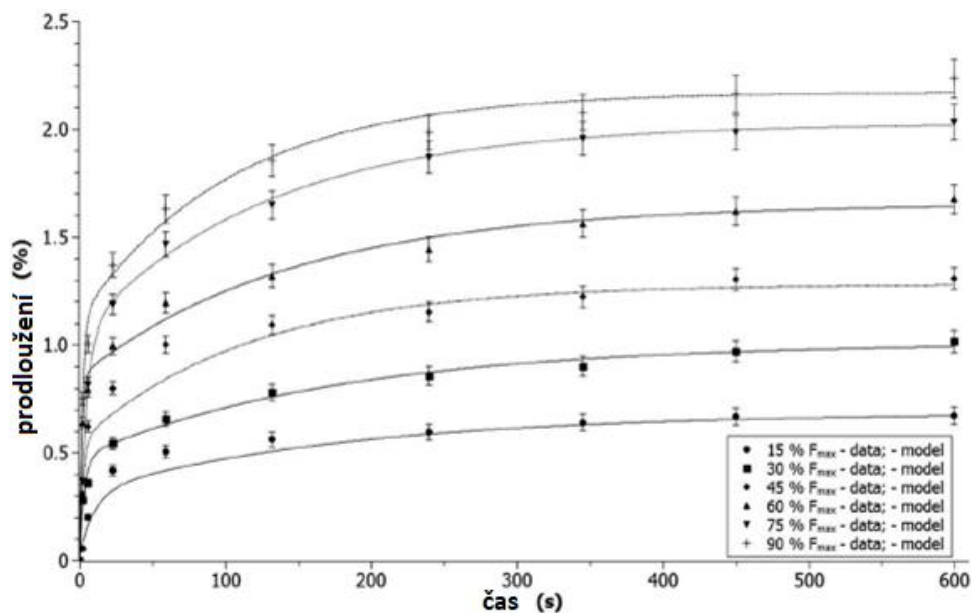
Dva z nejužitečnějších fyzikálních testů použitých při stanovení reologického modelu a při výpočtu jednotlivých konstant modelu, kterou vybraný model obsahuje, jsou tečení a relaxace. (Gross 1979; Data a Morrow 1983; Skinner 1983).

### 3.3.6 Creep (tečení)

Tečení materiálu (creep) je možno definovat jako nárůst plastické deformace s časem působením konstantního zatížení (konstantního napětí nebo konstantní síly) pod úrovní meze kluzu, za zvýšených teplot, který může vést k lomu součásti po určité době, která závisí na velikosti působícího zatížení a teploty. Obecně platí, že rychlost tečení se zvyšuje a čas do lomu se zkracuje s vyšší teplotou a větším zatížením (Mentel 2003).

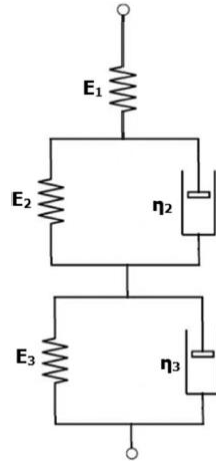
Při creepu musí být dodržena Boltzmannova superpozice. (Jestliže na těleso působí současně více sil, rovnají se silové účinky působení jediné síly, tzv. výslednice sil, která je rovna vektorovému součtu těchto sil). Křivky tečení a další výpočetní metody lze použít pro fyzikálních vlastností materiálu (Datta a Morrow, 1983; Skinner, 1983).

V experimentu tečení, když je zatížení / síla působí na vzorek okamžitě, je vzorek rychle deformován, což způsobuje napětí materiálu, které se v závislosti na čase dále zvyšuje (s klesající rychlostí). Výsledkem grafu jednoosého napětí /deformace jako funkce času je graf známý jako křivka tečení. Křivky tečení (obr. 13) a další výpočetní metody lze efektivně využít ke studiu fyzikálních vlastností materiálu (Datta a Morrow 1983; Skinner 1983).



Obr. 13 Creep křivky, porovnání naměřených hodnot a modelu, Mizera a kol., 2019

Schéma modelu Kelvin-Voight (Blahovec 2008) creepového vlákna Ensete je znázorněno na obr. 14. (Mizera a kol, 2019). Model je sestavou tří sériových spojených větví, přičemž první a druhá větev obsahují paralelně připojenou viskózní a elastickou část, zatímco první větev obsahovala jen viskózní.



Obr. 14 Schéma Kelvin-Voight modelu creepových vlastností vláken (Mizera a kol., 2019)

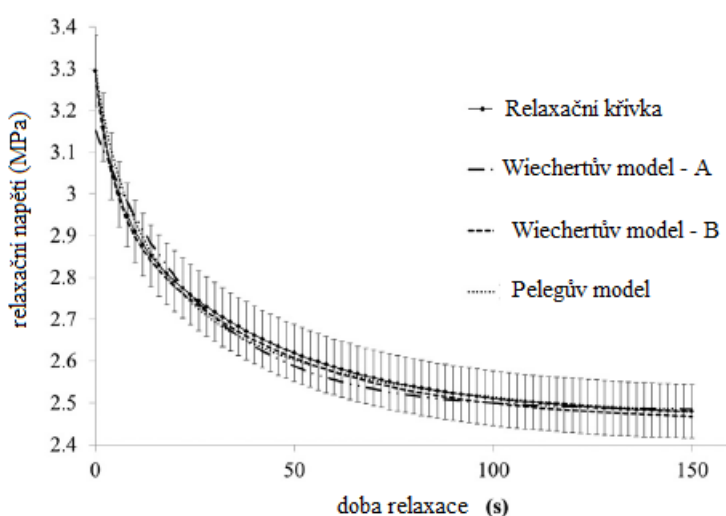
Matematický model popisující creep vlákna Ensete (rov. 27)

$$X_c(t) = \frac{\sigma}{E_1} \cdot L + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} t}\right) \cdot L + \frac{\sigma}{E_3} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_3}{\eta_3} t}\right) \cdot L \quad (27)$$

Kde  $E_1$ ,  $E_2$  and  $E_3$ (MPa) jsou moduly pružnosti dané větve;  $\eta_2$  and  $\eta_3$  (MPa·s<sup>-1</sup>) jsou koeficienty viskozity;  $t$  (s) je doba creepu (tečení),  $X_c$  (mm) je deformace a  $\sigma$  (MPa) počáteční napětí vláken.

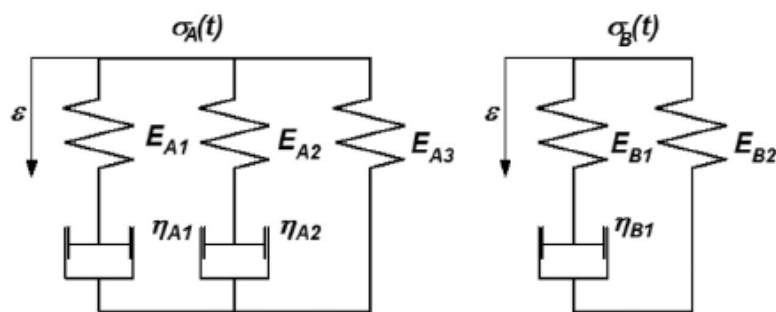
### 3.3.7 Relaxace

Další možností, která se používá ke stanovení modelových konstant přírodních materiálů, je relaxace (Peleg 1979). Relaxace může být popsána jako schopnost materiálu zmírnit vynucené napětí za podmínek konstantního napětí. Napětí musí být opět udržováno velmi malé, méně než 1,5 - 3,0 % pro zeleninu (Mohsenin a Mittal 1977) nebo dokonce méně než 1,5 % pro např. brambory (Skinner 1983). Toto nízké napětí zajistí, že vzorek je v pásmu elasticity tohoto materiálu a lze použít reologické modelování (Rao a kol. 2005). Graf rychlosti, při které je vnitřní napětí funkcí času, je znám jako relaxační křivka (obr. 15).



Obr. 15 Vztah mezi napětím a dobou relaxace při lisování jatrophy (Herák a kol., 2015)

Pro přírodní materiály je nejčastěji používán Maxwellův model pružina a tlumičů v paralelním zapojení (obr.16).



Obr. 16 Schéma Wiechertova modelu A a Wiechertova model B, (Herák a kol., 2015)

Herák a kol., 2015 popisuje tři typy relaxační reakce, Wiechertův model A, Wiechertův model B a Pelegův model, jak ukazují rov. 28, 29 a 30.

$$\sigma_A(t) = E_{A1} \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{E_{A1}}{\eta_{A1}}t} + E_{A2} \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{E_{A2}}{\eta_{A2}}t} + E_{A3} \cdot \varepsilon \quad (28)$$

$$\sigma_B(t) = E_{B1} \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{E_{B1}}{\eta_{B1}}t} + E_{B2} \cdot \varepsilon \quad (29)$$

$$\sigma_C(t) = \sigma_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{a + b \cdot t}\right) \quad (30)$$

kde  $E_{A1}$ ,  $E_{A2}$ ,  $E_{A3}$ ,  $E_{B1}$  a  $E_{B2}$  (MPa) jsou moduly pružnosti;  $\eta_{A1}$  and  $\eta_{B1}$  (MPa·s<sup>-1</sup>) jsou koeficienty viskozity;  $t$  (s) je čas relaxace,  $a$  (s),  $b$  (-) je konstanta Pelegova modelu.

### 3.3.8 FEM Modely

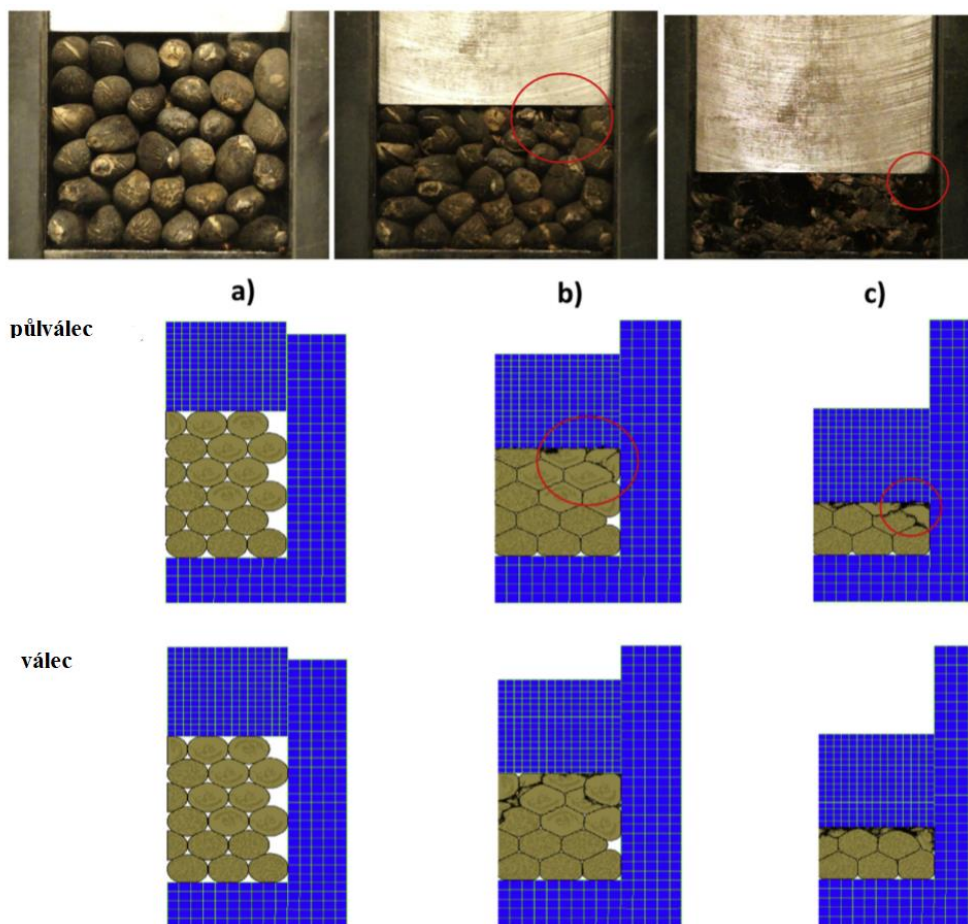
Experimentálně získaný empirický vztah je omezen na konkrétní kritickou situaci, ale nepopisuje její přesnou příčinu. Znalost příčiny plastického poškození, což má za následek překročení meze kritické stlačitelnosti, je důležitá, zejména pokud je lisováno více semen najednou. Tvorba trhlin v jednom semenu ovlivňuje celkovou energetickou účinnost lisování. Na lisování má vliv nejen struktura semen, ale i viskozita oleje, objem vzduchu, který se mění v různých fázích lisovacího procesu. Nádoba v podstatě tvoří nehomogenní mechanické prostředí. To se odráží v nerovnoměrné energetické náročnosti lisovacího procesu. Tento jev lze částečně eliminovat použitím lisovacího zařízení s proměnnou geometrií. Pro hlubší pochopení těchto procesů lze použitím metody FEM (metoda konečných prvků) a DEM (diskrétní prvek).

Také speciální metody využívající princip FEM s variabilní geometrií jako FDM (Fiktivní doménové metody) na IB-BCE (Immersed Boundary – Body Conformal Enrichment). Téměř všechny fyzikální procesy se mohou řešit pomocí numerických metod (Dekys & Broncek, 2012; Petruš a kol., 2012).

Problém je ve výpočtu, který je velmi časově náročný. Je třeba provádět na superpočítačích a jak zmíněno, trvá velmi dlouho. Z tohoto důvodu se používá zjednodušený 2D model, kterým lze dobu výpočtu zkrátit. Simulace modelu odrážejí smykové napětí způsobené třením mezi míchanými částicemi. Výsledky ukazují, že k účinnému míchání dochází, pokud existují oblasti tzv. chudých míchání (Connelly & Kokini, 2007).

Kabas, Celik, Ozmerzi a Akinci (2008) studovali mechanické vlastnosti kinetického dopadu padajícího jablka a tvrdí, že vnitřní napětí způsobená vnějšími silami bezprostředně po dopadu je obtížné měřit. Je proto vhodné vytvořit analýzu FEM, kde pro okamžité zvýšení napětí, je důležité vyhodnotit napětí v krátkých intervalech.

Experiment s 2D FEM simulací lisování byl proveden pro ideálně uspořádaná zralá semena *J. curcas* L. ve válcových nádobách s  $\varnothing$  60,  $\varnothing$  80 a  $\varnothing$  100 mm, obr. 17. Z výsledků vizualizace je zřejmé, že napětí semen během stlačení ve válci má podobné výsledky FEM simulace lisování v půlválci. Místa, kde napětí v půlválci dosáhlo kritické hodnoty, jsou uvedena na obr. 13 b a c v různých fázích deformace semen: **a)** objemové napětí 1/4 10%, t 1/4 5 s, **b)** 40% , t 1/4 20 písek **c)** 75%, t = 37,5 s

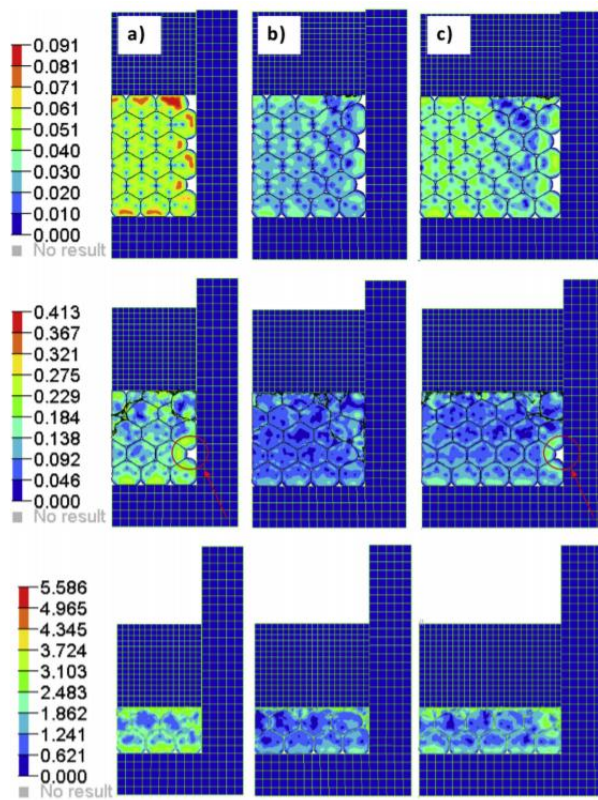


Obr. 17 Vizualizace experimentu lisování jatrophy a modelu FEM, (Petruš a kol., 2014)

Z výsledků je zřejmé, že výsledky FEM simulace lisování semen pro modely s půlválcem a válcem o průměru 60 mm nejsou ve všech fázích stejné (obr. 17 b, c). To může být způsobeno rozdíly uspořádání v prostoru nebo velikostí kontaktní plochy. Průběh experimentu vykazoval významné anizotropní chování ovlivněné plastickou deformací, která se projevila jako počáteční tvorba trhlin při překročení kritického napětí.

Je-li vizualizace výsledků experimentu lisování v půlválci v souladu s výsledky simulace MKP v půlválci, lze předpokládat, že výsledky MKP simulace lisování semen ve válci jsou odpovídající. Protože geometrie půlválce není vhodný tvar pro skutečné lisovací zařízení, další výsledky jsou zobrazeny pouze pro válcovou geometrii. Výsledky simulací MKP stlačování ve válcových nádobách (obr. 14) ukazují rozdělení ekvivalentní Von Misesovy hypotézy pevnosti během deformace 20, 40 a 75 % v době 10, 20 a 37,5 s. Distribuce Von Misesovy hypotézy pevnosti ukazuje, že jeho růst ovlivňuje přenos kontaktního tlaku mezi interagujícími semeny (jak na sebe vzájemně semena působí), obr. 18. Pruh semen v horní řadě se zvětšuje od osy symetrie válce ke stěnám válce, a to bylo pozorováno pro všechny průměry válců.





Obr. 18: Závislost Von Misesova napětí a FEM modeů semen (Petrů a kol., 2014)

## 4 Materiály a metody

K experimentu byla použita řepka olejná (*Brassica napus* L.), původem z České republiky. Semena řepky olejné byla sklizena v řádném termínu, po sklizni skladována v suchu, v konstantních podmínkách ve lněných pytlích v laboratořích Technické fakulty, České zemědělské univerzity, které jsou klimatizovány. V těchto laboratořích byly provedeny všechny experimenty.

### 4.1 Stanovení základních parametrů

Tabulka (tab.1) uvádí parametry směsi semen, která byla použita k experimentu  $\pm$  směrodatná odchylka.

Tab. 1 Základní parametry lisované směsi semen

vlhkost w.b. (%)	hmotnost (g)	porozita (%)	objem (m <sup>3</sup> )	teplota (°C)
5,0 $\pm$ 0,1	125 g $\pm$ 0,5	40,19 $\pm$ 0,49	1,97 $\cdot$ 10 <sup>-4</sup>	20 $\pm$ 1

#### 4.1.1 Stanovení množství (hmotnosti)

Všechny experimenty byly provedeny na semenech řepky olejné o stejné počáteční hmotnosti. Hmotnost byla naměřena na analytické váze Kern AEJ 200-CM (Kern & Sohn GmbH, Belingen), přesnost 0,001 g. Výchozí hmotnost byla stanovena pro všechny experimenty 125 g, která vychází z objemu lisovací nádoby. Použita byla válcová ocelová nádoba s pístem o průměru 60 mm. Objem  $V$ , dle rovnice č. 31, je  $1,97 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ . Semena o objemu  $1,97 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$  mají hmotnost 125 g.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (\text{m}^3) \quad (31)$$

#### 4.1.2 Stanovení teploty

Experiment byl prováděn při několika teplotách. K ohřevu bylo použito ohřívací zařízení (Mettler UF 110, Mettler GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo). Semena byla před ohřevem umístěna do vaku z PVC. Vakuovací zařízení (Vacuum Packing Machine, model: MSW – VPM – 900K, Poland, EU). Vakuované odvážené množství 125 g bylo ohřáto ohřívacím zařízením (Mettler UF 110, Mettler GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo) na teploty 40 °C, 60 °C a 80 °C  $\pm$  1 °C. Teplota 20 °C byla v laboratoři zajištěna klimatizační jednotkou.

K zahřátí nádoby a udržení požadované teploty bylo pro teploty od 40 °C použita objímka, obr. č. 19.



*Obr. 19 Zařízení na ohřev nádoby*

Dále byly vzorky směsi semen chlazeny. Chlazeno bylo v chladicím zařízení DGD refrigerazione (Rev 02\_2016-del 06/2016, Cod. Listrbn, Italy) na teploty 0 °C, -20°C a -40 °C  $\pm$  2 °C. Zavakuovaná semena byla ohřívána i chlazena po dobu 2h, která zajišťuje rovnoměrné prohřátí/zchlazení semen. Ve všech případech byla do chladicího zařízení umístěna i lisovací nádoba, aby nedocházelo k zchlazení semen o stěny nádoby, viz. obr. č. 20.



*Obr. 20 Lisování při teplotě -40 °C*

### 4.1.3 Stanovení vlhkosti

Vlhkost semen byla stanovena podle normy ASAE (ASAE S410.1 DEC97, ASAE, 1998). Vzorky semen o hmotnosti 100 g byly náhodně odebrány a váženy na elektronických vahách Kern (Kern 440-35, Kern & Sohn GmbH, Balingen, Německo). Vzorky byly sušeny v sušárně (Memmert UF 110, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo) při teplotě  $110 \pm 3$  °C po dobu 17 hodin. Po vysušení byly vzorky vyjmuty ze sušárny a opět váženy a byl stanoven obsah vlhkosti podle rov. 32.

$$w_h = \frac{m_w - m_d}{m_w} \cdot 100 \quad (\%) \quad (32)$$

Experimenty byly prováděny při různých vlhkostech. Vlhkosti se měnily ve vlhčící komoře (Memmert UF 110, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo). Byly stanoveny vlhkosti 0 %, 3 %, 5 % - standartní vlhkost při 20 °C, 7 % a 9 % w.b. Vlhkost se stanovovala z hysterezní křivky vysušení.

### 4.1.4 Stanovení porozity

Za použití rovnice (Mohsenin, 1986) byla stanovena porozita (rov. 33) různých měřených výšek lisování osiva s ohledem na průměry lisovací nádoby.

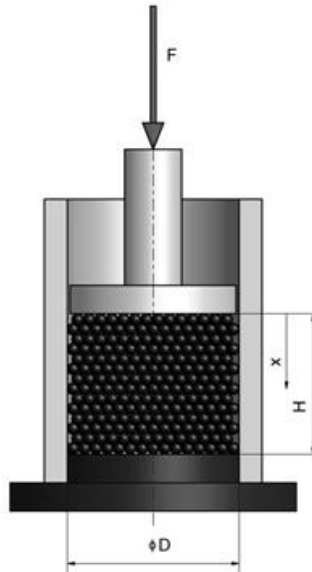
$$P_f = \left[ 1 - \left( \frac{\rho_b}{\rho_t} \right) \cdot 100\% \right] \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (33)$$

Kde  $P_f$  je pórovitost (%),  $\rho_b$  je objemová hustota ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) a byla stanovena jako hmotnost objemových semen dělená objemem lisovací nádoby a  $\rho_t$  e skutečná hustota, gravimetricky stanoveno  $1056 \pm 13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Izli a kol., 2009).

## 4.2 Stanovení průběhu experimentu

Pro lisování semen bylo použito lisovací zařízení ZDM Tempos model 50, (Česká republika), které je vybaveno záznamovým zařízením.

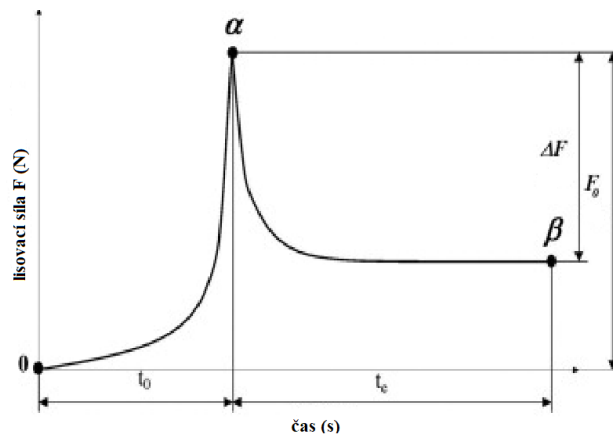
Byla použita lisovací nádoba o průměru  $D = 80$  mm, která byla naplněna semeny řepky do výšky  $H = 70$  mm, viz. obr. 21. Lisovací síla  $F$  byla nastavena od 0 do 100 kN. Rychlost lisování byla stanovena  $v = 10$  mm·min<sup>-1</sup>. Experiment měl dvě fáze, kompresi a relaxaci.



Obr. 21 Parametry lisovací nádoby, Herák a kol. 2009

### 4.2.1 Kompresní zkouška

Fáze komprese byla první fází experimentu. Do nádoby byla vložena semena předem definovaných parametrů, působení síly 0 – 100 kN. Experiment byl pro každou teplotu a vlhkost semen opakován 3x. Výstupem byl záznam průběhu lisování v souřadnicovém systému. Pro každou teplotu lisování, tedy -40 °C, -20 °C, 0°C, 20 °C, 40 °C, 60 °C, 80 °C a pro všechny vlhkosti, tedy 0 %, 3%, 5%, 7 % a 9 % (w.b.), byl proveden záznam kompresní a relaxační zkoušky, viz. obr. 22, kde první část křivky, 0 –  $\alpha$  je část kompresní.



Obr. 22 Průběh relaxace, Herák a kol. 2017

#### 4.2.2 Relaxační zkouška

Relaxační zkouška byla součástí každého měření. Relaxační čas byl stanoven na 600 s včetně fáze komprese. Zjištěné charakteristiky lisovací síly  $F$  (kN) a deformace  $x$  (mm), byly převedeny na tlak  $\sigma$  (MPa) (rov. 34) a poměrné napětí  $\varepsilon$  (-) (rov. 35).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{MPa}) \quad (34)$$

$$\varepsilon = \frac{x}{H} \quad (-) \quad (35)$$

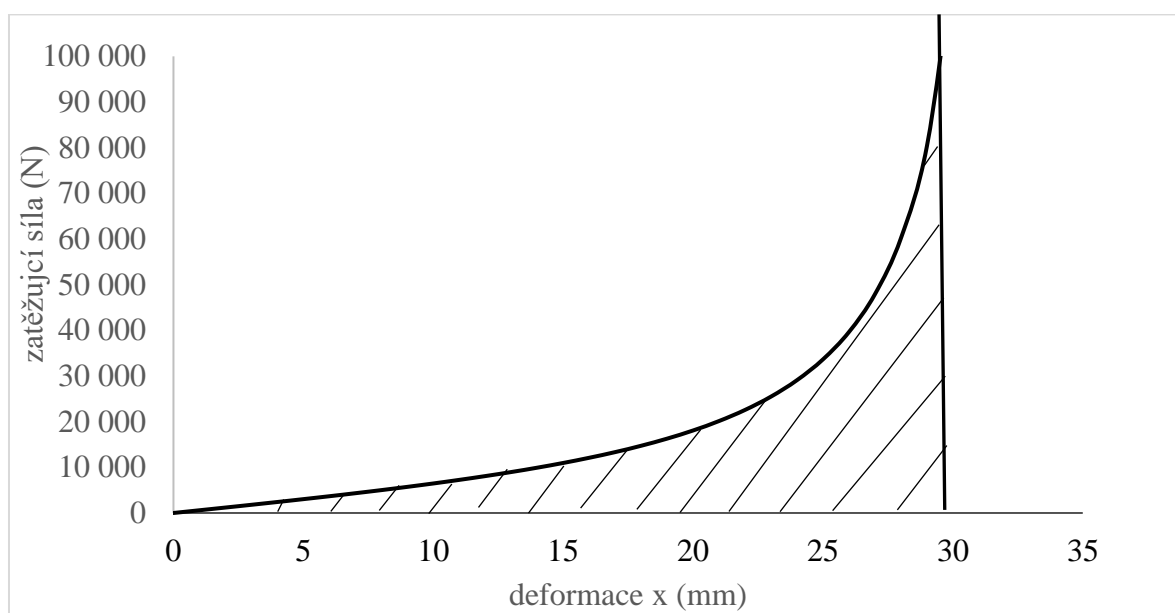
kde  $\sigma$  (MPa) je relaxace semen,  $S$  (mm<sup>2</sup>) je plocha pístu lisovací nádoby (tj. 2827 mm<sup>2</sup>),  $\varepsilon$  (-) poměrná deformace,  $x$  (mm) je deformace semen a  $H$  (mm) je počáteční výška lisované směsi. Počáteční čas relaxace  $t_0$ , obr. 20, průběh relaxace je mezi body  $\alpha$  a  $\beta$ , označen  $t_c$ .

### 4.2.3 Energie

Energie byla stanovena jako plocha pod deformační křivkou, viz. obr. č. 23. Výpočet deformační energie byl dle rovnice rov. 36, (Herák a kol., 2012)

$$D_E = \sum_{n=0}^{n=i-1} \left[ \left( \frac{F_{n+1} + F_n}{2} \right) \cdot (x_{n+1} - x_n) \right] \quad (36)$$

kde  $D_E$  je deformační energie (J),  $F_{n+1} + F_n$  a  $x_{n+1} - x_n$  jsou hodnoty síly  $F$  a deformace  $x$  a  $n$  je počet hodnot.



Obr. 23 Výpočet energie – plocha pod deformační křivkou

### 4.2.4 Zisk oleje

Zisk oleje byl zjišťován při každém experimentu rozdílem hmotností semen před lisováním a hmotností semen po lisování (rov. 37).

$$m_o = m_s - m_c \quad (\text{g}) \quad (37)$$

Zisk oleje lze vyjádřit v také v procentech (Deli a kol., 2011) jako podíl hmotností (rov. 38)

$$Y_o = \left( \frac{m_o}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (38)$$

Kde  $m_o$  je hmotnost zbytků směsi semen po lisování,  $m_s$  je počáteční hmotnost semen sypaných do nádoby.

#### 4.2.5 Jednotková energie

Jednotková energie byla stanovena jako energie spotřebovaná na jednotku množství oleje. Jde o podíl energie a získaného množství oleje.

#### 4.2.6 Matematické modely komprese

##### a) Tangentní modely

Z výsledků experimentů byly určeny závislosti mezi silou a deformační charakteristikou dle rovnice (rov. 39).

$$F(x) = f(x) \quad (39)$$

Kde  $F$  je síla (N),  $x$  je deformace semen (mm) a jsou funkcí síly a deformace.

Stanovené závislosti velikosti lisovací síly na velikosti deformaci semene byly vyjádřeny jako rovnice (rov. 40) s koeficienty  $A, B$ .  $A$  jako koeficient síly (N),  $B$  jako koeficient deformace ( $\text{mm}^{-1}$ ) a  $n$  je exponent (-) (Herák a kol. 2011).

$$F(x) = A \cdot [\tan(B \cdot x)]^n \quad (40)$$

##### b) Reologické modely

Propis mechanického chování byly také použity modely s více větvemi. Model vychází z obecného Maxwellova modelu reologického chování. Modely s více větvemi vychází z modelu jedné větve, (rov. 41). (Herák D., Sedláček A., 2017)

$$\gamma = \frac{v}{H} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (41)$$

Lisovací rychlost je považována za konstantní,  $\gamma$  je rychlost deformace. Model jedné větve je popsán diferenciální rovnicí (rov. 42).

$$\dot{\varepsilon} = \gamma = \frac{\dot{\sigma}}{\eta} - \frac{\sigma}{E} \quad (-) \quad (42)$$

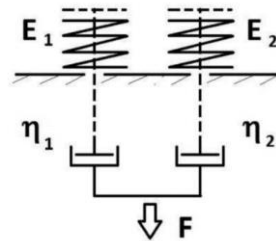
kde  $E$  (MPa) je modul elasticity,  $\eta$  ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je koeficient dynamické viskozity. Vzorec popisující vztah mezi tlakovým napětím a časem popisuje rovnice (rov. 43). S okrajovými podmínkami ( $\sigma = 0$  MPa;  $t = 0$  sec), v nulovém čase nulové napětí.

$$\sigma_I = \gamma \cdot \eta \cdot (e^{\frac{E}{\eta} t} - 1) \quad (\text{MPa}) \quad (43)$$



Model pro dvě větve vychází z derivace modelu jedné větve, viz. (rov. 44) a je zobrazen na obr. 24.

$$\sigma_{II} = \gamma \cdot \eta_1 \cdot \left( e^{\frac{E_1}{\eta_1} t} - 1 \right) + \gamma \cdot \eta_2 \cdot \left( e^{\frac{E_2}{\eta_2} t} - 1 \right) \quad (44)$$



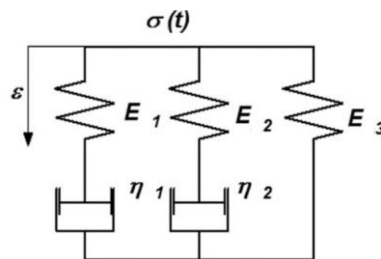
Obr. 24 Reologický model – dvě větve (Herák, Sedláček, 2017)

Charakteristiky tahového napětí pro reologické modely byly analyzovány pomocí softwaru Mathcad 14 (MathCAD 14, PTC Software, Needham, MA, USA), který používá Levenberg-Marquardtův algoritmus (Marquardt, 1963).

#### 4.2.7 Matematický model relaxace

Součástí jednotlivých experimentů lisování byla relaxace, celkový čas stlačování i relaxace byl stanoven na dobu, po které již nedocházelo k jakékoliv změně relaxační křivky či zisku oleje (360 s). Po dosažení síly 100 kN bylo zatížení v této síle ponecháno po vhodný čas.

Pro matematický popis relaxace byl použit reologický model se třemi větvemi vycházející z obecného Maxwellova modelu reologického chování. Dvě větve měly jak Hookův elastický člen, tak i Newtonův viskózní člen, jedna větev byla pouze s elastickým členem. Model je na obr. 25., rov. 45.



Obr. 25 Reologický model, tři větve (Herák a kol., 2015)

$$\sigma(t) = E_1 \cdot \varepsilon \cdot e^{\frac{E_1}{\eta_1} t} + E_2 \cdot \varepsilon \cdot e^{\frac{E_2}{\eta_2} t} + E_3 \cdot \varepsilon \quad (45)$$

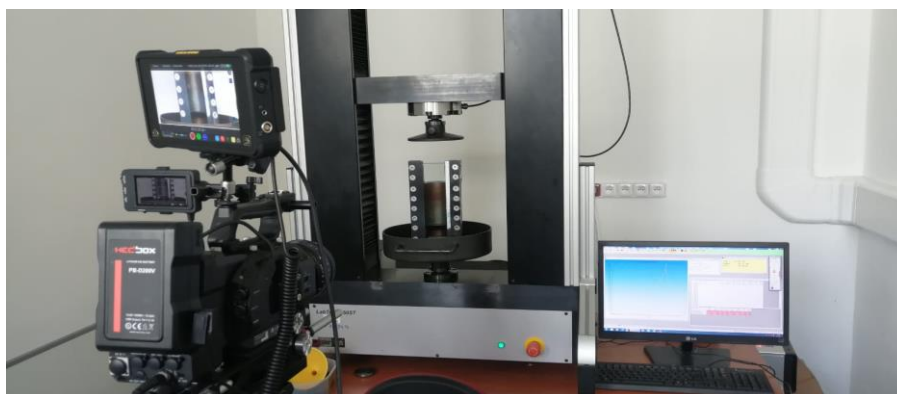
#### 4.2.8 Stanovení bodu olejnatosti

Experimentem byl stanoven horní a dolní bod olejnatosti. Experiment byl proveden na lisovacím zařízení LabTest 5.50ST (LaborTech, Česká republika), viz. obr. č. 26.



*Obr. 26 Lisovací zařízení LabTest 5.50ST*

Pro tento experiment byla kvůli vizualizaci použita půlválcová nádoba, kde přední část byla skleněná. Viz. obr. č. 24. K záznamu byla použita kamera Sony PXW FS7; objektiv ZEISCCP3 50 mm, 4 K rozlišení; 180 fps. Záznam byl zpracován v software Davinci Resolve a Image J – Fiji, viz. obr. č. 27. Pro experiment byla použita síla 40 kN, záznam byl poté zpomalen, aby byl zřejmý přesný začátek uvolňování oleje. Pro experimenty byla použita semena řepky olejné ochlazená na  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při běžné pokojové teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a ohřátá na  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



*Obr. 27 Sestava lisovacího a záznamového zařízení*

#### **4.2.9 Analýza dat**

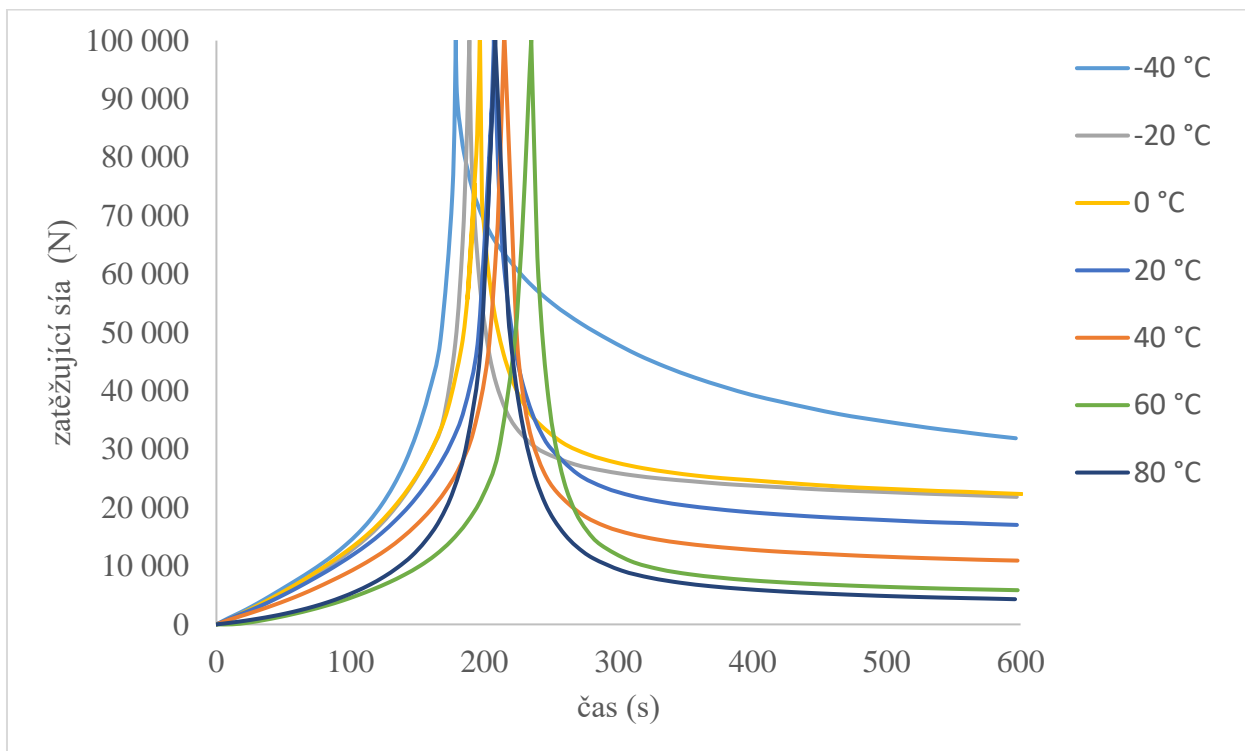
Všechny naměřené výsledky byly zpracovány pomocí počítačového programu Mathcad 14 (MathCAD 14, PTC Software, Needham, MA, USA, Pritchard, 1998) s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu pro stanovení matematických modelů. Marquardt – Levenberg algoritmus je standardní technika k prokládání nelineárních funkcí metodou nejmenších čtverců. Jedná se o nelineární metodu, která opakovaně snižuje součet čtverců chyb mezi prokládanou funkcí a naměřenými datovými body prostřednictvím sekvence změn hodnot parametrů.

## 5 Výsledky a diskuze

Většina návrhů či výzkumných prací v oblasti zpracování olejů vychází z různých matematických modelů popisujících průběhy těchto procesů, což vyžaduje dostatečné znalosti proměnných ovlivňujících tento proces a také jejich číselné vyjádření většinou stanovené z experimentálních měření.

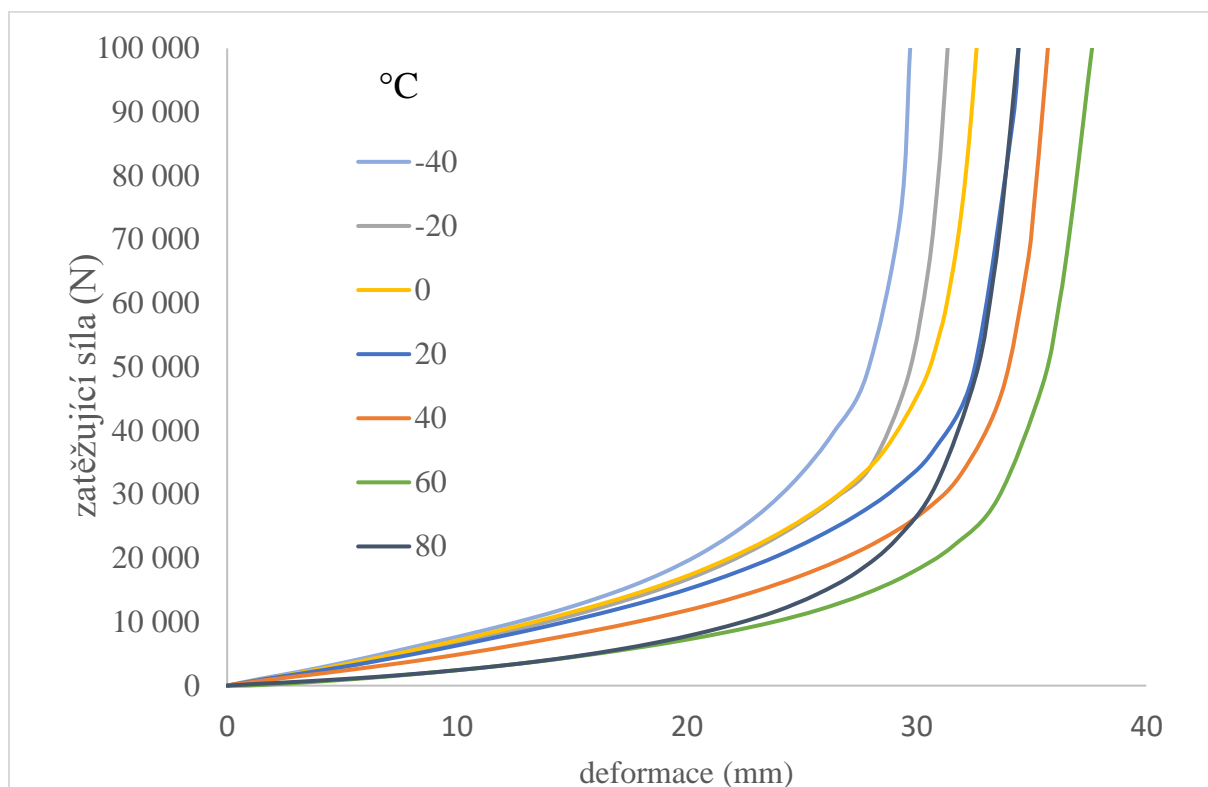
### 5.1 Vliv teploty – kompresní zkouška

Na obr. 28 jsou znázorněny průběhy lisování při různých teplotách. V první části každé křivky grafu se jedná o fázi postupného zatěžování silou  $F$  (N) do maxima, které bylo pro experiment stanoveno na 100 kN. Druhou částí křivky je relaxace. Stejný experiment byl proveden pro různé teploty.

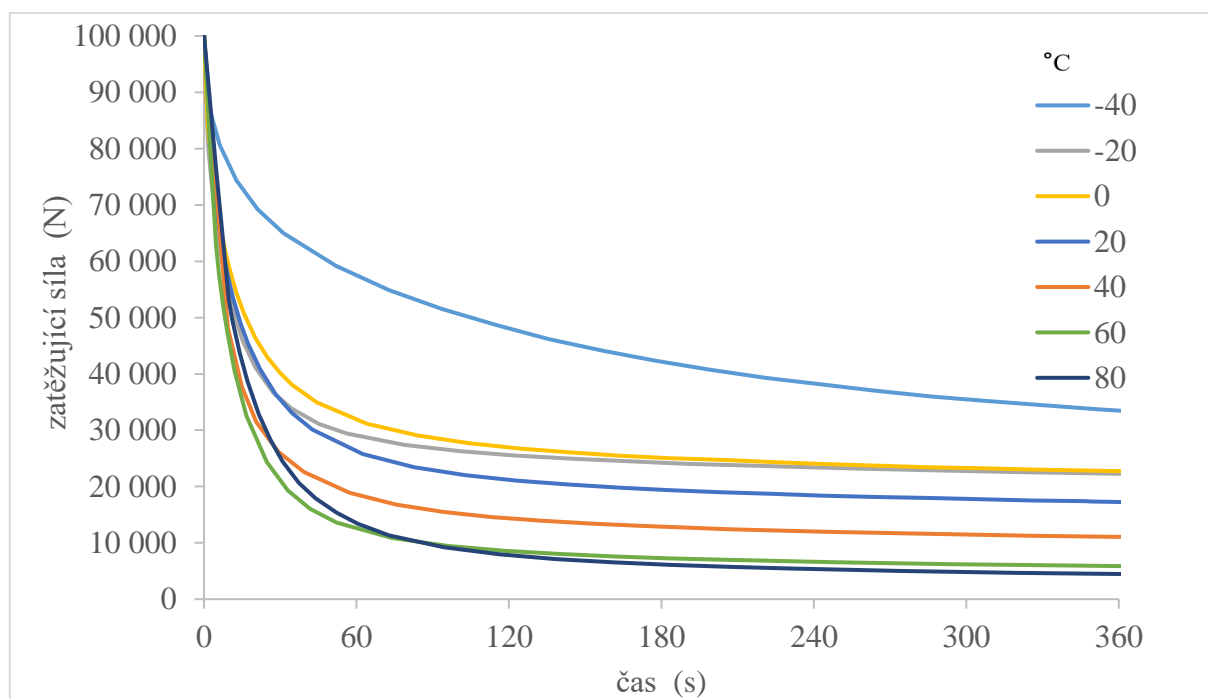


Obr. 28 Křivky průběhu lisování při různých teplotách

Křivky byly pro přehlednost rozděleny na dvě fáze, fázi stlačování a fázi relaxace, viz. obr. a obr. 29 a obr. 30.



Obr. 29 Křivky stlačování z naměřených dat pro různé teploty



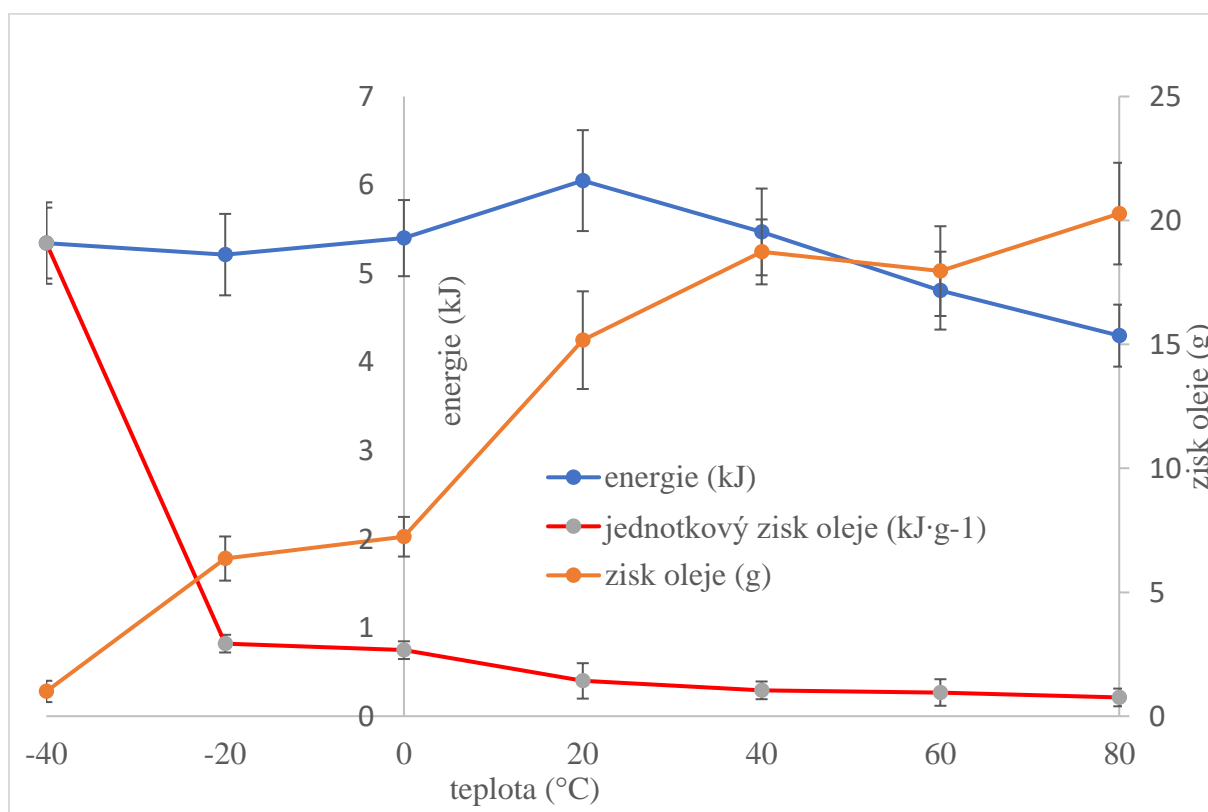
Obr. 30 Křivky relaxace z naměřených dat pro různé teploty

V tab. 2 jsou uvedeny naměřené hodnoty zjištěné při experimentech při různých teplotách. Pro jednotlivé teploty byl vždy zjištěn zisk oleje, energie a jednotkový zisk oleje.

Tab. 2 Naměřené hodnoty pro jednotlivé teploty

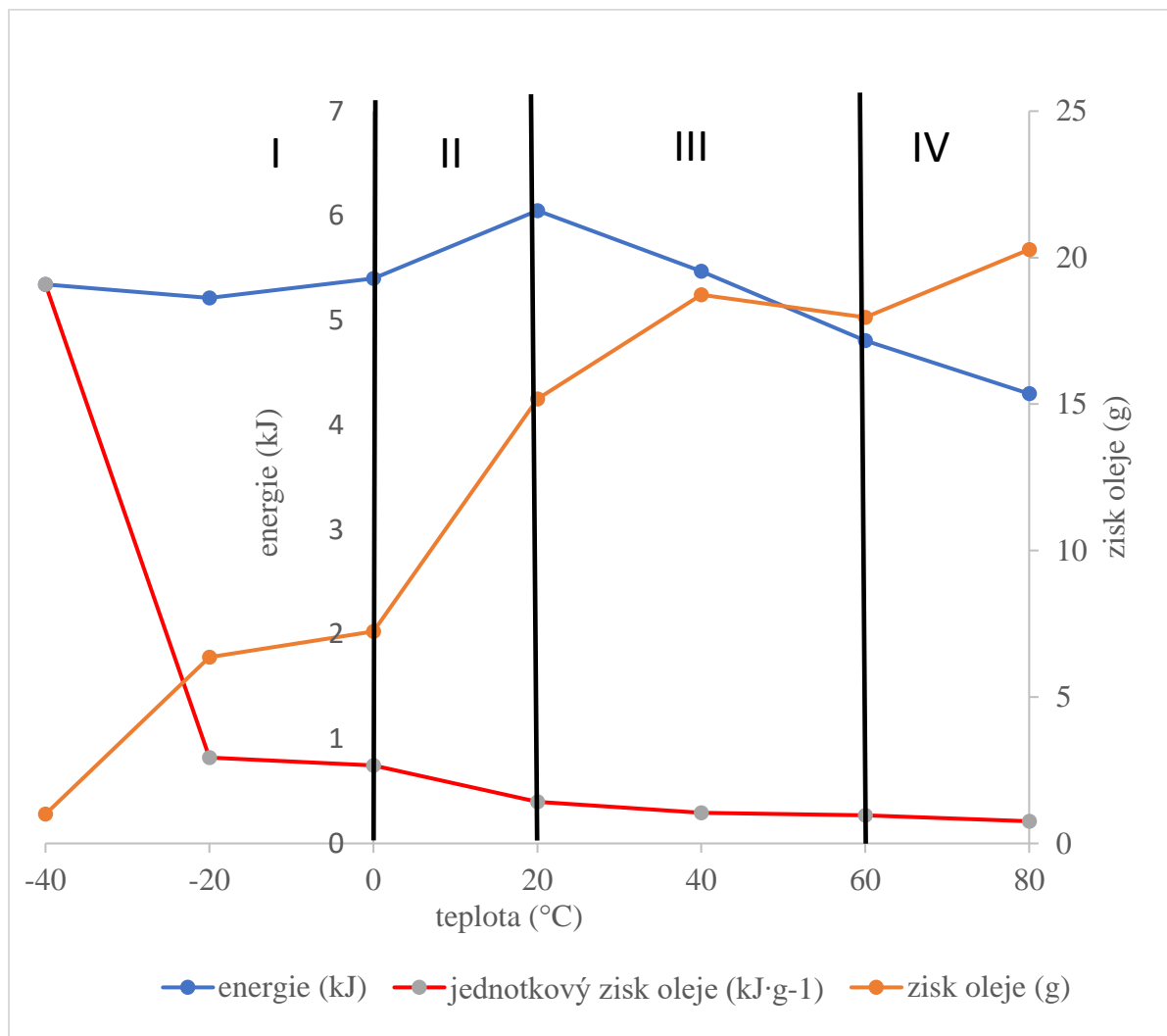
teplota ( $^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ )	energie (kJ)	zisk oleje (g)	jednotkový zisk oleje ( $\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ )
-40	$5,34 \pm 0,35$	$1,00 \pm 0,13$	$5,34 \pm 0,43$
-20	$5,21 \pm 0,36$	$6,36 \pm 0,89$	$0,82 \pm 0,07$
0	$5,40 \pm 0,33$	$7,24 \pm 0,80$	$0,75 \pm 0,06$
20	$6,05 \pm 0,47$	$15,17 \pm 1,97$	$0,40 \pm 0,03$
40	$5,47 \pm 0,39$	$18,73 \pm 1,31$	$0,29 \pm 0,01$
60	$4,81 \pm 0,34$	$17,96 \pm 1,81$	$0,27 \pm 0,01$
80	$4,30 \pm 0,25$	$20,28 \pm 2,05$	$0,21 \pm 0,01$

Z dat uvedených v tabulce byl vytvořen graf vlivu teploty na zisk oleje a velikost spotřebované energie na lisování. Další křivku grafu stanovený jednotkový zisk oleje, viz. obr. 31.



Obr. 31 Naměřené hodnoty

Z obr. č. 32 je zřejmé, že zisk oleje stoupá s rostoucí teplotou. Pro lepší popis byl graf rozdělen na čtyři oblasti.



Obr. 32 Vliv teploty na zisk oleje velikost energie

První oblast (**oblast I**) – 40 °C do 0 °C, takzvaná oblast mražení. V této oblasti je pozorován značný úbytek oleje. Je zde patrný pokles mezi - 20 °C a - 40 °C. K tuhnutí oleje (mražení) dochází již při - 20 °C. To znamená, že by již nemělo docházet k dalšímu poklesu, který je ovšem patrný. Při - 20 °C se kromě čistého oleje zřejmě uvolňovaly i další chemické sloučeniny, které se pak při mínus 40 °C neuvolňovaly.

Tento fakt by bylo možno ověřit chemickou analýzou získaného oleje a popř. příměsí, která je nákladná. Masella a kol. (2019) uvádějí, že olej lisovaný z hluboce zmražených semen oliv se svým chemickým složením blíží panenskému oleji lisovanému za pokojové teploty, přestože má vyšší hodnotu peroxidů.

Pro provedení experimentu lze považovat zisk oleje pod  $-20^{\circ}\text{C}$  konstantní. Velký nárůst jednotkové energie při velmi nízkých teplotách je dán tuhostí lisované směsi a jak již zmíněno, téměř nulovým ziskem oleje.

**V oblasti I** dochází k poklesu energie. Předpokládá se spíše nárůst, neboť zmrazená směs semen je výrazně tužší. Velikost spotřebované energie ovlivňuje měrné teplo. Měrné teplo u olejů je o polovinu menší než u tuhých látek, cca polovinu měrného tepla vody ( $2,14 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ , měrné teplo ledu je  $2,04 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ , (Sweat, 1986). Dalším faktorem je tepelná vodivost, čím nižší teplota, tím vyšší je vodivost (závisí též na pórovitosti a orientaci vláken). Další faktor je entalpie. Je to veličina vyjadřující tepelnou energii uloženou v dané látce, referenční bod entalpie byl stanoven na  $-40^{\circ}\text{C}$ , kdy je entalpie 0. Entalpie se prudce mění zamrznutím vody, kolem  $0^{\circ}\text{C}$  -  $-5^{\circ}\text{C}$ , (Strochine R., 2000). Energie klesá také v důsledku vzniku ledových krystalů, které pothrávají buněčnou membránu. Jako efektivní metoda se ukázala metoda zmrazení a rozmrazování v cyklech (FT) s přidáním kyseliny chlorovodíkové (Phothiset, & Charoenrein, 2014), která pomůže zachovat kvalitu oleje.

Zmrazení a rozmrazení může způsobit značné strukturální změny v rostlinných tkáních díky tvorbě krystalových krystalů a změnám vnitřní síly a pH způsobeného koncentrací mrazu. To má za následek narušení membrán a rozpad molekul s vysokou molekulovou hmotností (Zhao, Dong, Li, Kong a Liu, 2015). Tento způsob je však pro řepku drahý, vyplatí se pro vzácné oleje. Bylo již publikováno, že ošetření rostlinných tkání pomocí FT prothrává buněčné membrány a buněčné stěny (Phothiset & Charoenrein, 2014), což umožňuje snadnější uvolňování oleje z vakuol a cestování přes uvolněnou rostlinnou tkáň.

**V druhé oblasti II** se jedná o ochlazování z běžné pokojové teploty na  $0^{\circ}\text{C}$ . Zisk oleje zde výrazně stoupá. Hlavní vliv na to má viskozita, která dosahuje v této oblasti maximální hodnoty. (Pirkl S., 2005) Viskozita, neboli odpor vůči tečení (Several, 2008), se snižuje s rostoucí teplotou. Spotřebovaná energie pro lisování také stoupá. Když se uvolní více oleje, je třeba větší energie, protože uvolněný olej zvyšuje odpor.

**V třetí oblasti (III)**,  $20^{\circ}\text{C}$  –  $60^{\circ}\text{C}$  dochází k nárůstu získaného oleje a nižší potřebě energie. Vliv na to má opět viskozita, která se stoupající teplotou klesá. (Pirkl, 2005). Mezi  $20^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$  dochází k nejintenzivnějšímu poklesu, pak klesá samozřejmě dál, ale méně intenzivně. Při vyšších teplotách se začíná také koagulovat protein (Adeeko a kol., 1990). Vyšší teplota také snižuje vlhkost, která se vypařuje.



Vyšší teplota rovněž zvyšuje tekutost, ničí bakterie a plísně, což může být také jedním z faktorů ovlivňující nižší potřebu energie (Danso-Boateng E., 2011).

Jako poslední byla vymezena **oblast IV**, 60 °C – 80 °C. Jedná se o oblast vysokých teplot. Vysoké teploty v případě lisování snižují kvalitu oleje. Zejména trans nenasycené mastné kyseliny, tokoferoly, zvyšují množství fosforu (Zhao a kol, 2012). Vysoká teplota také způsobuje odpařování vody, odpařuje se z povrchu semen směrem ke středu, voda pak ucpává póry. Získaný olej má jiné sensorické vlastnosti, jinou barvu. Jsou i jinak kyselé a mají (odlišné pH) a mají jiný index lomu.

Při vysokých teplotách dále vzniká peroxid, který také chemicky degraduje. Dává vzniknout počátku oxidace. Poté degradují mastné kyseliny a tuky. Pokud je dostatečná vlhkost, vytvoří se parný obal, který může degradaci zabránit. Veškeré tyto faktory uvádějí ve svých studiích (Danso – Boateng, 2011, Sirisoboon a kol., 2009, Ogusina a kol. 2008, Adeeko a kol. 1990).

Dále je několik dalších faktorů, které ovlivňují **všechny zobrazené oblasti**. Jedním z takových faktorů je průchod oleje buňkami (Cosgrove, 2005; Schopfer, 2001). Uvolněný olej má kladnou potenciální energii vzhledem k oleji uvolněnému, jedná se o nerovnovážný stav, který později přechází do stavu rovnovážného (hydraulické ztráty, kapilární síly). Vliv na tento faktor má tvar a velikost buňky, reologické vlastnosti, gradient tlaku, Darcyho zákon. Rostlinné buňky mají buněčnou stěnu, která odpovídá za mechanickou stabilitu. V závislosti na vývojové fázi se rostlinná buněčná stěna skládá z jedné nebo několika vrstev s různou tloušťkou a chemickou strukturou. Protoplasma rostoucí buňky je obvykle obklopena 0,1 – 1 μm tenkou primární buněčnou stěnou. Speciální uspořádání jednotlivých struktur primární buněčné stěny (celulózy, hemicelulózy, pektinu a strukturálních bílkovin) a makromolekulárního spojování během růstu umožňují rozšíření buněčné stěny bez prasknutí (Cosgrove, 2005; Schopfer, 2001).

Dalším faktorem je pasivní transport, přenos látek přes buněčnou membránu. Energie se nespotřebovává. Patří sem termální difuze a osmóza. Osmóza je druh transportu, při kterém přestupuje rozpouštědlo přes polopropustnou membránu z prostoru s méně koncentrovaným roztokem do prostoru s více koncentrovaným roztokem (Švíglerová, 2005). Osmotický tlak mezi částicemi představuje odpudivé síly a je právě v rovnováze s vnějším zatížením konsolidujícím tlakem (Feda, 1977).

Proces lisování dále ovlivňuje voda. Vodní aktivita je fyzikální pojem, který označuje obsah volné vody, vodní aktivita nabývá hodnot v rozmezí 0 až 1 a je nepřímo úměrná osmotickému tlaku. Volná voda je obsažena v mezibuněčných prostorech, vázaná voda je obsažena v buněčných stěnách.

Rostlinné materiály jsou porézní a hygroskopické povahy; proto obsahuje vodu ve třech formách, a to mezibuněčnou, intracelulární vodu a vodu z buněčných stěn. Mezibuněčná voda je známá jako kapilární voda nebo volná voda, která je méně omezená než intracelulární voda, považována za volně vázanou vodu (LBW) a vodu z buněčných stěn, která je považována za silně vázanou (SBW). Během zpracování potravin jako je sušení, smažení, ohřev a vaření je rozhodující optimalizace přenosu tepla a hmoty. (Khan a kol, 2016).

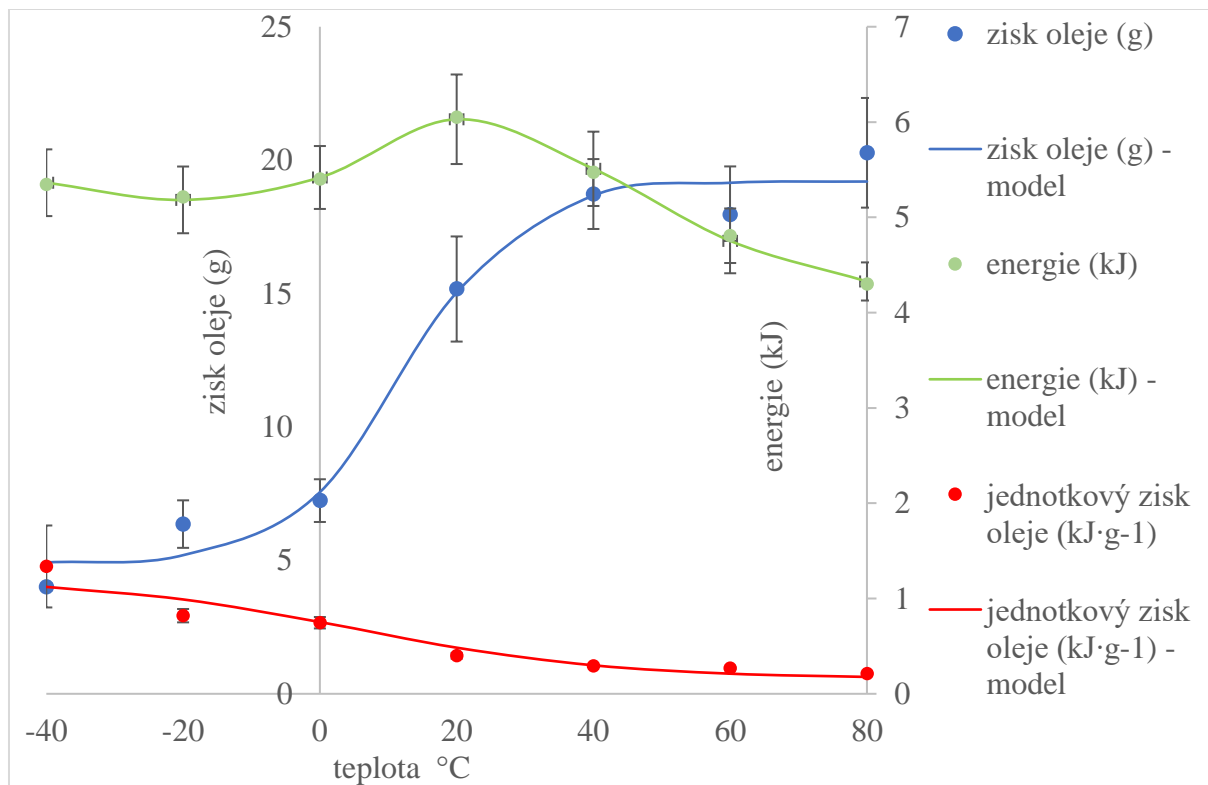
V další studii, (Khan a kol., 2017) výsledky potvrdily, že BW (vázaná voda) migruje po prasknutí buněčných membrán. Buněčné membrány praskají postupně v jednotlivých stádiích zvyšování teploty, neporuší se najednou. Dle této studie závisí deformace membrány hlavně na rychlosti penetrace tepelné energie a tlakovém gradientu mezi intracelulárním a mezibuněčným prostředím.

Lisování při různých teplotách ovlivňuje také latentní teplo. Teplo, které způsobuje změnu skupenství. Změna tekuté fáze na pevnou ( $0^{\circ}\text{C}$ )  $355 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , do páry  $2257 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $90 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  z pokojové teploty na  $0^{\circ}\text{C}$ , a na mrazení je to čtyřikrát tolik. (Storchine, 2000)

Faktorem, který také ovlivňuje všechny oblasti, je již zmíněná viskozita. Je zásadním parametrem míry odporu kapaliny vůči pohybu při působení smykového napětí. Existuje dynamická a kinematická viskozita a závisí na teplotě a tlaku. U olejů se při stálém tlaku snižuje s rostoucí teplotou, protože se snižují přitažlivé síly mezi molekulami. (Severa, 2008, Pirk, 2005)

### 5.1.1 Modely – vliv teploty na zisk oleje a množství energie

Obr. 33 ukazuje naměřená data proložená matematickým modelem, rov. 46, 47 a 48. Součástí modelu je statistická analýza.



Obr. 33 Matematický model pro zjištěné hodnoty

$$\xi(d, t) = \left[ \frac{d_0}{1+e^{-d_2 \cdot (t)}} + d_1 \right] \quad (46)$$

$$\xi(d, t) = \left[ \frac{d_0}{1+e^{-d_2 \cdot (t)}} + d_1 \right] \cdot \left[ \frac{d_3}{1+e^{-d_5 \cdot (t)}} + d_4 \right] \quad (47)$$

$$\xi(d, t) = \left[ \frac{d_0}{1+e^{-d_2 \cdot (t)}} + d_1 \right] \quad (48)$$

Hodoty pro matematický model pro jednotlivé parametry jsou uvedeny v tab. č. 3.

Tab. 3 Hodnoty modelu pro jednotlivé parametry rovnice

	d <sub>0</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	t	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>
zisk oleje (g)	19,20 (g)	4,90 (g)	0,12 (K <sup>-1</sup> )	12,48			
energie (kJ)	4,15 (g)	3,73 (g)	0,096 (K <sup>-1</sup> )	11,82	-1,003 (kJ·g <sup>-1</sup> )	1,511 (kJ·g <sup>-1</sup> )	0,046 (K <sup>-1</sup> )
jednotkový zisk (kJ·g <sup>-1</sup> )	0,158 (kJ·g <sup>-1</sup> )	1,21 (kJ·g <sup>-1</sup> )	0,053 (K <sup>-1</sup> )	5			

Součástí modelu je statistická analýza, která je uvedena v tab. č. 4.

Tab. 4 Statistická analýza ANOVA

	F (-)	F <sub>krit</sub> (-)	P <sub>hodnota</sub> (-)	R <sup>2</sup>
zisk oleje (g)	$1,01 \cdot 10^{-14}$	4,747	0,988	0,982
energie (kJ)	$3,20 \cdot 10^{-15}$	4,747	0,981	0,981
jednotkový zisk oleje (kJ.g <sup>-1</sup> )	$5,87 \cdot 10^{-15}$	4,747	0,986	0,924

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 4) vyplývá, že naměřené hodnoty zisku oleje, energie a jednotkového zisku a výsledky získané z jednotlivých modelů (rov. 47, 48, 49) jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F<sub>krit</sub> byly vyšší než hodnoty F (hodnota F – testu) pro všechna měření a hodnoty P<sub>hodnota</sub> (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R<sup>2</sup>.

Křivku zisku oleje lze popsat pomocí tranzitní křivky, viz. obr. č. 31, kde jsou získané hodnoty proloženy matematickým modelem. Tranzitní křivka je známa z materiálového inženýrství, zobrazují se s ní přechody mezi křehkou a houževnatou oblastí (Janovec J., Cejp, 2014). Podobnost křivky pro zisk oleje je jak v tvaru, tak ve vymezení třech oblastí. Z tvaru modelu (křivky) je zřejmé, že fáze mražení zisk oleje za spodním ohybem křivky již zisk oleje nemění, zhruba od stejně tak za horním ohybem křivky od teploty kolem 45 °C již lze přepokládat konstantní zisk oleje. Množství se s rostoucí teplotou ještě o něco zvýší (Gürdil G. a kol. 2020, Ng H. a kol. 2020), ale chemické složení bude, dle publikovaných informací, velmi ovlivněno vysokými teplotami a v oleji budou uvolněny další látky.

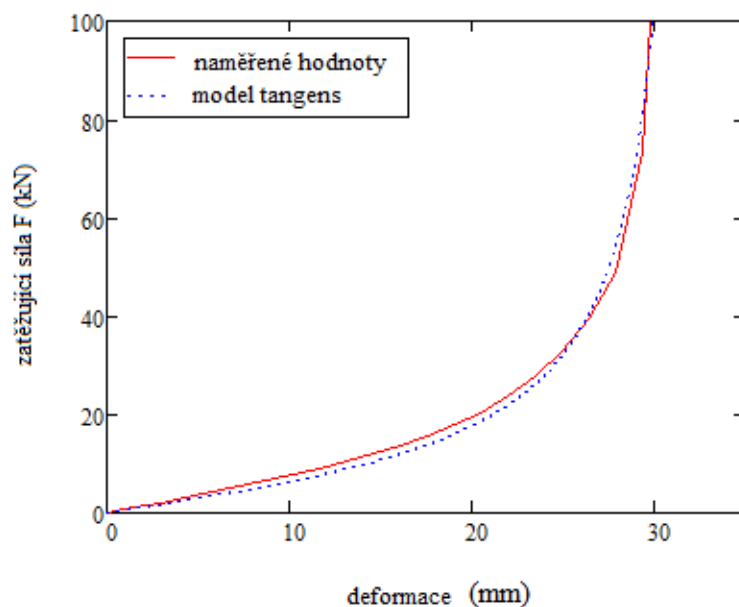
Model energie ukazuje nejvyšší hodnotu kolem teploty 20 °C, tedy v běžných podmínkách. Pokles energie má příčinu hlavně ve viskozitě, která klesá s vyšší teplotou (Severa, 2005). V oblasti mražení má vliv na energii tvrdnutí obalu semene, zmrazený obal se stane křehčím a snadněji praskne. Zároveň je možné, že prasknutí obalu vytvoří ostrou hranu která může naříznout olejonosné buňky. Další vlivy na energii byly podrobněji popsány v přechozí kapitole.

Model jednotkové energie dokládá, že největší množství energie vzhledem k zisku oleje bude u mražení směsi semen. Nejméně energie na jednotku oleje bude spotřebováno u vyšších teplot. Je třeba stanovit požadovanou kvalitu oleje. Např. ve studii (Gurdil G., 2020) byla provedena základní chemická analýza množství peroxidu a nenasycených mastných kyselin.

Nízká hodnota peroxidu znamená, že oleje jsou nasycenější, což značí vyšší kvalitu oleje (Chatepa L.E.C a kol 2019, Okene, E.O. a kol. 2019, Adejumo B.A. a kol. 2013). Přítomnost vysokého počtu mastných kyselin v rostlinném oleji a mnohočetné možnosti jejich kombinace s glycerolem činí z rostlinných olejů velmi složité směsi s výrazně odlišnými strukturami a vlastnostmi (Gomna, A. a kol, 2019, Aksoy F. a kol. 2014). Vysoké hladiny nenasycených mastných kyselin v olejích lze přičíst nečistotám, které by mohly způsobit hydrolýzu esterové vazby (Nkafamiya I. A kol., 2010)

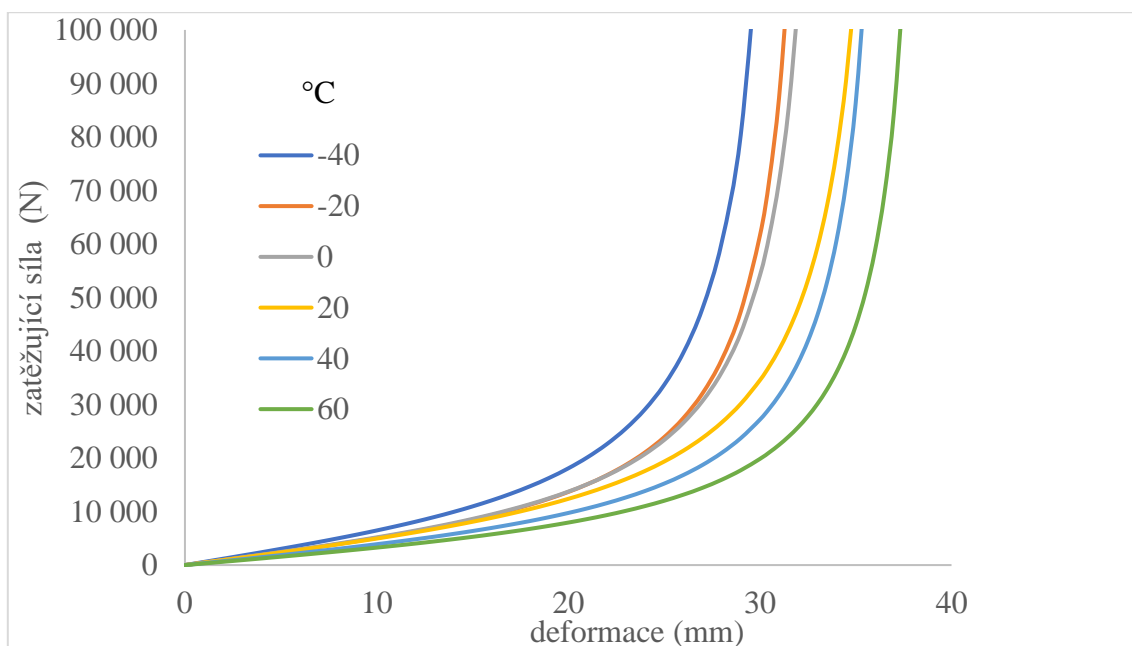
## 5.1.2 Tangentní modely

Tangentní modely vychází ze základního tvaru průběhu lisování, viz. obr. 34, který ukazuje naměřená data a tangentní model z naměřených dat vycházející.



Obr. 34 Ukázka naměřené hodnoty vs. model tangens

Již naměřené hodnoty značně křivky tangens připomínají, viz. obr. 34. Křivky tangens jsou zobrazeny hned na dalším obrázku – obr. č. 35.



Obr. 35 Modely tangens pro lisování při odlišných teplotách

Matematická rovnice, která popisuje křivku tangens je rov. 49.

$$F(x) = A \cdot [\tan(B \cdot x)]^n \quad (49)$$

Koeficienty  $A$  a  $B$  jsou uvedeny pro jednotlivé teploty v tabulce č. 5.

Tab. 5 Koeficienty modelu tangens -  $A$  a  $B$

Teplota °C	$A$ (N)	$B$ (mm <sup>-1</sup> )	$F$ (-)	$F_{\text{krit}}$ (-)	$P_{\text{hodnota}}$ (-)	$R^2$ (-)
-40	$1,21 \cdot 10^4$	0,049	$7,176 \cdot 10^{-3}$	4,073	0,933	0,99
-20	$9,98 \cdot 10^3$	0,047	0,01	4,052	0,919	0,994
0	$1,05 \cdot 10^4$	0,046	$7,507 \cdot 10^{-3}$	4,043	0,931	0,996
20	$1,11 \cdot 10^4$	0,042	0,01	4,073	0,921	0,994
40	$8,73 \cdot 10^3$	0,042	$7,49 \cdot 10^{-3}$	4,052	0,931	0,997
60	$7,71 \cdot 10^3$	0,04	$2,697 \cdot 10^{-3}$	4,043	0,959	0,998
80	$7,48 \cdot 10^3$	0,043	$3,755 \cdot 10^{-3}$	4,052	0,951	0,999

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 5) vyplývá, že naměřené hodnoty zisku oleje, energie a jednotkového zisku a výsledky získané z jednotlivých modelů (rov. 50) jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty  $F_{\text{krit}}$  (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty  $F$  (hodnota  $F$  - testu) pro oba koeficienty a hodnoty  $P_{\text{hodnota}}$  (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace  $R^2$ .

Jak je z grafu patrné, při zvyšující se teplotě se křivky posunují směrem doprava. Zvyšuje se maximální deformace. Výjimkou je křivka pro 80 °C, která má odlišný tvar. Je to způsobeno vysokou teplotou, při které již dochází k destrukci buněčné stěny, které je popsáno výše.

Modely tangens byly použity v několika studiích, zejména na *Jatropha Curcas* (Kabutey a kol., 2013a; Divišová a kol., 2014; Herák D. a kol., 2014, Petrů M. a kol., 2014; Sigalingging R. a kol., 2014) Např. studie (Herák D. a kol., 2013), zjistila, že tvar deformační křivky je ovlivněn velikostí porozity, počáteční tuhostí lisované směsi.

V další studii použili software MathCAD 14 s algoritmem Levenberg – Marquardt poskytuje velmi jednoduchý matematický algoritmus pro tvorbu matematického modelu kopírující křivku tangens. Software MathCAD nevyžaduje, na rozdíl od simulačních programů, např. metody konečných prvků (Petrů a kol., 2012) vysokou kapacitu paměti počítače.

### 5.1.3 Reologické modely stlačování – vliv teploty

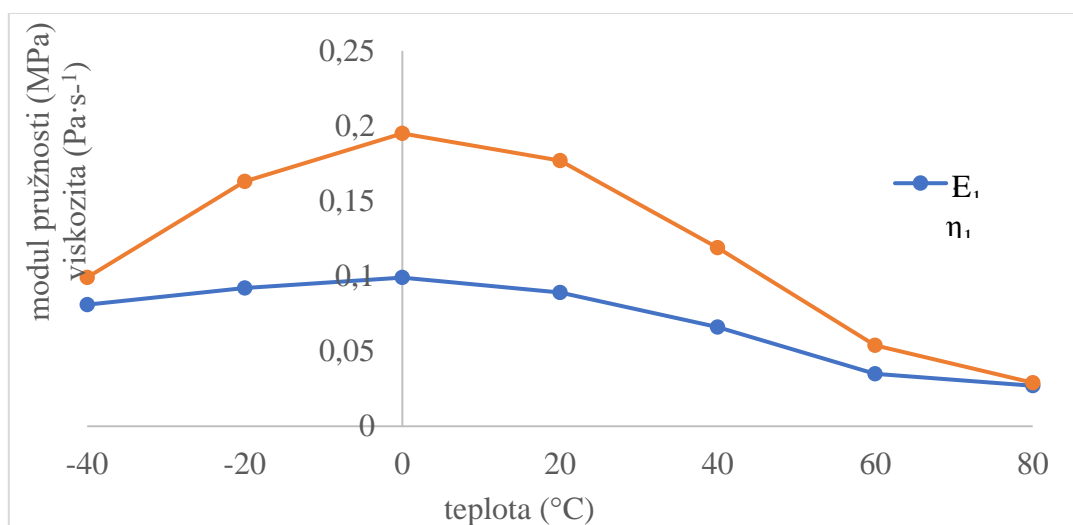
K popisu mechanického chování zde byly dále použity reologické modely. Jako nejvhodnější se ukázal dvouvětvý reologický model, který má v obou větvích jak viskózní, tak elastický člen. V tab.6 jsou uvedeny hodnoty pro jednotlivé větve modelu a statistickou analýzu ANOVA.

Tab. 6 Tabulka reologického modelu

Teplota (°C)	$E_1$ (MPa)	$\eta_1$ (Pa·s <sup>-1</sup> )	$E_2$ (MPa)	$\eta^2$ (Pa·s <sup>-1</sup> )	F (-)	$F_{krit}$ (-)	$P_{hodnota}$ (-)	$R^2$ (-)
-40	0,081	0,099	$0,01 \cdot 10^{-13}$	$0,01 \cdot 10^{-13}$	$1,237 \cdot 10^{-3}$	4,073	0,972	0,998
-20	0,092	0,163	$3,88 \cdot 10^{-12}$	$4,25 \cdot 10^{-13}$	$2,545 \cdot 10^{-5}$	4,052	0,996	0,998
0	0,099	0,195	$3,75 \cdot 10^{-10}$	$4,94 \cdot 10^{-11}$	$1,143 \cdot 10^{-5}$	4,043	0,997	0,998
20	0,089	0,177	$1,34 \cdot 10^{-11}$	$1,69 \cdot 10^{-12}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	4,073	0,992	0,998
40	0,066	0,119	$1,02 \cdot 10^{-11}$	$1,32 \cdot 10^{-12}$	$9,368 \cdot 10^{-5}$	4,052	0,992	0,997
60	0,035	0,054	$2,21 \cdot 10^{-8}$	$4,22 \cdot 10^{-9}$	$1,098 \cdot 10^{-5}$	4,043	0,997	0,997
80	0,027	0,029	$3,85 \cdot 10^{-9}$	$6,18 \cdot 10^{-10}$	$1,575 \cdot 10^{-5}$	4,052	0,997	0,998

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 6) vyplývá, že naměřené hodnoty stlačování a výsledky získané z jednotlivých modelů pro různé teploty jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty  $F_{krit}$  (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota  $F_{testu}$ ) pro všechna měření a hodnoty  $P_{hodnota}$  (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace  $R^2$ .

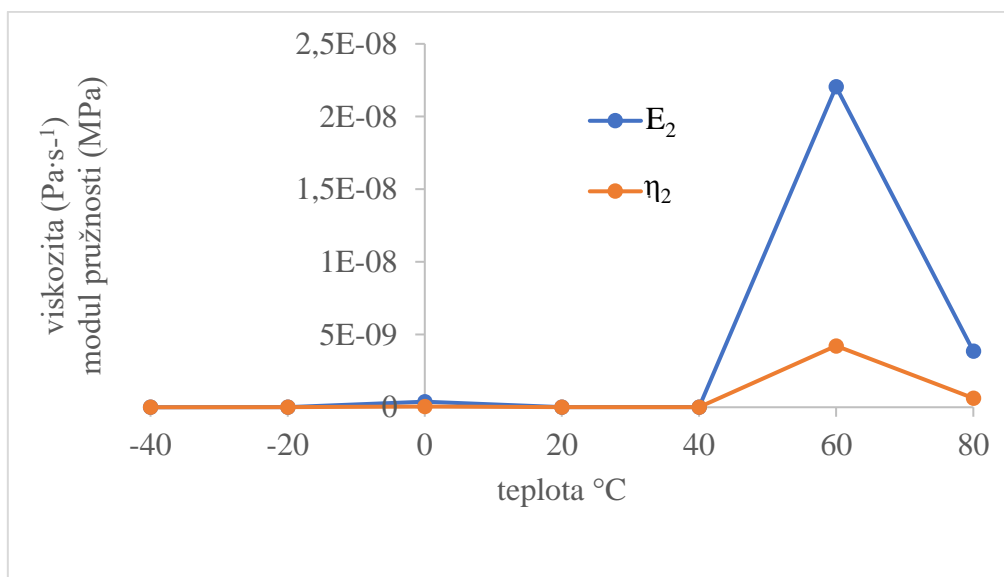
Na dalších obrázcích budou vyobrazeny jednotlivé větve modelu, obr. 36 a 37. Model je, jak zmíněno dvouvětvý, každá větev bude vyhodnocena zvlášť.



Obr. 36 První větev reologického modelu, vliv teploty

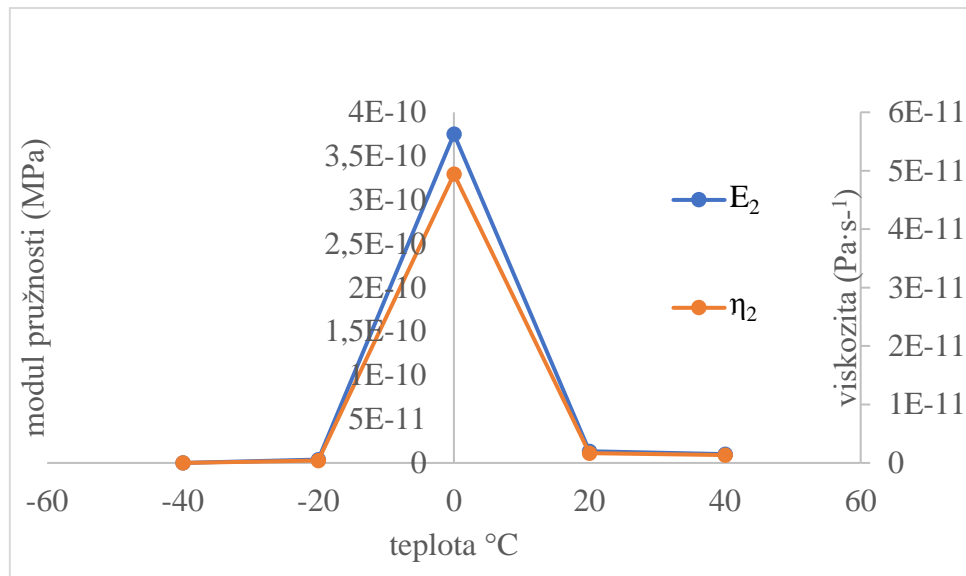


Na obr. 37 jsou vyobrazeny hodnoty první větve reologického modelu, která je kombinací Hookova elastického členu a viskózního Newtonova členu. Hodnoty ukazují, že obě části první větve modelu mají pro elastickou i viskózní část řádově stejné hodnoty. Hodnoty  $E$  (MPa) rostou od nízkých teplot, nejvyšší hodnoty dosahují v  $0\text{ °C}$ , poté opět klesají. Stejně tak i hodnoty  $\eta$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ).



*Obr. 37 Druhá větev modelu, vliv teploty*

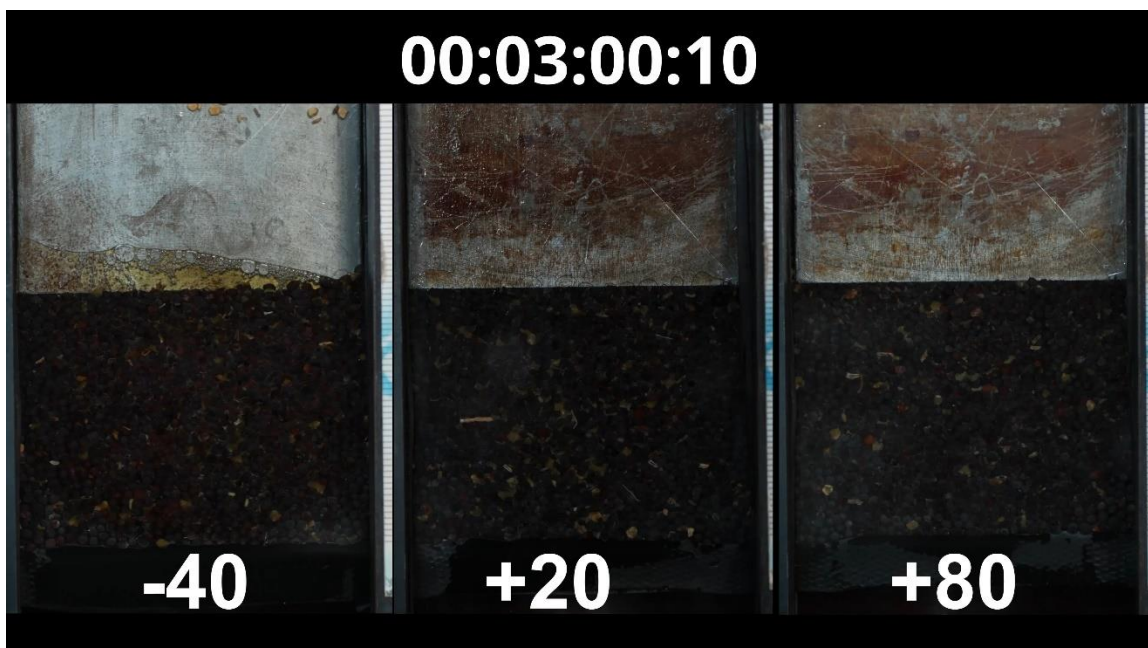
Na obr. 38 jsou vyobrazeny hodnoty druhé větve reologického modelu, která je rovněž kombinací Hookova elastického členu a viskózního Newtonova členu. Hodnoty ukazují, že u druhé větve modelu se pro elastickou i viskózní část hodnoty řádově liší. První drobnější odchylku lze pozorovat v bodě nula. Velký rozdíl hodnot je patrný od  $40\text{ °C}$  –  $80\text{ °C}$ . Odchylku kolem bodu nula ukazuje detail grafu, viz. obr. 37.



Obr. 38 Druhá větev modelu, detail

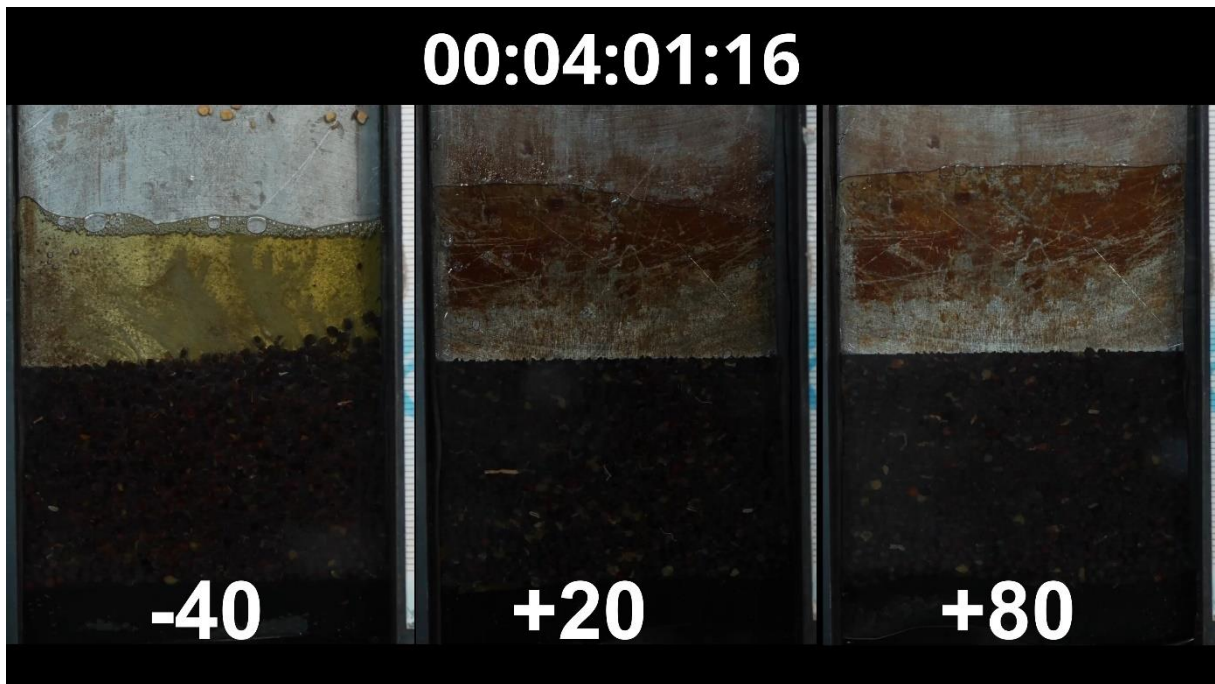
#### 5.1.4 Body olejnatosti

Body olejnatosti byly zjištěny vizuální metodou. Viz. obr. 39, kde je vidět první olej, který se začal uvolňovat. Experiment měl ukázat rozdíl v bodu olejnatosti při dvou extrémních teplotách. Ukázalo se, že není téměř žádný rozdíl mezi počátečním bodem olejnatosti při nízkých a vysokých teplotách. Body olejnatosti se již zabývala studie, (Herák a kol., 2010). V této studii byly stanoveny horní a dolní body olejnatosti, kdy dolní bod olejnatosti byl stanoven na 40 % relativní deformace a horní bod olejnatosti na 88 % relativní deformace.



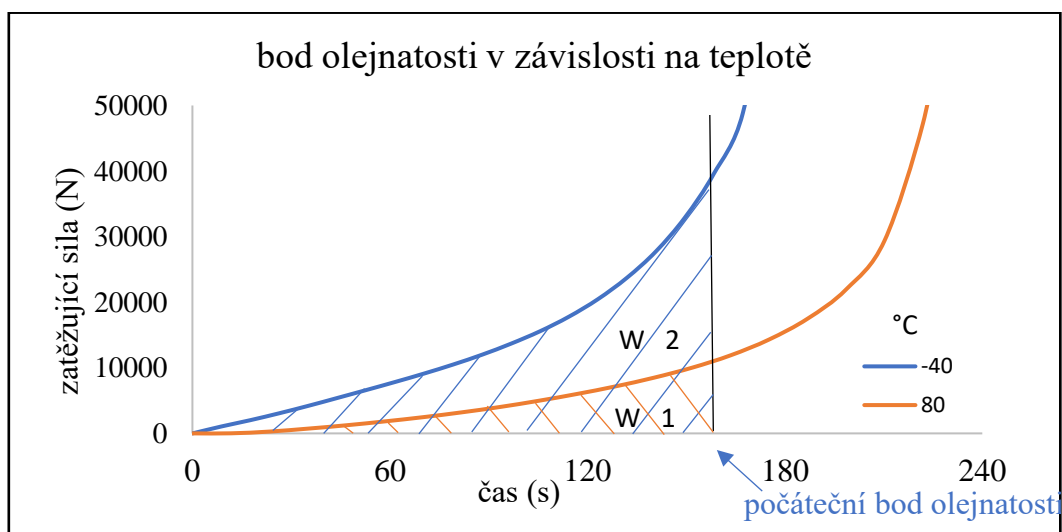
Obr. 39 Počáteční body olejnatosti při 80 °C a -40 °C

Další obrázek, obr. č. 40 ukazuje stav produkce oleje před ukončením experimentu. Je zde patrné, že ohřátá semena se snadněji deformují (lze pozorovat průnik semen mezi píst lisovací nádoby a skleněné desky). (Cosgrove, 2005; Schopfer, 2001; Bargale, 1997)



Obr. 40 Ukázka uvolnění oleje před koncem experimentu

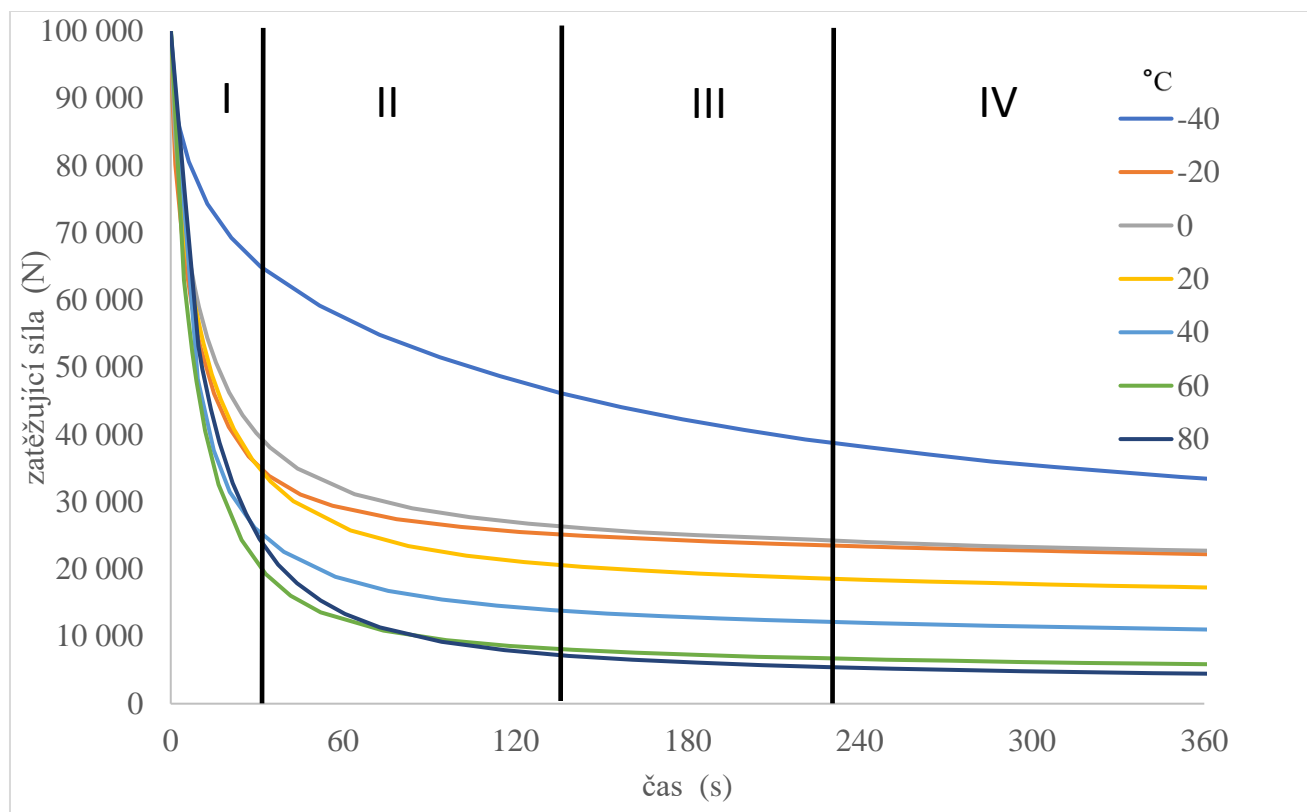
Prakticky lze říci, že se bod olejnatosti neposouvá v ose x, na které je čas, ale pouze v ose y. Samozřejmě se mění energie, protože bod olejnatosti se v ose y posouvá nahoru a plocha pod křivkou, kterou je energie, je větší, viz. obr. 41. To znamená, že se mění energie (plocha pod křivkou W1 a W2). Plocha W2 je výrazně větší, proto bude i větší spotřebovaná energie.



Obr. 41 Bod olejnatosti – energie

## 5.2 Vliv teploty – relaxace

Stejně jako u stačování má vliv teplota i na relaxaci, která probíhala po ukončení stlačování při hodnotě 100 kN.

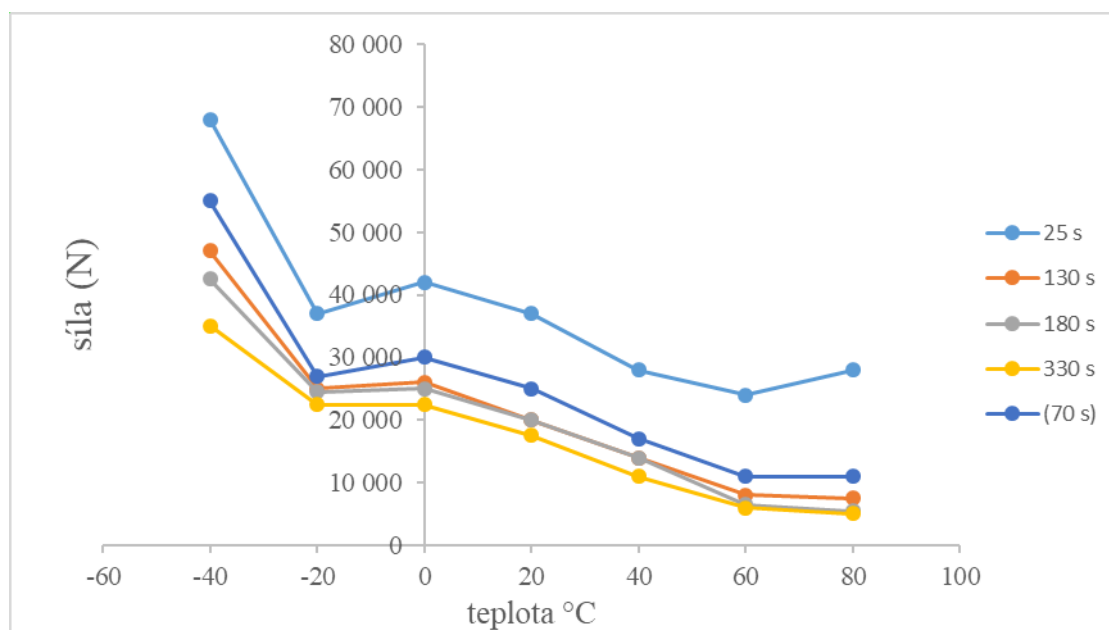


Obr. 42 Relaxační křivky – vliv teploty

Relaxační křivky mají pro všechny teploty podobný tvar, obr. 42. Výjimku tvoří relaxační křivka pro stačování směsi o teplotě  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kdy nedochází k tak významnému poklesu síly, což je způsobeno tuhostí směsi. Při této teplotě dochází k zisku oleje blížíci se nule. Tudíž má směs téměř původní objem. Navíc byla ochlazená na velmi nízkou teplotu. Byla ochlazená jak směs semen, tak i nádoba. Proto směs semen zůstala po celou dobu lisování velmi tuhou a měla větší odpor. Další zajímavostí je překryv křivek pro  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Křížení křivky je dáno velmi vysokou teplotou, jak již zmíněnou změnou buněčného stavu.

Pro lepší vysvětlení relaxace byla křivka rozdělena opět do několika oblastí. V oblasti I je patrný velký pokles síly, která je dána velkou zbytkovou energií. V oblasti II dochází také k poklesu síly. V této oblasti je patrný ohyb křivky pro všechny teploty. Je to tedy oblast poklesu síly a začínajícího ustalování. To oblast třetí lze považovat za relativně ustálenou, např. Herák a kol. 2014 považovali konstantní část od 100 s.

V tomto experimentu lze pozorovat při různých teplotách ještě i v třetí oblasti mírný pokles a za ustálenou lze považovat až oblast IV. Zejména kvůli experimentu při velmi nízkých teplotách. Pokud by byla vynechána tato teplota, lze v běžné praxi počítat s ustálením síly zhruba od 180 s.



Obr. 43 Provnání relaxace (vliv teploty) v rozdílných časech

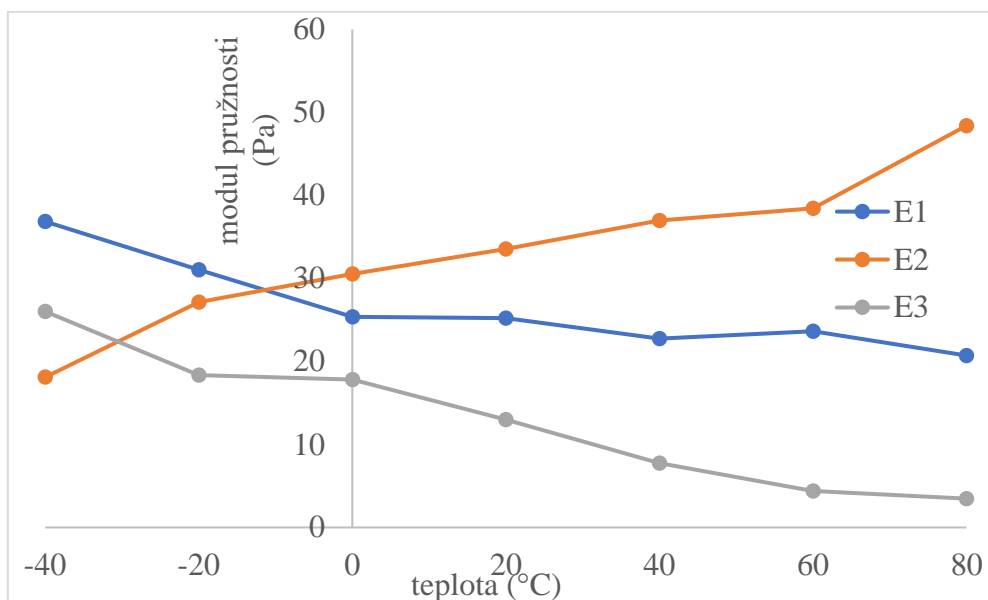
Obr. 43 zobrazuje závislost relaxace směsi v rozdílných teplotách v závislosti na čase. Vychází z grafu relaxace – z hranic pro jednotlivé oblasti. Jednotlivé křivky ukazují relaxaci v určitém čase. Jejich průběh v počátečním čase je dán tuhostí směsi semen, která je největší při nízké teplotě.

Pro relaxaci byl rovněž vytvořen reologický model, viz. tab. č. 7, součástí je statistická analýza. Reologický model obsahuje pro relaxaci tři větve. Dvě větve jsou kombinací Hookova elastického členu a viskózního Newtonova členu, jedna obsahuje pouze Hookův elastický člen.

Tab. 7 Reologický model – vliv teploty, relaxace

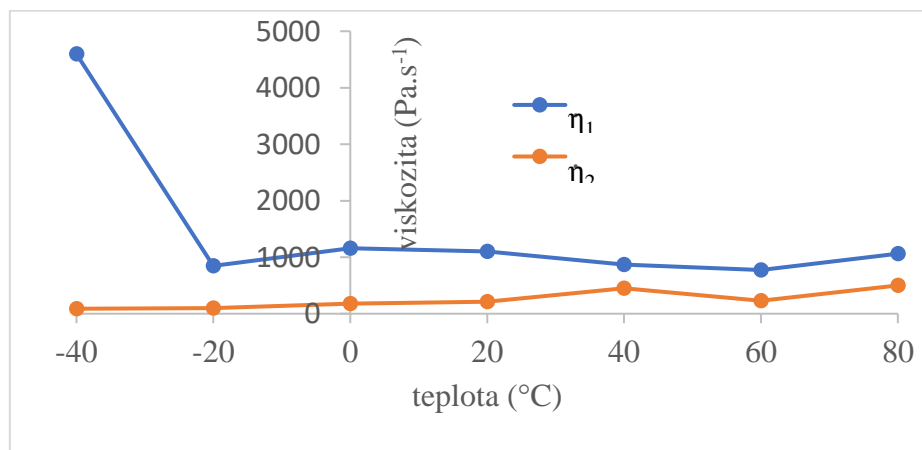
Teplota °C	E <sub>1</sub> (MPa)	E <sub>2</sub> (MPa)	E <sub>3</sub> (MPa)	η <sub>1</sub> (Pa·s <sup>-1</sup> )	η <sub>2</sub> (Pa·s <sup>-1</sup> )	F (-)	F <sub>krit</sub> (-)	P <sub>hodnota</sub> (-)	R <sup>2</sup> (-)
-40	36,86	18,11	26,02	4596	88	6,35·10 <sup>-14</sup>	4,043	0,999	0,997
-20	31,04	27,16	18,36	847	98	2,801·10 <sup>-14</sup>	4,001	0,998	0,997
0	25,36	30,53	17,83	1161	179	0	3,982	0,999	0,998
20	25,23	33,54	12,99	1100	211	2,787·10 <sup>-14</sup>	3,996	0,999	0,999
40	11,74	50,68	7,74	867	448	0	4,043	0,999	0,998
60	23,62	38,45	4,41	774	232	-1,028·10 <sup>-14</sup>	4,034	0,999	0,999
80	20,72	48,41	3,47	1065	501	-6,256·10 <sup>-15</sup>	4,02	0,999	0,999

Z uvedené tabulky byl vytvořen graf na obr. č. 44, kde jsou porovnávány elastické části větví reologického modelu. Je patrné, že v první a třetí větvi s rostoucí teplotou klesá modul pružnosti, ve druhé větvi má rostoucí trend.



Obr. 44 Koeficienty elasticity reologického modelu

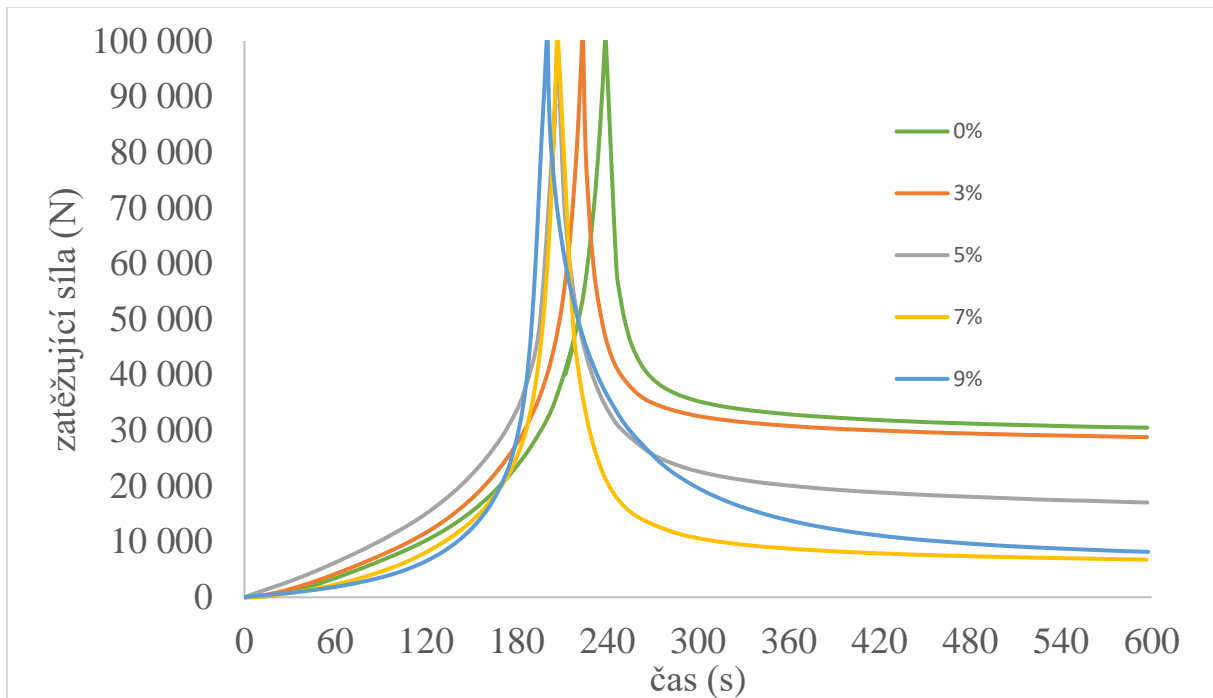
Ze stejné tabulky, viz. tab.7, vychází i další graf (obr. 45), kde jsou porovnány viskózní části větví modelu. Z grafu je patrné, že u první větve modelu je prudký pokles viskózní části z teploty -40 °C na teplotu -20 °C. Tato větev bude výrazněji zasahovat do modelu ze začátku relaxace. U této větve lze dále pozorovat mírný vzestup kolem teploty 0 °C, poté mírný pokles a malý vzestup při teplotě 80°C. Druhou větev modelu lze považovat za mírně rostoucí do 40 °C. Pro poslední dvě teploty 60 °C a 80 °C mají větve totožný trend.



Obr. 45 Koeficienty viskozity reologického modelu

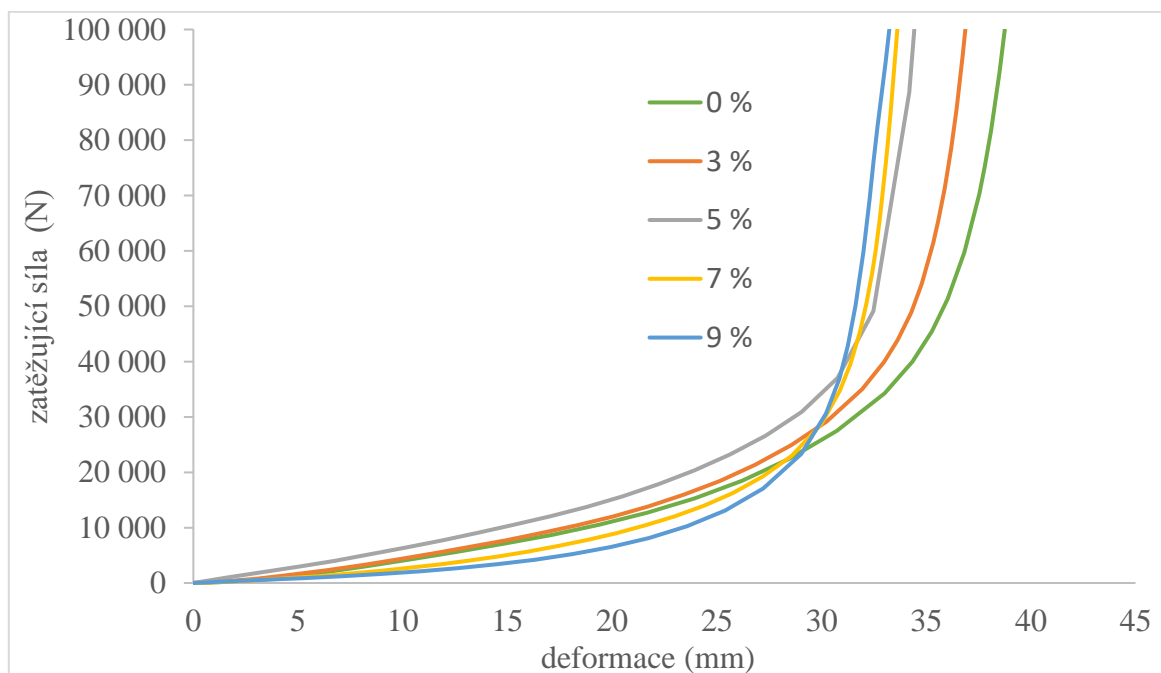
### 5.3 Vliv vlhkosti – kompresní zkouška

Stejný experiment, jako pro různé teploty, byl proveden i pro různé vlhkosti. Pro vlhkosti 0 %, 3 %, 5 %, 7 % a 9 % (w.b.). Obr. č. 46 ukazuje průběh kompresní zkoušky včetně relaxace.



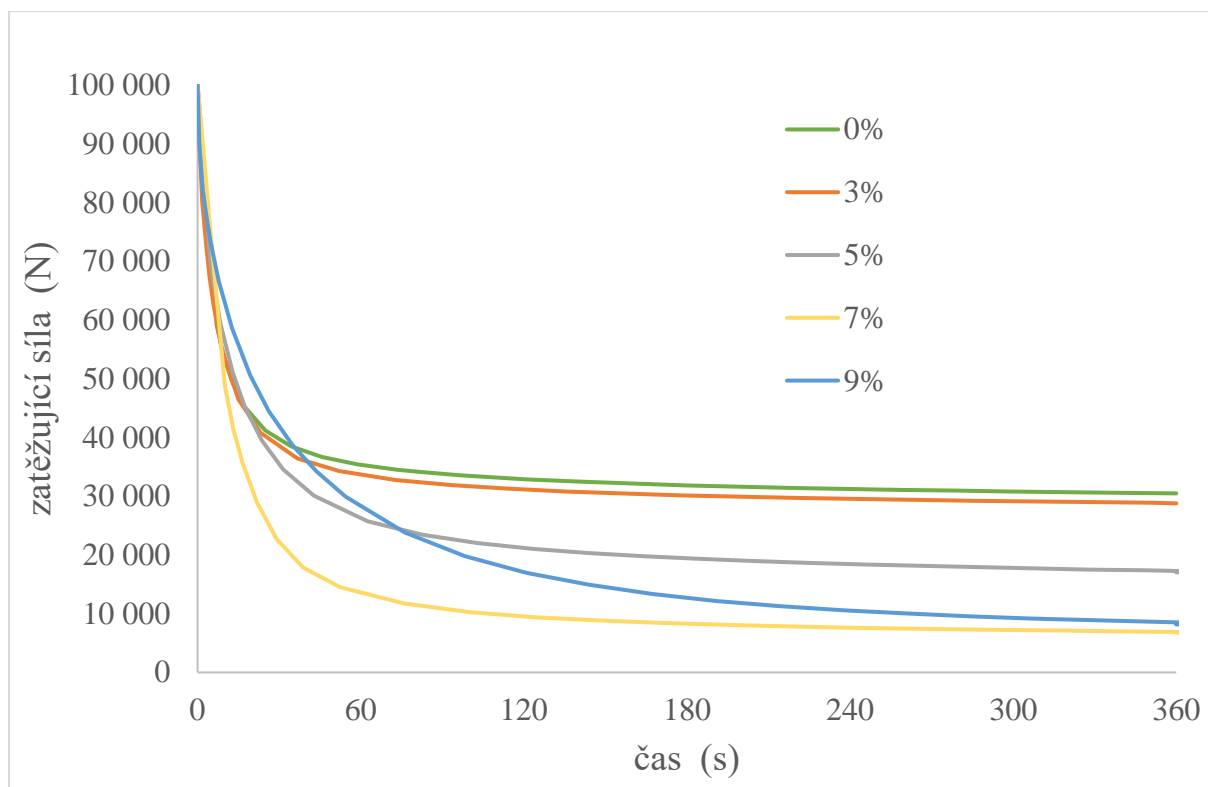
Obr. 46 Průběh lisování, komprese a relaxace, různé hodnoty vlhkosti

Křivka byla opět rozdělena na dvě části – stlačování a relaxaci. Na obr. č. 47 je zobrazena první část křivky – stlačovací fáze.



Obr. 47 Naměřené hodnoty pro různé vlhkosti, fáze komprese

Na dalším obrázku, viz. obr. č. 48, jsou zobrazeny křivky relaxace.



Obr. 48 Naměřené hodnoty pro různé vlhkosti, fáze relaxace

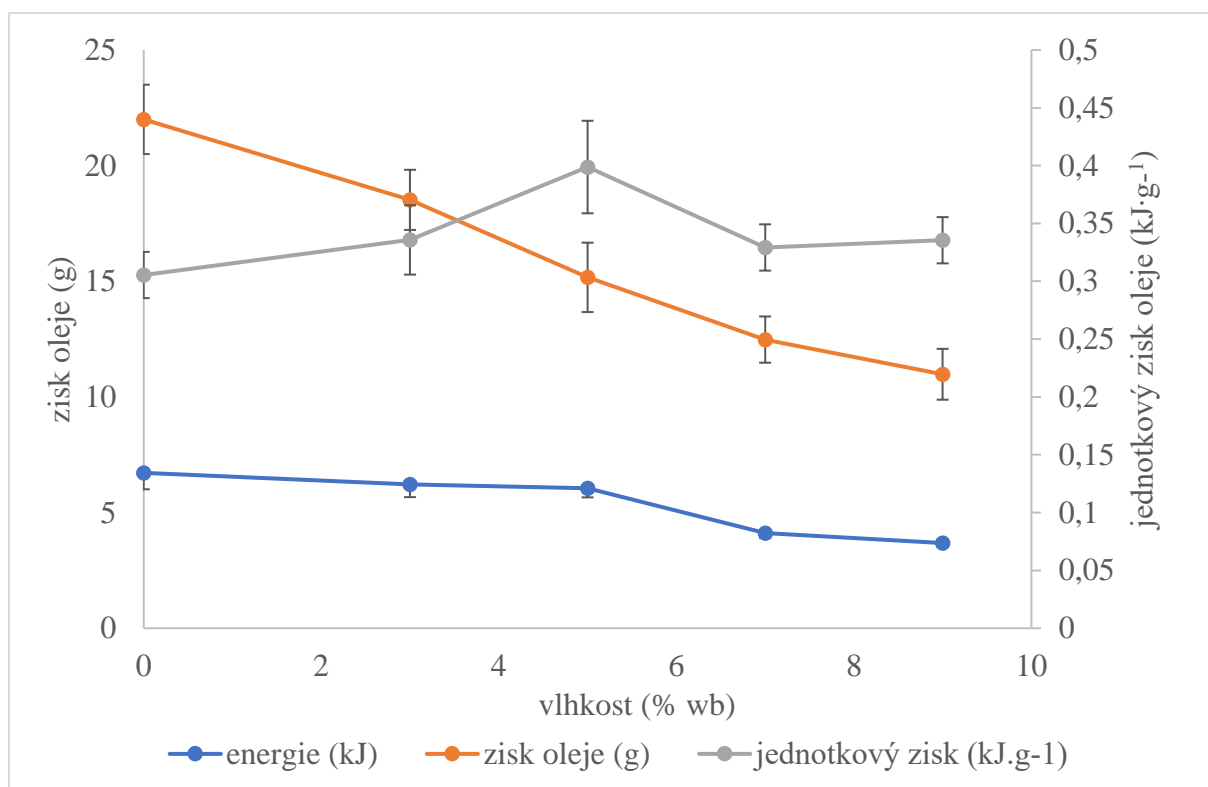
Pro různé hodnoty vlhkosti byly opět zjištěny hodnoty pro energii, zisk oleje a jednotkový zisk oleje, viz. tab. č. 8.

Tab. 8 Zjištěné hodnoty pro lisování při různých vlhkostech

vlhkost (wb)	energie (kJ)	zisk (g)	jednotkový zisk ( $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ )
0 ± 0,5 %	6,719 ± 0,51	22,05 ± 1,5	0,305 ± 0,02
3 ± 0,5 %	6,219 ± 0,65	18,52 ± 1,3	0,336 ± 0,02
5 ± 0,5 %	6,050 ± 0,59	15,17 ± 1,5	0,399 ± 0,02
7 ± 0,5 %	4,109 ± 0,31	12,48 ± 1,0	0,329 ± 0,02
9 ± 0,5 %	3,684 ± 0,37	10,98 ± 1,1	0,336 ± 0,02

Hodnoty z tabulky ukazuje graf, viz. obr. č. 49. Z grafu je patrné, že zisk oleje s rostoucí hodnotou vlhkosti klesá. Energie zůstává pro 0, 3 a 5 % (wb) relativně stejná. Pokles je u 7 a 9 % (wb). Jednotkový zisk má rostoucí trend do 5 % (wb), v hodnotě 7 % (wb) je nižší a poté mírně stoupne v hodnotě 9 % (wb).





Obr. 49 Porovnání parametrů experimentu v závislosti na vlhkosti

Energie i zisk oleje se zmenšují s rostoucí vlhkostí. Semena se zvyšující se vlhkostí ztracují tuhost, proto klesá i energie potřebná k lisování. Výsledky ukazují, že semena s vyšším obsahem vlhkosti poskytla méně oleje ve srovnání s jádrem s nižším obsahem vlhkosti.

Ke stejnému závěru došli již (Farsie a Singh 1985), kteří uváděli maximální využití oleje u slunečnicových semen vyjádřených při obsahu vlhkosti 6 % (wb) (Orhevba a kol. 2013) uvádějí nejvyšší zisk při vlhkosti semen 8,1 %, nejnižší při vlhkosti okolo 15% (wb). Optimální vlhkosti se pro různé plodiny liší, např. (Southwell a kol., 1990) konstatovali, že vlhkost kolem 9 % je optimální pro lisování avokáda, (Sivala a kol., 1991) uvádí, že obsah vlhkosti vyšší než 9 % u řepky nepříznivě ovlivňuje výtěžek oleje, zatímco pro zisk rýžového oleje je vhodná vlhkost rýžových otrub 10 % a 11 %.

Akinoso a kol. (Akinoso a kol., 2006) uvádí, že obsah vlhkosti má největší vliv na výtěžek sezamového oleje, ke zvýšení výtěžnosti oleje je třeba snížit obsah vlhkosti. (Young a kol., 1982 a Tunde-Akintunde a kol., 2000) použili matematické modely k predikci lisování oleje ze sezamových semen a sójových bobů. Autoři také zjistili, že obsah vlhkosti měl největší vliv na výtěžek oleje. (Ferchau, 2000; Owolarafe a kol., 2003) a (Ogunsina a kol., 2008) všichni shodně konstatují, že obsah vlhkosti nejvhodnější pro šnekový lis je obvykle v rozmezí 7 – 8 %. (Singh a kol. 2002) uvedli, že nižší vlhkost vede k nižšímu množství sedimentu v oleji.

Autoři dále zjistili, že výtěžnost oleje z vlhčených a na slunci sušených semen lnu vzrostla ze 78 % na 88 %, zatímco obsah vlhkosti vzrostl z 5 % na 7 %. Při obsahu vlhkosti 9 % se však výtěžnost oleje snížila na 76 %. Autoři vysvětlili, že vyšší obsah vlhkosti zvyšuje plasticitu a tím se snižuje úroveň stlačování. Dalším vysvětlením bylo, že vlhkost působila jako mazivo v lisovací nádobě, takže vyšší obsah vlhkosti vedl k nedostatečnému tření během lisování (Hoffmann, 1989; Singh a Bargale, 1990; Reuber, 1992). (Kibar a Ozturk, 2008) uvádějí, že úhel vnitřního tření a statický koeficient se zvyšuje při tření na dřevěných plochách, betonu a oceli tehdy, když se zvyšuje vlhkost. Tato závislost je dána zvýšenou přilnavostí semen k povrchům materiálů při vysoké vlhkosti.

### 5.3.1 Modely – vliv vlhkosti

Pro lisování při různých vlhkostech byl stanoven matematický model, viz. rov. č. 51, 52, 53 a tab. č. 9.

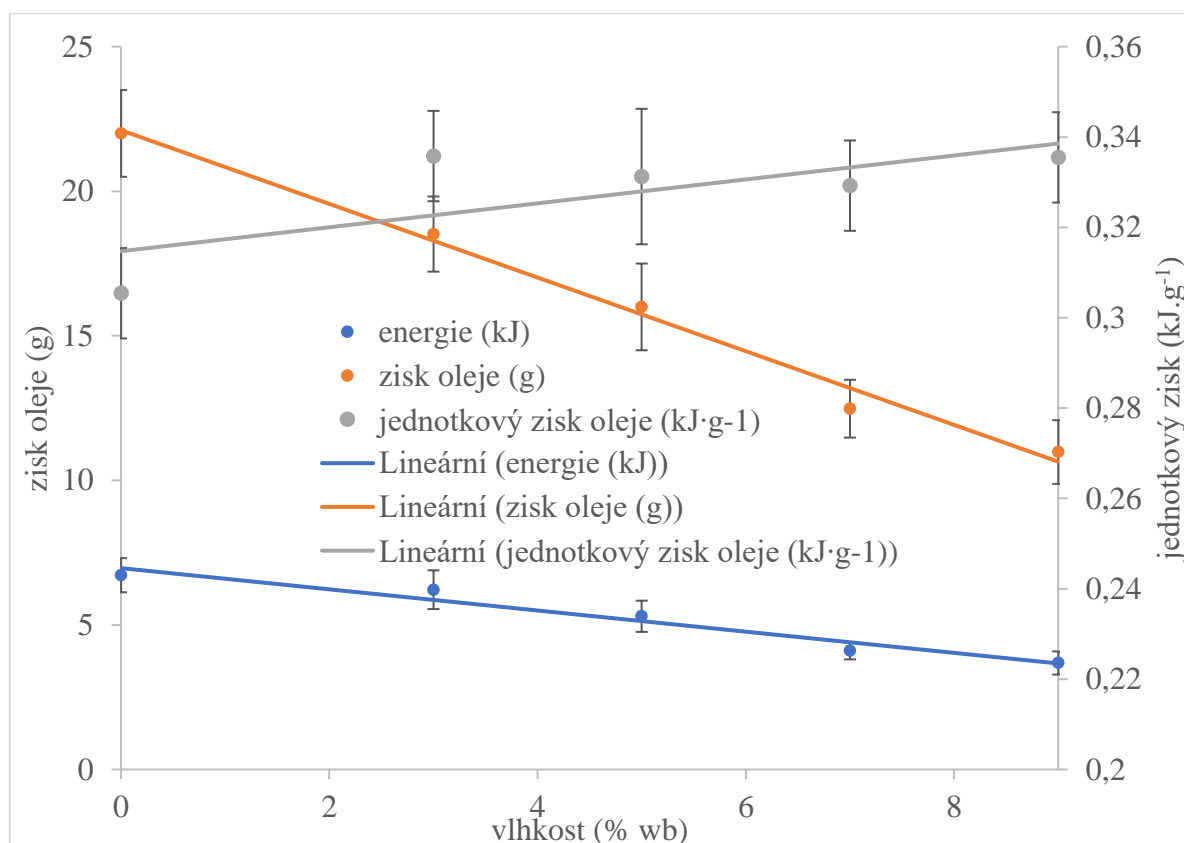
$$\xi(d, t) = d_0 \cdot t + d_1 \quad (51)$$

$$\xi(d, t) = d_0 \cdot t + d_1 \quad (52)$$

$$\xi(d, t) = d_0 \cdot t + d_1 \quad (53)$$

Tab. 9 Hodnoty pro zjištěný matematický model

	$d_0$	$d_1$	$R^2 (-)$
zisk oleje (g)	-1,277 (g·K <sup>-1</sup> )	21,96 (g)	0,989
energie (kJ)	-0,367(kJ·K <sup>-1</sup> )	6,929 (kJ)	0,961
jednotkový zisk (kJ·g <sup>-1</sup> )	0,315 (kJ·(g·K) <sup>-1</sup> )	0,003(kJ·g <sup>-1</sup> )	0,499



Obr. 50 Vliv vlhkosti – modely

Na obr. č. 50 jsou uvedeny grafy pro modely zisku, energie a jednotkového zisku oleje v závislosti na vlhkosti. Energie spotřebovaná na lisování klesá se stoupající vlhkostí, zisk oleje klesá také. Jednotkový zisk oleje stoupá. To je dáno oběma uvedenými parametry, zejména tím, že zisk oleje klesá pomaleji než velikost energie.

### 5.3.2 Vliv vlhkosti – tangentsní model

Pro lisování při různých vlhkostech byl stanoven matematický model tangens. Hodnoty koeficientů tangens jsou uvedeny v tab. č.10. Součástí tabulky je statistická analýza, tab. č.10.

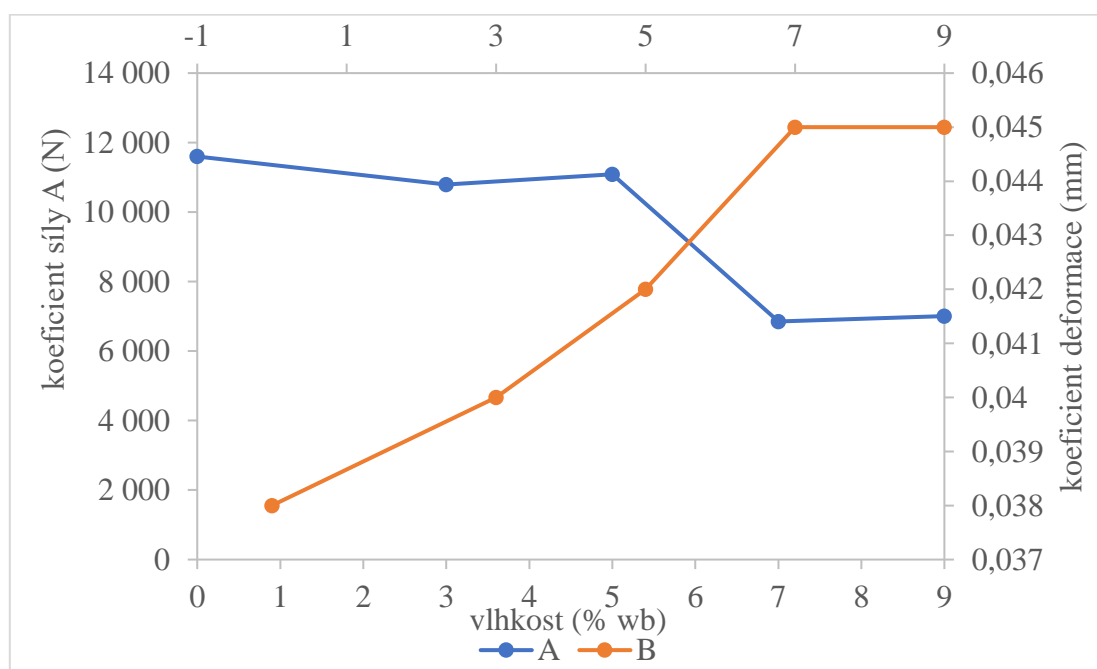
Tab. 10 Hodnoty pro matematický model tangens při různých vlhkostech

vlhkost (w.b.%)	A	B	F (-)	F <sub>krit</sub> (-)	P <sub>hodnota</sub> (-)	R <sup>2</sup>
0	11600	0,038	4,74·10 <sup>-6</sup>	4,043	0,998	0,999
3	10790	0,04	5,981·10 <sup>-4</sup>	4,001	0,981	0,999
5	11090	0,042	0,01	4,073	0,921	0,994
7	6852	0,045	2,034·10 <sup>-4</sup>	3,974	0,989	0,999
9	7004	0,045	0,011	4,02	0,918	0,993

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 10 ) vyplývá, že naměřené hodnoty zisku oleje, energie a jednotkového zisku a výsledky získané z jednotlivých modelů jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F<sub>krit</sub> (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší, než hodnoty F (hodnota F - testu) pro oba koeficienty a hodnoty. P<sub>hodnota</sub> (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R<sup>2</sup>.

V následujícím obr. č. 51 jsou vyneseny koeficienty A a B tangentsního modelu, rov. 51.

$$F(x) = A \cdot [\tan(B \cdot x)]^n \quad (51)$$



Obr. 51 Koeficienty tangentsního modelu

Z grafu je patrné, že koeficient pro sílu od nulové vlhkosti lze považovat za konstantní, není zde patrný velký rozdíl. Koeficient výrazně klesne pro vlhkost 7 % (wb), poté je opět konstantní. Koeficient deformace má výraznou stoupající tendenci až do hodnot vlhkosti 7 % (wb) Pro 7 a 9 % (wb) je hodnota koeficientu téměř stejná.

### 5.3.3 Vliv vlhkosti – reologický model komprese

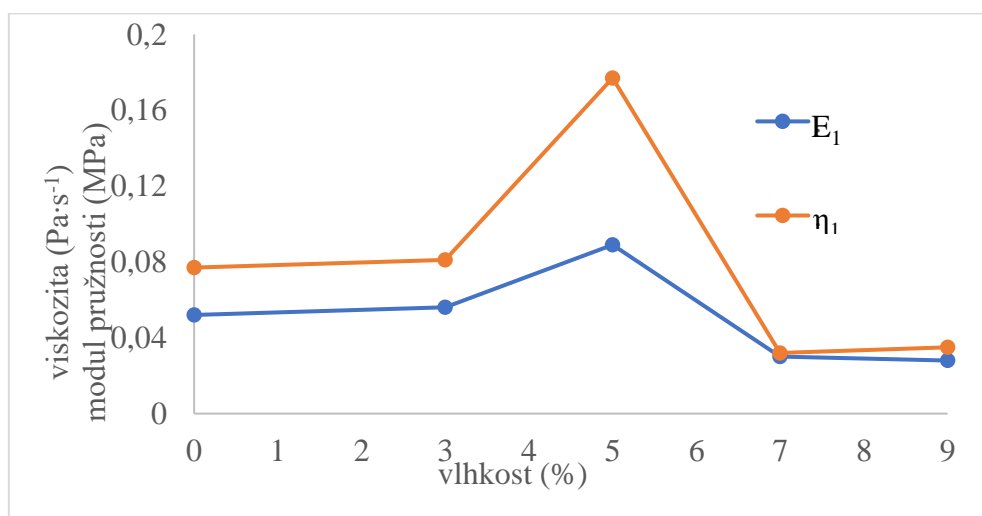
Pro stlačování při různých vlhkostech byly stanoveny rovněž reologické modely, hodnoty pro reologický model jsou uvedeny v tab. č. 11.

Tab. 11 Reologický model relaxace – vliv vlhkosti

vlhkost (% w.b.)	$E_1$ (MPa)	$\eta_1$ (Pa·s <sup>-1</sup> )	$E_2$ (MPa)	$\eta_2$ (Pa·s <sup>-1</sup> )	F (-)	$F_{krit}$ (-)	$P_{hodnota}$ (-)	$R^2$ (-)
0	0,052	0,077	$1,78 \cdot 10^{-9}$	$3,16E-10$	$8,033 \cdot 10^{-7}$	4,043	0,999	0,999
3	0,056	0,081	$2,36 \cdot 10^{-10}$	$3,62 \cdot 10^{-11}$	$1,186 \cdot 10^{-5}$	4,001	0,997	0,999
5	0,089	0,177	$1,34 \cdot 10^{-11}$	$1,69 \cdot 10^{-12}$	$1,03 \cdot 10^{-4}$	4,073	0,992	0,999
7	0,03	0,032	$1,46 \cdot 10^{-11}$	$1,80 \cdot 10^{-12}$	$2,362 \cdot 10^{-6}$	3,974	0,999	0,999
9	0,028	0,035	$5,79 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$9,141 \cdot 10^{-6}$	4,02	0,998	0,999

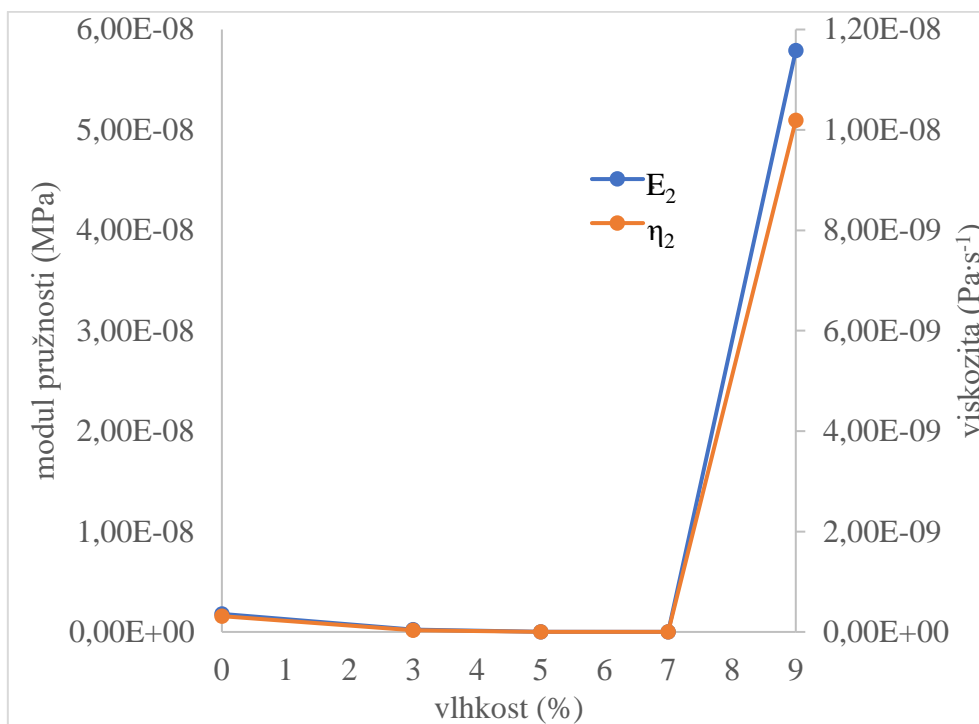
Ze statistické analýzy ANOVA (tab.11) vyplývá, že naměřené hodnoty stlačování a výsledky získané z jednotlivých modelů pro různé teploty jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty  $F_{krit}$  (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota  $F_{testu}$ ) pro všechna měření a hodnoty  $P_{hodnota}$  (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné), byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace  $R^2$ .

Reologický model pro relaxaci při různých vlhkostech směsi semen má dvě větve. Na obr. č. 52 je zobrazena první větev modelu. Jak Newtonovský, tak Hookův člen vykazují podobné chování, kdy od 0 % (w.b.) do 3 % (w.b.) mají konstantní hodnoty, poté dochází k nárůstu v 5 % (w.b.) a poté k poklesu do 7 % (w.b.) a v při vlhkosti 9 % (w.b.) opět konstantní.



Obr. 52 První větev modelu, vliv vlhkosti

V druhé větvi modelu, obr. 52, dochází od 0 % (wb) k mírnému poklesu v 3 % (wb) poté jsou hodnoty obou členů konstantní až do hodnoty 7 % (wb) a poté k velkému nárůstu při 9 % (wb)



Obr. 53 Druhá větev modelu, vliv vlhkosti

## 5.4 Vliv vlhkosti – relaxace

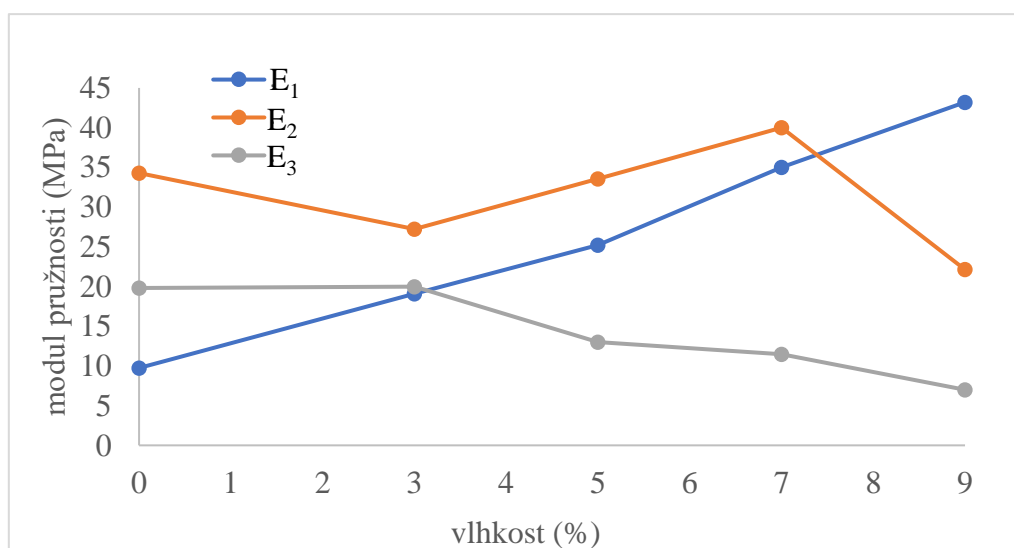
Posledním ze zjišťovaných vlivů na průběh lisování směsi semen byl vliv vlhkosti na průběh relaxace. Pro tento proces byl vytvořen reologický model se třemi větvemi, dvě větve obsahují jak Newtonovský, tak i Hookův prvek, poslední větev obsahuje pouze Hookův modul pružnosti.

Tab. 12 Reologický model, vliv vlhkosti relaxace

vlhkost (% wb)	E1 (MPa)	E2 (MPa)	E3 (MPa)	$\eta_1$ (Pa·s <sup>-1</sup> )	$\eta_2$ (Pa·s <sup>-1</sup> )	F (-)	F <sub>krit</sub> (-)	P <sub>hodnota</sub> (-)	R <sup>2</sup> (-)
0	9,74	34,27	19,80	505	197	$0,002 \cdot 10^{-15}$	4,034	0,999	0,999
3	19,08	27,21	19,98	523	103	$0,004 \cdot 10^{-15}$	4,034	0,998	0,998
5	25,23	33,54	12,99	1100	211	$2,787 \cdot 10^{-14}$	3,996	0,999	0,999
7	35,00	40,00	11,47	902	258	$6,169 \cdot 10^{-15}$	4,062	0,999	0,998
9	43,20	22,13	7,00	2369	97	$8,324 \cdot 10^{-15}$	4,027	0,999	0,998

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 12) vyplývá, že naměřené hodnoty stlačování a výsledky získané z jednotlivých modelů pro různé vlhkosti jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F<sub>krit</sub> (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota F<sub>testu</sub>) pro všechna měření a hodnoty P<sub>hodnota</sub> (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R<sup>2</sup>.

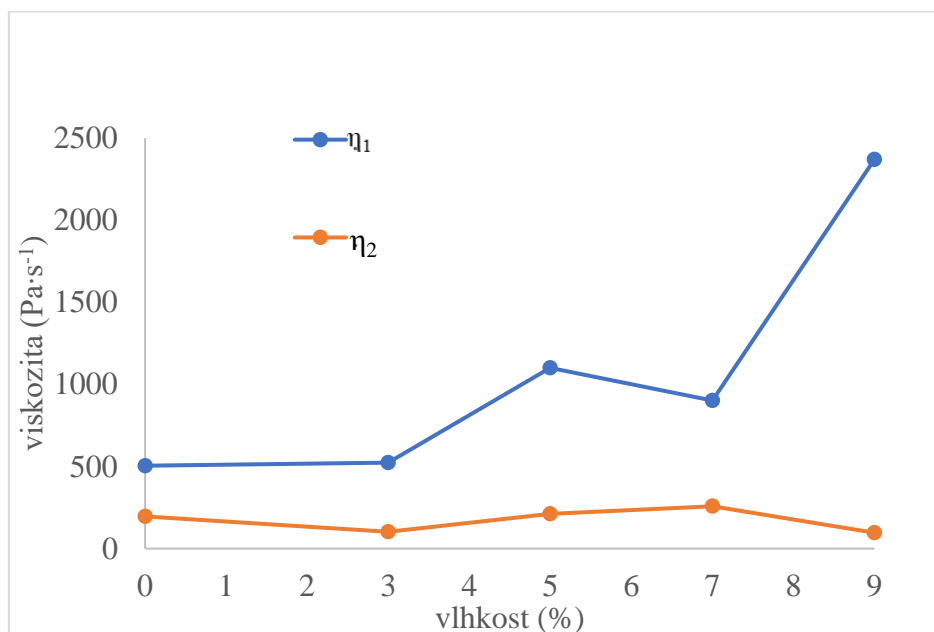
Obr. č.54 zobrazuje tři moduly pružnosti z tří větví. První větev modelu má rostoucí tendenci, zvyšuje se od nejnižší vlhkosti k nejvyšší. Druhý klesá k 3 % (wb), poté stoupá k 7 % (wb) a k 9 % (wb) opět klesá. Poslední větev má konstantní průběh v 0 a 3 % (wb), poté klesá. Tato větev nemá viskózní člen.



Obr. 54 Reologický model, hodnoty modulů pružnosti



Obr. č. 55 zobrazuje viskózní větve modelu. První větev má rostoucí trend. Stejně, jako její elastický člen (viz. obr. 54) Viskózní člen druhé větve má také podobný průběh jako jeho elastický člen, se kterým tvoří druhou větev modelu. Pokud budou porovnány viskózní členy mezi sebou, viz. obr. 55, tak se liší zejména u vysokých vlhkostí, kdy první člen výrazně stoupá a druhý klesá.

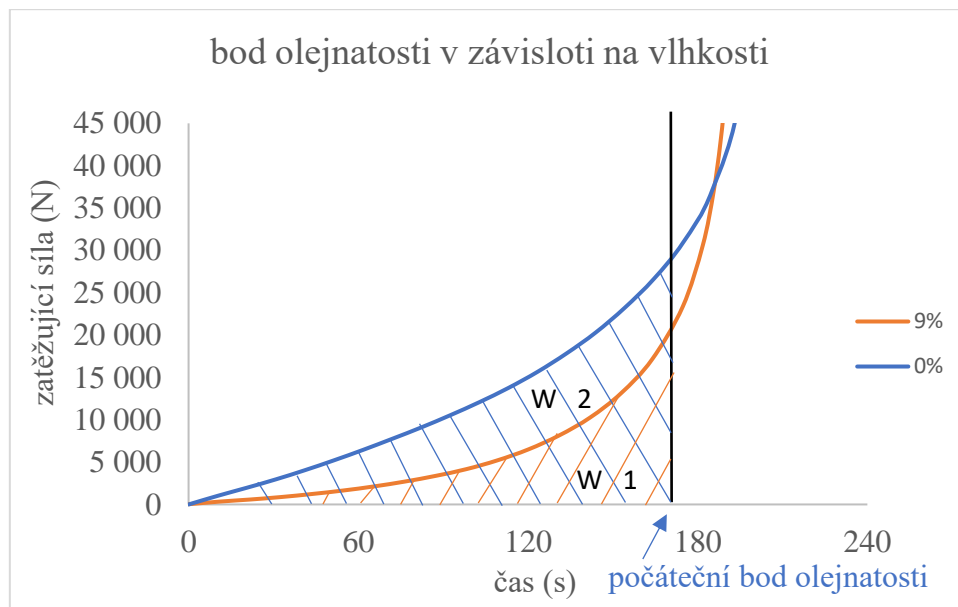


*Obr. 55 Reologický model, hodnoty viskozity*

## 5.5 Bod olejnatosti – vliv vlhkosti

Bod olejnatosti byl stanoven experimentem pro nejnižší a nejvyšší vlhkost. Bylo zjištěno, že bod olejnatosti se mění stejně, jako u rozdílných teplot. Experimentem bylo prokázáno, že se bod olejnatosti posouvá pouze v ose y, tedy k počátku tečení oleje je potřeba jiná síla, ale olej začne vytékat ve stejný moment. Při nízké vlhkosti blíží se k 0 %, byla síla potřebná k počátečnímu bodu olejnatosti menší, než pro vysokou vlhkost 9 %.

Jak je patrné na obr. č. 56 se bod olejnatosti posouvá opět pouze v ose y, ne v ose x. To znamená, že se mění energie (plocha pod křivkou W1 a W2). Plocha W2 je výrazně větší, proto bude i větší spotřebovaná energie.

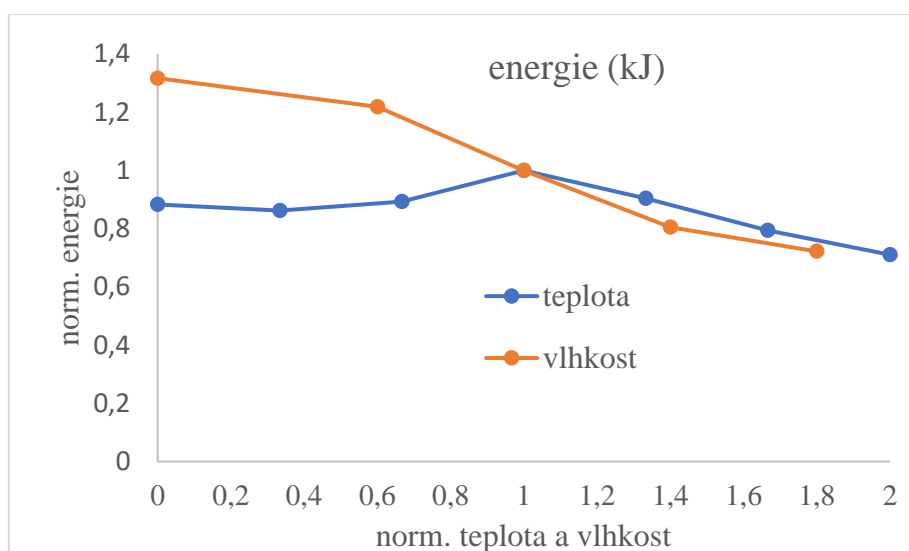


Obr. 56 Bod olejnatosti – závislost na vlhkosti

## 5.6 Citlivostní analýza

Pro zjištění vlivu jednotlivých parametrů na celý lisovací proces byla vytvořena citlivostní analýza, kde byly jednotlivé parametry porovnány. Aby bylo možno hodnoty porovnat, bylo hodnotám v polovině škály přiřazeno číslo 1, jako průměrná hodnota, proto se všechny grafy citlivostní analýzy protínají v bodě 1;1. Poté byly hodnotám přiřazena čísla přímo úměrné vzdálenosti od hodnoty 1.

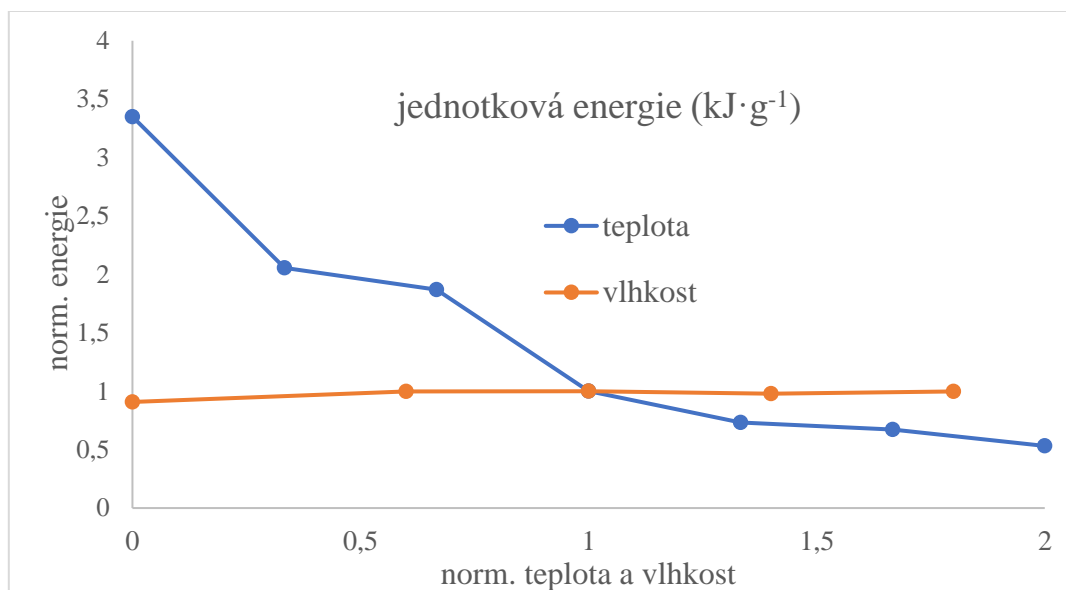
Na obr. 57 je zobrazen vliv vlhkosti a teploty na energii. Hodnoty vlhkosti a teploty byly převedeny na normalizované hodnoty. Porovnávané hodnoty vlivu teploty a vlhkosti se dají považovat za veličiny s podobným vlivem. Vliv samotné teploty a vlhkosti na velikost energie byl již popsán. Zde jde o porovnání, zda energii více ovlivňuje buď teplota, nebo vlhkost. Bod v hodnotě 1 je střední hodnota. Významné výchylky ani u jedné z křivek nejsou patrné.



Obr. 57 Citlivostní analýza – vliv na energii

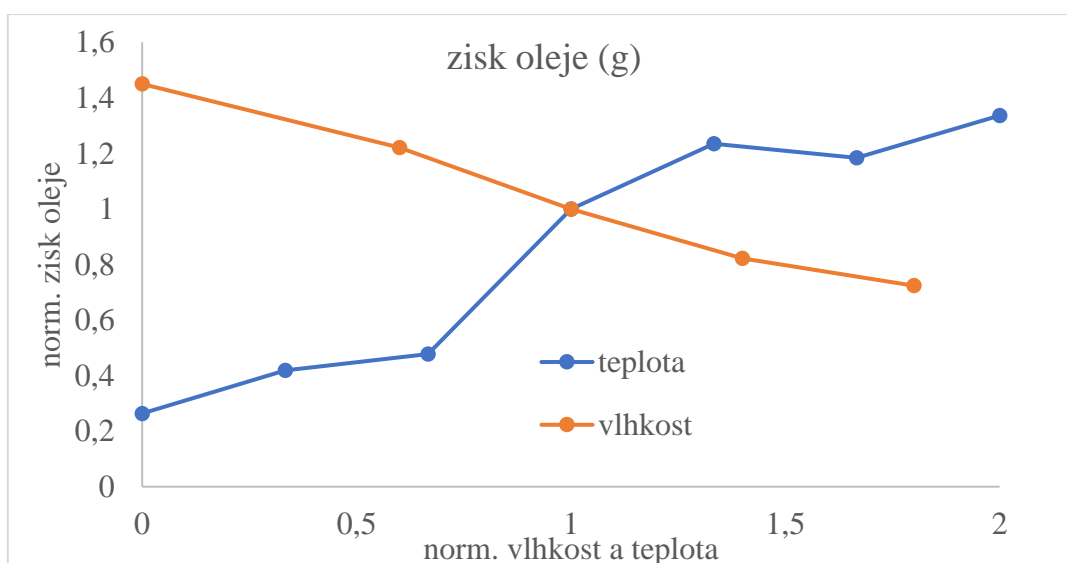
Dále byl porovnán vliv vlhkosti a teploty na jednotkovou energii. Z obr. č. 58 lze pozorovat, že vliv vlhkosti byl v případě jednotkové energie téměř konstantní. Tento fakt lze odůvodnit tím, že v získaném oleji bude malý podíl vody, která byla do směsi semen vlhčením dodána. Protože obecně platí, že by se množství oleje s rostoucí vlhkostí mělo zmenšovat. Jedná se ale o jednotkovou energii, která může být ovlivněna množstvím získaného oleje. Vliv teploty na jednotkový zisk je značný. S rostoucí teplotou klesá i jednotková energie.

Vyšší teploty umožňují jednodušší získání oleje za méně energie. U minusových teplot je jednotková energie velmi vysoká. Za dodanou velkou energií bylo získáno velmi malé množství oleje. Naopak s vysokou teplotou hodnota získaného oleje stoupá, jednotková energie klesá.



Obr. 58 Citlivostní analýza – vliv na jednotkovou energii

Poslední parametry, které byly porovnány, jsou vliv vlhkosti a teploty na získání oleje, viz. obr. 59. Obecně lze říci, že s vlhkostí klesá získání oleje a s teplotou roste. Pokud bude porovnáván vliv, tak za získání oleje má větší vliv teplota, rozdíl vlivu vlhkosti je zhruba 0,6 normojednotek (osa y) a u teploty 1,2 normojednotek. Samozřejmě bude rozdíl v kvalitě oleje, jak je podrobněji uvedeno v předchozích kapitolách.



Obr. 59 Citlivostní analýza – vliv na získání oleje

## 5.7 Obecná diskuze

Obecně lze říci, že při mrazení semen řepky dochází k nižšímu zisku oleje. To potvrzují i další studie (Gürdil a kol., 2020), (Ng a kol., 2020). Proces je díky větší tuhosti směsi náročnější na energii. Olej při  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  tuhne. Pro oleje pro průmyslové zpracování nelze mrazení považovat za přínosné. Ale oblast, kde by bylo možno jej uplatnit, je získávání vzácných olejů, jak uvádí ve své studii (Phothiset; Charoenrein, 2014). Ti zamrazovali semena v cyklech s přidáním kyseliny chlorovodíkové a dosahovali dobré výtěžnosti i vysoké kvality oleje. (Masella a kol., 2019) uvádějí, že dosahovali vysoce kvalitního oleje z hluboce zmrazených oliv. Dosahovali vyšší hodnoty peroxidů při stejné kvalitě oleje.

Lisování oleje při běžné teplotě vede k poměrně dobrému zisku oleje (i jednotkovému). Je to dáno zejména viskozitou, která se s rostoucí teplotou snižuje (Several, 2008) Je třeba více energie, neboť uvolněný olej zvyšuje odpor. S dále se zvyšující teplotou se zvyšuje zisk oleje. Mezi  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  dochází k největšímu poklesu potřebné energie, pokles pak trvá až do  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  ale již ne tak intenzivně. Při vysokých teplotách dochází ke koagulaci bílkovin (Adeko a kol, 2011), ničí se bakterie a plísně (Danso – Boateng, 2011). Při vysokých teplotách se zvyšuje množství fosforu (Zhao a kol., 2012) což je nežádoucí, pokud bude olej používán jako palivo. Vždy je tedy otázka účel použití získaného oleje.

Křivku zisku oleje lze popsat pomocí tranzitní křivky, která je známa z materiálového inženýrství. Od zhruba  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  dál se zisk oleje nemění. To samé platí i vysoké teploty od  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pokud se pak množství oleje zvýší, půjde již o olej s větším množstvím příměsí, které se při takto vysokých teplot uvolňují. Ve studii (Gürdil G., 2020) byly provedena základní analýza peroxidů a nenasycených mastných kyselin.

Lisování ovlivňuje i vlhkost. Potřebná energie se snižuje s vyšší vlhkostí snižuje. Autoři (Owolarafe a kol, 2003; Ferchau, 2000, Ogunsina a kol., 2008) shodně uvádějí, že nejvhodnější vlhkost pro lisování semen je 7 – 8 %.

Veškeré získané rovnice modelů mechanického chování mohou sloužit jako vstupní parametry do prostředí virtuální reality. Virtuální realita může nasimulovat i transformaci do nelineárního prostředí. V praxi v šroubových lisech bude např. jiná teplota ve středu a na okraji těla lisu, nebo v jeho komorách, kdy je pak možné jednotlivým prvkům přiřadit vlastnosti, které se pak mění v celém objemu.

Získané poznatky mohou být návodem pro zkoumání dalších olejnin, zda se u nich projeví shodné nebo odlišné mechanické chování. Tvar deformační křivky a její rozložení a umístění jednotlivých oblastí je faktor nutný pro stanovení energetické náročnosti získávání oleje ze semen rostlin a může být pro každou olejinu odlišný.

Pro další praxi by bylo vhodné provést základní chemickou analýzu na zjištění chemického složení peroxidů a nenasycených mastných kyselin jako provedl ve své studii (Gürdil a kol., 2020).

## 6 Závěr

Experiment byl zaměřený na lisování semen řepky olejné. Semene byla lisována za různých teplot a při různých vlhkostech. Při lisování byly zkoumány tři základní parametry, zisk oleje, velikost energie a velikost jednotkové energie (energie spotřebované na zisk jednotky oleje). Z výsledků byly vytvořeny přechodové křivky. Grafy přechodových křivek byly rozděleny do několika oblastí, které byly popsány. Na základě teoretické a experimentální analýzy výsledků vycházejí následující závěry.

Dle výsledků experimentu dochází ke snížení množství oleje pod teplotou - 20 ° C. Olej tuhne a zisk oleje je velmi nízký. Od této teploty lze považovat zisk oleje za konstantní. Zisk oleje stoupá s rostoucí teplotou. Zisk oleje v závislosti na teplotě ovlivňuje viskozita. Viskozita je základním parametrem stupně odolnosti tekutiny vůči pohybu při smykovém napětí. Existuje dynamická a kinematická viskozita, která závisí na teplotě a tlaku. V případě olejů klesá se zvyšující se teplotou při konstantním tlaku, protože přitažlivé síly mezi molekulami klesají. Zvyšuje se také energie spotřebovaná při lisování. Když se uvolní více oleje, je potřeba více energie, protože uvolněný olej zvyšuje odpor. Při vyšších teplotách začne koagulovat protein. Vysoké teploty rovněž zapříčiňují odpařování vody. Voda se odpařuje z povrchu semen. Pak zaplňuje póry. Vysoké teploty také zvyšují tekutost a ničí bakterie a plísně, což může být také jedním z faktorů ovlivňujících nižší energetické potřeby. Získaný olej má odlišné vlastnosti, jinou barvu, odlišné pH a jiný index lomu.

Při vysokých teplotách se také tvoří peroxid, který rovněž olej chemicky degraduje. Vyvolává to oxidaci. Pak degradují mastné kyseliny a tuky. Pokud je při ohřívání dostatek vlhkosti, může se vytvořit parní obal, který může degradaci zabránit. Uvolněný olej má pozitivní potenciální energii vzhledem k uvolněnému oleji, je to nevyvážený stav, který později přechází do rovnovážného stavu (hydraulické ztráty, kapilární síly). Tento faktor je ovlivněn tvarem a velikostí buňky, reologickými vlastnostmi, tlakovým gradientem, (Darcyho zákonem).

Proces lisování je ovlivněn vodou. Aktivita vody je fyzikální pojem, který se vztahuje k obsahu volné vody, aktivita vody nabývá hodnot v rozmezí 0 až 1 a je nepřímo úměrná osmotickému tlaku. V mezibuněčných prostorech je obsažena volná voda; vázaná voda je obsažena ve stěnách buněk. Lisování při různých teplotách také ovlivňuje latentní teplo.

Vytvořený reologický model je kombinací Hookova elastického členu a viskózního Newtonova členu. Hodnoty ukazují, že obě části první větve modelu mají stejné hodnoty pro elastickou a viskózní část.

Je zřejmé, že v první a třetí větvi modul pružnosti klesá s rostoucí teplotou, ve druhé větvi má rostoucí trend. Hodnoty  $E$  (MPa) se zvyšují od nízkých teplot, dosáhly nejvyšších hodnot při  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pak opět klesaly podobně jako hodnoty viskozity  $\eta$  ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Další zajímavostí je překrývání křivek při  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Křížení křivky je dáno velmi vysokou teplotou, jako již zmíněná změna stavu buněk.

Zisk oleje klesal se zvyšující se vlhkostí. Energie zůstává relativně stejná po 0, 3 a 5% (wb). Pokles je na 7 a 9 % (wb). Jednotkový zisk má rostoucí trend až do 5% (wb), je nižší na 7% (wb) a poté mírně stoupá na 9% (wb).

V práci byly popsány jednotlivé vlivy teplot a vlhkostí na proces lisování, byly vytvořeny přechodové křivky a matematické modely. Veškeré získané rovnice modelů mechanického chování mohou sloužit jako vstupní parametry do prostředí virtuální reality. Výsledky experimentů pro lineární lisování by měly být ověřeny v průmyslovém využití pro šroubové lisy, pro navrhování nových lisovacích systémů s minimálním vstupem energie ve vztahu k vyšší účinnosti získávání oleje.



## 7 Použitá literatura

1. Adejumo, B.A.; Inaede, S.G.; Adamu, T.S. Effect of moisture content on the yield and characteristics of oil from *Moringa oleifera* seeds. *Acad. Res. Int.* 2013, 4, 160.
2. Akinoso R., J.C. Igbeka, T.M.A. Olayanju and L.K. Bankole. 2006. Modeling of Oil Expression from Palm Kernel (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript FP 05 016. Vol. VIII, pages 1-7.
3. Aksoy, F.; Yabanova, I.; Bayrakceken, H.; Aksoy, I. Estimating the dynamic viscosity of vegetable oils using artificial neural networks. *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.* 2014, 36, 858–865
4. Atiku A., N. Aviara and M. Haque. 2004. “Performance evaluation of a bambara groundnut Sheller”. *Agricultural Engineering: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, Manuscript PM 04 002 Vol. VI.
5. Adeeko, K.A.; Ajibola, O.O. Processing factors affecting yield and quality of mechanically expressed groundnut oil. *J. Agric. Eng. Res.* 1990, 45, 31–43.
6. Bachmann J. 2004. Oilseed processing for small scale producers. NCAT Agriculture Specialist USA. [www.attar.org/attra-pub/PDF/oilseed.pdf](http://www.attar.org/attra-pub/PDF/oilseed.pdf). Revised, May 2004. In: Akinoso et al. 2006. Modeling of Oil Expression from Palm Kernel (*Elaeis guineensis* Jacq.), pages 1-7.
7. Bargale P.C. 1997. Mechanical oil expression from selected oilseeds under uniaxial compression. PhD Thesis, Department of Agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, pages 1-337.
8. Bargale P.C., R.J. Ford, D. Wulfsohn, J. M.K. Irudayaraj and F.W. Sosulski. 1999. Measurement of consolidation and permeability properties of extruded soy under mechanical pressing. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74:155-165.
9. Bargale, P.C., D. Wulfsohn, J. Irudayaraj, R.J. Ford and F.W. Sosulski. 2000. Prediction of Oil Expression by Uniaxial Compression using Time-varying Oilseed Properties. *Journal of Agricultural Engineering*, 77 (2):171-181.
10. Baryeh, E.A. 2001. Effect of palm oil processing parameters on yield. *Journal of Food Engineering*, 48:1-6.
11. Beerens, P. 2007. Screw-pressing of *Jatropha* seeds for fueling purposes in less developed countries, Eindhoven University of Technology, Department of Sustainable Energy Technology, pages 1-87.
12. Boichemie: Vlastnosti a stanovení bílkovin [online]. 2020 [cit. 2020-09-20]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/print.php?page=1679&typ=html](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=1679&typ=html)

13. Blahovec, J. 2008. Agromaterials study guide. Czech University of Life Sciences Prague.
14. Boatwright, J. H. 1979. A wedge press for oil extraction. *Appropriate Technology* 6(2):24-25.
15. Cosgrove, D.J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6, 850–861.
16. Danso-Boateng E., Effect of Enzyme and Heat Pretreatment on Sunflower Oil Recovery Using Aqueous and Hexane Extractions, *International Journal of Chemical and Biological Engineering*, 2011
17. Datta, A., and Morrow, C. T. (1983). Graphical and computational analysis of creep curves. *Trans. ASAE* 26(6): 1870–1874.
18. Divisova, M., Herak, D., Kabutey, A., Sleger, V., Sigalingging, R. & Svatonova, T. 2014. Deformation curve characteristics of rapeseeds and sunflower seeds under compression loading. *Scientia Agriculturae Bohemica* 45, 180–18
19. Faborode, M. O. and Favier, J. F., 1996, Identification and Significance of the Oil-point in Seed-oil Expression: *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 65, p. 335-345.
20. Farsie, A. and Singh, M. S. (1985). Energy Models for Sunflower Oil Expression. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 28, 275 –279.
21. Fedá, J. *Základy mechaniky partikulárních látek*, Academia, ČAV, Praha 1977
22. Ferchau, E. 2000. Equipment for decentralized cold pressing of oil seeds. Folkecenter for Renewable Energy. 1-11-2000. In: Beerens, P. 2007. Screw-pressing of *Jatropha* seeds for fueling purposes in less developed countries, pages 1-87.
23. Frank T.O. 1988. *Vegetable Oils*. Bailey's Industrial Oil and Fat Product. John Wiley and Son's Inc. New York. 1:19-44.
24. Franks, F. 1982, Water activity as a measure of biological viability and quality control. *Cereal Foods World* 27 (9): 403-407
25. Gomna, A.; N'Tsoukpoe, K.E.; Le Pierres, N.; Coulibaly, Y. Review of vegetable oils behaviour at high temperature for solar plants: Stability, properties and current applications. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2019, 200, doi:10.1016/j.solmat.2019.109956.
26. Gross, M. O. (1979). Chemical, sensory and rheological characterization of lowmethoxyl pectin gels. Ph.D. dissertation. University of Georgia, Athens, Ga.

27. Gupta R.K and Das S.K., 2000. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. *Journal of Food Engineering*, 46: 1–8.
28. Gürdil G. A. K., Kabutey A., Selvi K.C., Hrabě P., Herák D., Fraňková A. Investigation of Heating and Freezing Pretreatments on Mechanical, Chemical and Spectral Properties of Bulk Sunflower Seeds and Oil, *Processes*. 2020. 1-20. 10.3390/pr8040411.
29. Hamzat K.O. and Clarke B. 1993. Prediction of oil yield from groundnut using the concept of quasi-equilibrium oil yield. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 55:79-87.
30. Herák D., Gürdil G., Sedláček A., Dajbych O and Simanjuntak S., 2010. Energy demands for pressing *Jatropha curcas* L. seeds. *Biosystems Engineering*, 106: 527–534.
31. Herák D., Kabutey A and Sedláček A., 2011a. Mathematical description of rape seeds' (*Brassica napus* L.) mixture mechanical behaviour under compression loading. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 42: 31–36.
32. Herák D., Kabutey A., Sedláček A and Gürdil G., 2011b. Tangent curve utilization for description for mechanical behavior of pressed mixture. *Research in Agricultural Engineering*, 57: 13–18.
33. Herák, D., Kabutey A., Sedláček A and Gürdil G., 2012. Mechanical behaviour of several layers of selected plant seeds under compression loading. *Research in Agricultural Engineering*, 58: 24–29.
34. Herák, D., Kabutey, A., Chotěborský, R., Petrů, M., Sigalingging, R. 2015. Mathematical models describing the relaxation behaviour of *jatropha curcas* l. bulk seeds under axial compression. *Biosystems Engineering*, 131: 77-83.
35. Herák D., Kabutey A., Divišová M., Analysis of tangential curve equation describing mechanical behaviour of rapeseeds (*Brassica napus* L.) mixture under compression loading, *Research in Agricultural Engineering*, 59: 9–15, 2013
36. Hoffmann, G., *The Chemistry and Technology of Edible Oils and Fats and Their HighFat Products*, Academic Press, New York, 1989, pp.63–68.
37. Holubová, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4178-8.
38. Chatepa, L.E.C.; Uluko, H.; Masamba, K. Comparison of oil quality extracted from selected conventional and non conventional sources of vegetable oil from Malawi. *Afr. J. Biotechnol.* 2019, 18, 171–180
39. Izli N., Unal H and Sincik M., 2009. Physical and mechanical properties of rapeseed at different moisture content. *International Agrophysics*, 23: 137–145.

40. Janovec J., Cejp J., *Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení*, ČVUT - Fakulta strojní - Ústav materiálového inženýrství, 2014
41. Kabutey A., Herák D and Sedláček A., 2011. Behaviour of different moisture content of *Jatropha curcas* L. seeds under compression loading. *Research in Agricultural Engineering*, 57: 72–77.
42. Kabutey, A., Divisova, M., Sedlacek, A., Boatri, W., Svatonova, T. & Riswanti, S. 2013b. Mechanical behaviour of oil palm kernels (*elaeis guineensis*). *Scientia Agriculturae Bohemica* 1, 18–22
43. Kabutey, A., Herak, D., Mizera, C., Hrabe, P. 2018. Mathematical description of loading curves and deformation energy of bulk oil palm kernels. *Agronomy Research*, 16(4): 1686-1697.
44. Khan L.M. and M.A. Hanna. 1983. Expression of oil from oilseeds – A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28:495-503.
45. Khan, M. I. H., Mark Wellard, R., Pham N. D., & Karim, M. A. (2016). Investigation of bound and free water in plant-based food material using NMR T2 relaxometry, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Volume 38, Part A, December 2016, Pages 252-261
46. Khan, M. I. H., Mark Wellard, R., Pham N. D., & Karim, M. A., Experimental investigation of bound and free water transport process during drying of hydroscopic food material, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 117, July 2017, Pages 266 – 273,
47. Khan, L.M. and M.A. Hanna. 1984. Expression of soybean oil. *Transactions of the ASAE* 27:190-194.
48. Koo, E.C. 1942. Expression of vegetable oil-A general equation on oil expression. *Journal of Industrial Engineering Chemistry* 34:342-345.
49. Labík S., Bureš M., Chuchvalec P., Kolafa J., Novák J., řehák K., *Příklady z fyzikální chemie*, Ústav fyzikální chemie, VŠCHT, 2015 dostupné z <https://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.4.html>
50. Mentl, V. 2003. *Nedestruktivní zkoušky tečení a relaxace, texty k přednáškám z DPZ*, ZČU Plzeň.
51. Mizera, C., Herak, D., Hrabe, P., Kabutey, A. 2019. Mathematical Models Describing the Creep and Stress Relaxation Behaviour of False Banana's Fiber (*Ensete Ventricosum*). *Journal of Natural Fibres*, <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1636741>.

52. Mohsenin, N. N., and Mittal, J. P. (1977). Use of rheological terms and correlation of compatible measurements in food texture research. *J. Texture Stud.* 8: 395–408.
53. Mrema G.C. and P.B. McNulty. 1985. Mathematical model mechanical oil expression from oilseeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 31:361-370.
54. Navrátil, L., *Medicínská biofyzika: pro lékařské fakulty*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2005, 524 s. ISBN 80-247-1152-4
55. Ng, H., Kabutey A., Alkhaled F., Herak D. (2020). Uniaxial compression test of bulk soybeans under different pre-treatment temperatures. 10.22616/ERDev.2020.19.TF187.
56. Nkafamiya, I.I.; Maina, H.M.; Osemeahon, S.A.; Modibbo, U.U. Percentage oil yield and physiochemical properties of different groundnut species (*Arachis hypogaea*). *Afr. J. Food Sci.* 2010, 4, 418–421.
57. O'Brien R.D. 1998. *Fats and oils, formulating and processing for applications*. Technical Publishing, Company Inc. Lancaster USA 47-180.
58. Ohlson, I.S.R. 1992. Modern processing of rapeseed. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 69, 195-198.
59. Ogunsina, B. S., Koya, O. A. & Adeosun, O. O. (2008). Deformation and Fracture of Dika Nut (*Irvingia gabonensis*) under Uni-axial Compressive Loading. *International Agrophysics*, 22, 249-253.
60. Orhevba, B, Chukwu O., Osunde Z., Ogwuagwu Z., Influence of moisture content on the oil yield of mechanically expressed neem seed kernel oil, Federal University of Technology, Minna, Niger State, NIGERIA, 2013
61. Oil World: [www.oilworld.org](http://www.oilworld.org)
62. Okene, E.O.; Evbuomwan, B.O. Solvent extraction and characteristics of oil from coconut seeds using alternative solvents. *Int. J. Eng. Technol. Res.* 2014, 2, 135–138.
63. Olayanju T.M.A., R. Akinoso and M.O. Oresanya. 2006. Effect of Worm shaft Speed and Moisture content on Oil Recovery from Beniseed. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Vol. VIII, pages 1-7.
64. Owolarafe, O.K., A.S. Osunleke, O.A. Odejobi, S.O. Ajadi and M.O. Faborode. 2008. Mathematical modeling and simulation of the hydraulic expression of oil palm fruit. *Biosystems Engineering*, 101, 331-340.
65. Peleg, M. (1976b). Texture profile analysis parameters obtained by an Instron universal testing machine. *J. Food Sci.* 41: 721–722.
66. Petrů M., Novák O., Herák D., Mašín I., Lepšík P., Hrabě P., Finite element method model of the mechanical behaviour of *Jatropha curcas* L. bulk seeds under compression

- loading: Study and 2D modelling of the damage to seeds, *Biosystem Engineering*, Volume 127, 50-56, 2014
67. Petrů M., Novák O., Herák D., Simanjuntak S., Finite element method model of the mechanical behaviour of *Jatropha curcas* L. seed under compression loading, *Biosystems Engineering*, 111, 412-421
  68. Pirkl, S., 2009: Základy reologie a reometrie kapalin. Databáze online [cit. 2016-02-20]. Dostupné na: [http://kf.upce.cz/st\\_literatura.html](http://kf.upce.cz/st_literatura.html)
  69. Phothiset, S., & Charoenrein, S. (2014). Effects of freezing and thawing on texture, microstructure and cell wall composition changes in papaya tissues. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(2), 189–196.
  70. Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., Datta, A.K. 2005. *Engineering properties of foods*. CRC Press, Taylor and Francis Group, NW, USA.
  71. Reuber, M., *New Technologies for processing Crambe abyssinica*, M.S. Thesis, Iowa State University, Ames, 1992.
  72. Rosenthal, A., Pyle, D.L. and Niranjana, K. 1996. Aqueous enzymatic processes for edible oil extraction. *Enzyme Microbiology Technology* 19: 402–420.
  73. Rosenthal, A., Pyle, D.L., Niranjana, K. S. and Trinca, L. 2001. Combined effect of operational variables and enzyme activity in aqueous enzymatic extraction of oil and protein from soybean. *Enzyme Microb. Technol.* 28: 499–509
  74. Schopfer, P. (2001). Hydroxyl radical-induced cell wall loosening in vitro and in vivo: implications for the control of elongation growth. *The Plant Journal*, 28, 679–688.
  75. Severa, L., 2008: Tixotropní chování vybraných druhů potravin. Habilitační práce (in MS, dep. Knihovna Mendelu v Brně), MZLU v Brně, Brno, 113 s
  76. Shah, S., A. Sharma and M.N. Gupta. 2004. Extraction of oil from *Jatropha curcas* L. seed kernels by enzyme assisted three phase partitioning, *Industrial Crops and Products*, 20:275-279.
  77. Singh J. and B.P.N. Singh. 1991. Development of a mathematical model for oil expression from a thin bed of rapeseeds under uniaxial compression. *Journal of Food Science and Technology*, 28 (1):1-7.
  78. Singh, J and P.C. Bargale. 2000. Development of a small capacity double stage compression screw press for oil expression. *Journal of Food Engineering*, 43: 75-82.
  79. Singh, K.K., D.P. Wiesenborn, K. Tostenson and N. Kangas. 2002. Influence of Moisture Content and Cooking on Screw Pressing of *Crambe* Seed. *JAOCs*, Vol. 79 (2):165-170.

80. Sirisomboon, P., Kitchaiya, P., Pholpho, T. and Mahuttanyavanitch, W. 2007. "Physical and mechanical properties of *Jatropha curcas* L. fruits, nuts and kernels," *Biosystems Engineering*, 97(2):201-207.
81. Sivakumaran, K., and J.W. Goodrum. 1987. Influence of internal pressure on performance of a screw expeller. *American Society of Agricultural Engineering*, 30, 1167-1171.
82. Sivala K., V.V. Rao, S. Sarangi, R.K. Mukherjee and N.G. Bhole. 1991. Mathematical modeling of rice bran oil expression. *Journal of Food Process Engineering*, 14:51-58.
83. Skinner, G. E. (1983). Rheological modeling using linear viscoelastic assumptions in static creep and relaxation. Master's thesis, Food Science Dept., Univ. of Georgia, Athens, Ga.
84. Slavíková J, Švíglerová J., *Fyziologie dýchání*, 2012, ISBN 978-80-246-2065-7
85. Sosulski, K. and Sosulski, F.W. 1993. Enzyme aided vs. two-staged processing of canola: technology, product quality and cost evaluation. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 70(9): 825-829.
86. Srikantha, P.V.R. 1980. A search for an appropriate technology for village oil industry. AIDA: Lucknow (India) Publications. In: Singh, J and P.C. Bargale. 2000. Development of a small capacity double stage compression screw press for oil expression. *Journal of Food Engineering*, 43: 75-82.
87. Stochine, R. Physical properties of agricultural materials and products. West Lafayette, Indiana: Department of Agricultural and Biological Engineering Purdue University, 2000.
88. Sukumaran C.R. and B.P. Singh. 1989. Compression of a bed of rapeseed: oil-point. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 42:77-84.
89. Sweat, V.E., 1978, A thermal properties of Foods, In. M.A. Rao and S.S.H. Rizvi (eds.) *Engineering Properties of Foods*. Marel Dekker, Inc., New York.
90. Švíglerová J., *Osmóza* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20160305042855/>
91. Taylor, R.B. 1937. Pressure-cooking contributes increased cottonseed processing profits. *Chemical and Metallurgical Engineering* 44:978-981.
92. Terzaghi, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. New York, NY: John Wiley and Sons. In: Bargale P.C. 1997. Mechanical oil expression from selected oilseeds under uniaxial compression, Ph.D Thesis.

93. Tindale L.H. and S.R. Hill-Hass. 1976. Current equipment for mechanical oil extraction. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 53:265-270.
94. Tunde-Akintunde, T. Y., Akintunde, B. O. & Igbeka, J. C. (2001). Effect of Processing Factors on Yield and Quality of Mechanically Expressed Soybeans Oil. *Journal of Agricultural Engineering Technology*, 55, 86-92.
95. Usuki, R., Suzuki, T., Endo, Y and Keneda, T. 1984. Residual amounts of chlorophylls and pheophytins in refined vegetable oils. *Journal of the American*
96. Vadke V.S., F.W. Sosulski and C.A. Shook. 1988. Mathematical simulation of an oilseed press. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 65(10):1610-1616.
97. Venter, M. J., Willems, P., Kuipers, N. J. M., and Haan, A. B., 2006, Gas assisted mechanical expression of cocoa butter from cocoa nibs and edible oils from oilseeds: *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 37, p. 350-358.
98. Ward, J.A. 1984. Pres-pressing of oil from rapeseed and sunflower. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 61:1358-1361.
99. Willems P., Kuippers N.J.M., and Haan de, A.B. 2008. Hydraulic pressing of oilseeds: Experimental determination and modeling of yield and pressing rates. *Journal of Food Engineering*, 89(1): 8-16. ISSN 0260-8774.
100. Willems, P., 2007. Gas Assisted Mechanical Expression of Oilseeds: Ph.D. Thesis University of Twente, the Netherlands. ISBN: 978-90-365-2502-2.
101. Zhao, S., Baik, O. D., Choi, Y. J., & Kim, S. M. (2014). Pretreatments for the efficient extraction of bioactive compounds from plant-based biomaterials. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(10), 1283–1297.
102. Zheng, Y., Wiesenborn, D. P., Tostenson, K., and Kangas, N., 2005. Energy analysis in the screw pressing of whole and dehulled flaxseed: *Journal of food engineering*, 66, 193-202.