



PLNIČKA A UZAVÍRAČKA LAHVÍ

BOTTLES FILLING AND CLOSING MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

**AUTOR
VEDOUCÍ PRÁCE
PRAHA 2018**

**Bc. Marek Mikulec
Ing. Jiří Moravec, Ph.D.**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mikulec** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **420495**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Procesní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Plnička a uzavíračka lahví

Název diplomové práce anglicky:

Bottles filling and closing machine

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte zařízení pro plnění mandlového mléka do lahví a jejich následné uzavírání. Tvar lahví i použitých uzávěrů bude definován požadavkem zadavatele či vlastní volbou. Vhodnost návrhu varianty koncepčního řešení zařízení podpořte zpracováním rešerše na téma možnosti řešení plnění a uzavírání lahví. Pro navrženou variantu zpracujte základní výpočty a výkresovou dokumentaci v podobě alespoň sestavného návrhového výkresu.

Seznam doporučené literatury:

Dle vlastní rešerše, případně dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

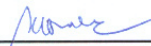
Ing. Jiří Moravec, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:


Datum zadání diplomové práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.06.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Jiří Moravec, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

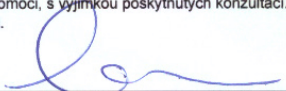

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30-04-2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Marek MIKULEC
Název práce česky:	Plnička a uzavíračka lahví
Název práce anglicky:	Bottles filling and closing machine
Akademický rok:	2017/2018
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní technika
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Moravec, Ph.D.
Rozsah práce:	Počet stran: 60 Počet obrázků: 35 Počet tabulek: 9 Počet rovnic: 11 Počet příloh: 47
Klíčová slova:	Plnička, uzavíračka, láhev, mandlové mléko, CFD, Automatizace
Keywords:	Filling machine, Closing machine, Bottle, Almond milk, CFD, Automation
Anotace:	Diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukčním řešením plnicího a uzavíracího automatu pro plnění lahví mandlovým mlékem a dalšími rostlinnými produkty. Návrh byl proveden s použitím CFD simulace proudění.
Abstract:	The thesis focuses on design of an automatic filling and closing machine used for filling bottles with almond milk and other plant products. For the design CFD simulation was used.

OBSAH

1	Úvod.....	7
2	Lahvárenské linky	8
2.1	Depaletizace	8
2.2	Mytí lahví.....	8
2.3	UV-C Sterilizace.....	9
2.4	Optická kontrola kvality	10
2.5	Plnění	10
2.5.1	Výškové plnění.....	11
2.5.2	Objemové plnění.....	11
2.5.3	Odměrné plnění	12
2.6	Uzavírání.....	12
2.6.1	Šroubová víčka	12
2.6.2	Narážecí víčka	13
2.6.3	Korunková víčka	13
2.7	Podavače víček	14
2.7.1	Vibrační zásobník	14
2.7.2	Vertikální dopravníkový podavač	15
2.8	Etiketování.....	16
3	Procesní parametry	17
3.1	Teplota	17
3.2	Hustota.....	17
3.3	Viskozita	19
3.3.1	Příprava vzorku	19
3.3.2	Měření.....	19
3.3.3	Vyhodnocení.....	19
3.4	Rychlost proudění a doba naplnění lahve.....	21
5	Numerická simulace proudění	22
5.1	Geometrie	22
5.1.1	Vnitřní prostor lahve.....	22
5.1.2	Příprava geometrie k výpočtu	23
5.2	Síť.....	24
5.2.1	Tvorba sítě.....	24
5.2.2	Kontrola kvality sítě	25
5.3	Simulace proudění	27
5.3.1	Nastavení simulace	27
5.3.2	Nastavení tekutiny	27
5.3.3	Numerická simulace.....	28
5.4	Vyhodnocení simulace	29
5.5	Experiment	31
5.6	Výsledky	32
6	Konstrukce	33
6.1	Technogel Rotary 3000	33

6.2	Materiály	34
6.3	Spojení součástí	35
6.4	Lícování a těsnění součástí.....	36
6.4.1	Lícování pístu plnicího čerpadla	36
6.4.2	Lícování plnicího ventilu.....	38
6.5	Konstrukční řešení	40
6.5.1	Plnicí ventil	40
6.5.2	Plnicí čerpadlo	41
6.5.3	Uzavíračka	42
6.5.4	Sestava karuselu	44
6.6	Čištění.....	46
7	Řízení.....	47
7.1	Senzorika	47
7.1.1	Koncové polohy pneumatických válců.....	47
7.1.2	Přítomnost sklenice.....	47
7.1.3	Poloha rozváděcího kola	48
7.1.4	Přítomnost víček	48
7.2	Řídící členy.....	48
7.2.1	Rozváděč 5/2	48
7.2.2	Rozváděč 5/3	49
7.3	Řídící systém.....	49
7.3.1	Schéma logického řízení.....	50
8	Závěr	52
9	Seznam použité literatury.....	53
10	Seznam symbolů.....	56
11	Seznam obrázků	57
12	Seznam rovnic	58
13	Seznam tabulek.....	59
14	Seznam příloh.....	60

1 Úvod

Automatizace je v průmyslové výrobě klíčovým prvkem pro zvyšování kvality produkce a snižování provozních nákladů. Je důležitým prvkem pro expanzi produkce společností bez nutnosti zvyšování personálních kapacit. Zvláště v době, kdy nezaměstnanost dosahuje minima za celou historii České republiky, je právě automatizace nejdůležitějším investičním prvkem.

Potravinářství prochází intenzivním vývojem. Důraz je kladen na vysokou kvalitu a nezávadnost produktu, zvyšování trvanlivosti bez přidání konzervujících látek a degradace vitaminů a zdraví prospěšných látek obsažených v produktu. Omezení styku pracovníků s produktem přináší pozitivní výsledky na jeho kvalitu bez změny receptury. Právě plnění produktu do sklenic je jedním z ostře sledovaných kritických bodů, kdy je nutné zajistit sterilitu zařízení, pracovních ploch, obalů a atmosféry v plnicím prostředí. Je nutné zajistit stanovené teploty plnění pro pasteraci produktu a udržovat stálou rychlost odbytu produktu z výrobních tanků do komerčních obalů, aby nedocházelo k teplotnímu ovlivnění prostředím při transportu v potrubí či hadicích.

Cílem diplomové práce je návrh automatického plnicího zařízení. Prvním krokem k dosažení tohoto cíle je výzkum procesních parametrů mandlového mléka. Na jejich základě budou navrženy základní rozměry plnicího zařízení. Další částí práce bude konstrukce a návrh automatického řízení plnicího a uzavíracího zařízení a možné montáže do automatické karuselové linky pro plnění mandlového mléka a dalších rostlinných produktů společnosti Nemléko s.r.o., pro kterou je tento projekt zpracováván.

2 Lahvárenské linky

Lahvárenská linka je soubor zařízení, funkčně na sebe navazujících, jejichž cílem je naplnění, uzavření lahví a jejich etiketování. Jednotlivá zařízení jsou v lince propojena dopravníky určenými k přepravě skleněných či plastových obalů určených k plnění. V lince dochází k depaletizaci, mytí obalů, plnění, uzavírání, a případné manipulaci se spotřebitelskými obaly-etiketování a balení do krabic. V případě plnění do PET¹ lahví, může docházet v lahvárenské lince navíc k vyfukování lahví z preforem.

Jednotlivá zařízení v lince musí dosahovat obdobné hodinové výkonnosti, aby byla zajištěna kontinuální výroba. Pro operace, při kterých je obtížné dosáhnout požadované výkonnosti na jednom stroji, je výhodné využití dvou strojů umístěných vedle sebe.

2.1 Depaletizace

Depaletizační zařízení slouží k vykládání lahví z palet nebo přepravek, na kterých byly importovány do potravinářského závodu. Zařízení musí zajistit jejich správnou orientaci a mít dostatečnou výkonnost, odpovídající celé lince.

Depaletizátory jsou složitá a velmi rozměrná jednoúčelová zařízení. Nacházejí tak své uplatnění až u větších linek s produkcí začínající na 25 000 lahvích za hodinu.²

Se stále rostoucí robotizací lze depaletizátory nahradit robotickými rameny. Výhodou je možnost změny tvaru a velikost lahve a snadná regulace hodinové výkonnosti.

2.2 Mytí lahví

Lahve vstupující do lahvárenské linky vykazují různý stupeň znečištění. Mytí lahví má tedy význam jak při použití nových lahví, tak lahví cirkulačních, například lahví od piva. Vnitřní znečištění lahví tvoří zbytky nápoje a nečistoty, které se do lahve dostaly při manipulaci zpět od zákazníka do lahvárenské linky.

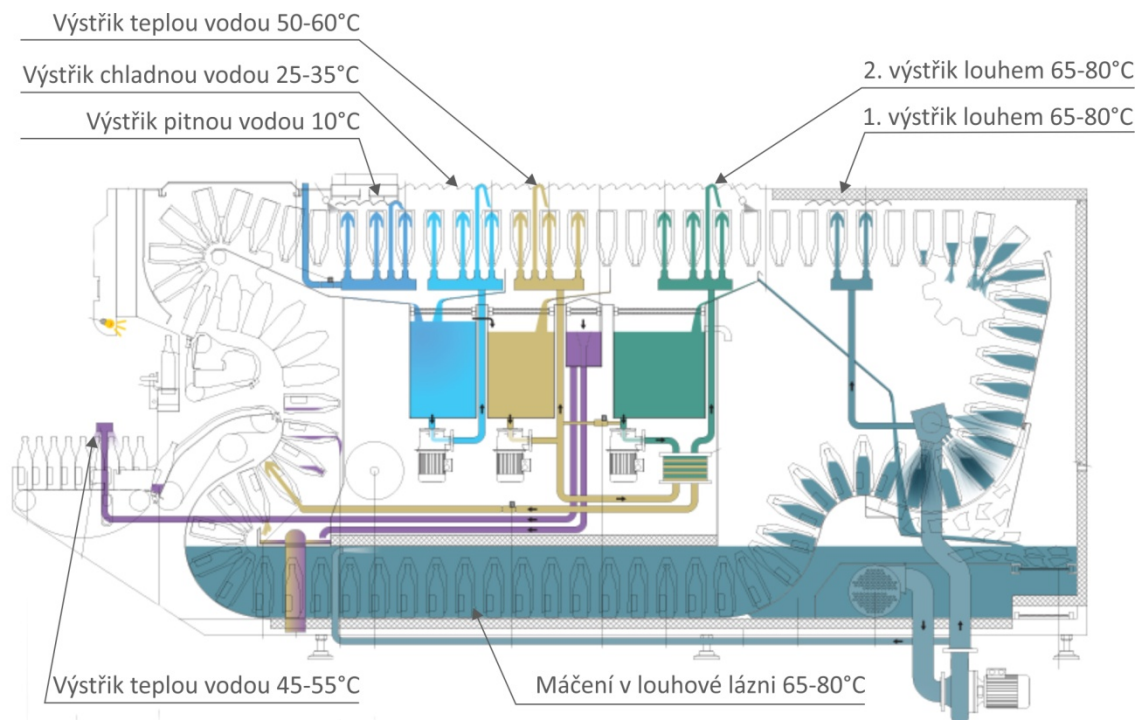
Znečištění vnější tvoří staré papírové etikety, hliníkové folie na hrdle a lepidla od etiket. Myčka cirkulačních lahví (Obrázek 1) využívá horkého louhu k odstranění výše zmíněných nečistot. Následují oplachy horkou a chladnou vodou k odstranění zbytků

¹ PET - Polyethylentereftalát je termoplast využívaný při výrobě vláken, folií a obalových materiálů.

² Depaletizátory, Alvey manex a.s.

Dostupné z: <http://www.alvey.cz/paletizacni-a-depaletizacni-systemy/depaletizatory/>

louhu z lahví. Posledním krokem je výstřik pitnou vodou. Takto připravené čisté lahve dále putují k plnění.



Obrázek 1: Myčka lahví ³

Při použití nových obalů lze tento krok po konzultaci s výrobcem lahví a zajištění jejich čistoty vynechat. Lahve se tedy oplachují jen pitnou vodou před plněním. Vhodným následujícím krokem je průjezd tunelem s UV-C zářičem pro sterilizaci lahve zvláště před plněním šetrně pasterizovaných či nepasterizovaných nápojů.

2.3 UV-C Sterilizace

UV záření o vlnové délce 185-270 nm se označuje jako UV-C záření a má baktericidní účinky. Poškozuje DNA⁴ všech bakterií, působí na samotné enzymy a proteiny, a tím účinně sterilizuje ozářenou oblast. Zářením je znemožněna reparace poškozených mikroorganismů a jejich následné množení. UV-C záření má však stejně škodlivé účinky

³ PAC Low-Energy Bottle Washing Machine, PAC Global GmbH.

Dostupné z: <http://www.pacglobal.ch/en/products/bottle-washing/series-machine/05-litre-nrw-euro/4000-flaschenstd/scheme.html>

⁴ DNA - Deoxyribonukleová kyselina je nositelem genetické informace všech organismů s výjimkou některých virů.

na lidskou kůži a zrak. Je tedy nutné zajištění odpovídající ochrany osob, pracujících poblíž tohoto zařízení.

K ozařování se využívá ve většině případů germicidních výbojek s vlnovou délkou 253,7 nm.⁵ Výbojku lze umístit do běžné zářivkové patice G5, připevněné uvnitř boxu, kterým prochází dopravníkový pás s prázdnými lahvemi. Tento způsob je tedy velmi levný a účinný v malých i velkých provozech pro sterilizaci jak samotných lahví, tak i dopravníků a dalších pracovních povrchů.

2.4 Optická kontrola kvality

Před naplněním produktu do lahve musí být vyloučena přítomnost cizího tělesa a nečistot v lahvi. Častým problémem také bývá porušené hrdlo lahve. Dříve byla optická kontrola prováděna obsluhou, nyní je nahrazována vysokorychlostními kamerami. Kamery s rychlostí snímání od 40 snímků za sekundu jsou schopny detekce vadných kusů i při vysoké rychlosti dopravníkového pásu (Obrázek 2). Při vyhodnocení vadného kusu je dán příkaz vyhazovači, ať už mechanickému nebo pneumatickému, k odstranění vadného kusu bez přerušení provozu linky.

Optická kontrola je vhodná i pro další fáze výroby, zvláště pak pro kontrolu hladiny v lahvích nebo správné nasazení víčka na hrdlu lahve.



Obrázek 2: Optická kontrola lahví⁶

2.5 Plnění

Plnění je technologický proces, při kterém je nutné rychlé naplnění lahve požadovaným objemem nápoje, popřípadě naplnění na požadovanou hladinu nápoje v lahvi. Plnění

⁵ *Technologie UV-C*, UVC Servis s.r.o. Dostupné z: <http://uvc.cz/uv-dezinfekce.html>

⁶ Honec J., Richter M., Valenta P., Brambor J.: *VIZUÁLNÍ KONTROLA VRATNÝCH OBALŮ V POTRAVINÁŘSKÝCH LINKÁCH*

musí probíhat bez ztrát a s vyloučením všech škodlivých vlivů, které by mohly vést k degradaci kvality plněného nápoje.

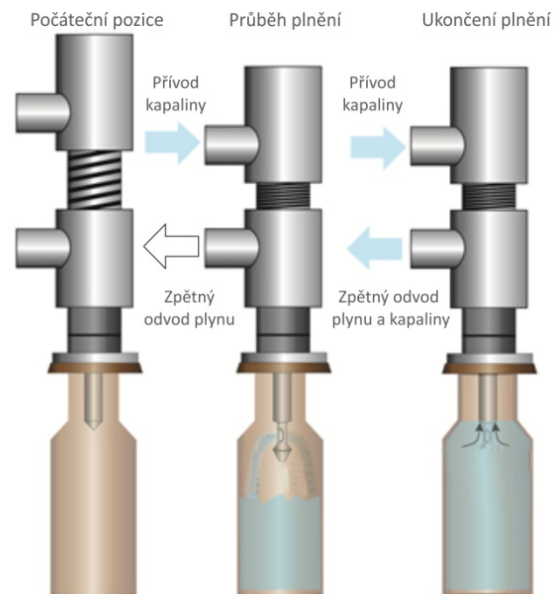
Plnění může probíhat za tepla či za studena, s přetlakem v lahvi pro sycené nápoje, s atmosférickým tlakem či s podtlakem v lahvi.

Dle určení plněného množství se plnění dělí na tři základní principy.

2.5.1 Výškové plnění

Výškové, též hladinové plnění je založeno na nastavitelné výšce odvodu plynu (vzduch) a přebytku kapaliny z plněné lahve. Odvod zajišťuje kapilára uvnitř plnicí trysky. Po naplnění lahve po nastavenou hladinu se i kapilára naplní plněnou kapalinou a vrátí ji zpět do zásobníku. Tím zabrání dalšímu úniku vzduchu z lahve.

Tento způsob není vhodný pro pěnivé kapaliny z důvodu nepřesného ustavení hladiny v láhvi.



Obrázek 3: Průběh výškového plnění ⁷

2.5.2 Objemové plnění

Při objemovém plnění se odvod plynu z lahve nachází na horní části plnicí trysky, lahev je tedy plněna až po okraj. Volný hrdlový prostor lahve vzniká po vytažení plnicí trysky o požadovaném vnějším objemu. Plněný objem kapaliny je tedy závislý na skutečném objemu plněné lahve, jako tomu je i při výškovém plnění.

⁷ Katalog výrobce plnicích zařízení, ACCUTEK Inc.

Dostupný z: <https://www.accutekpackaging.com/uploads/images/2.jpg>

2.5.3 Odměrné plnění

Odměrné plnění nachází význam při plnění drahých kapalin, kdy musí být zaručena malá odchylka objemu plněné dávky. Odměřování probíhá už v plnicím stroji. Hladina v lahvích tedy může kolísat při nedodržení přesných rozměrů lahví.

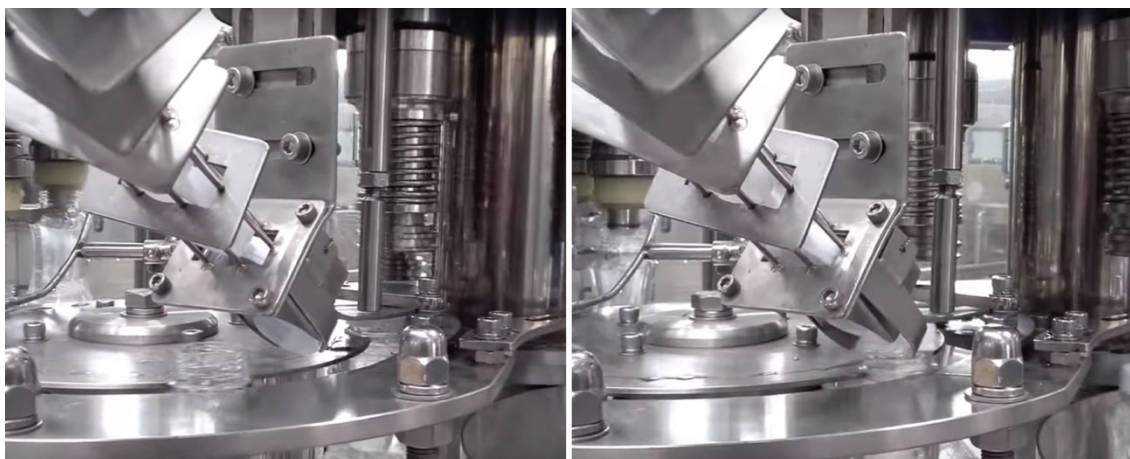
2.6 Uzavírání

Uzavírací stroje jsou zpravidla součástí plnicího monobloku, i když se jedná o samostatné zařízení. Důvodem je co nejkratší čas, kdy lahev není uzavřena a obsah lahve je možné kontaminovat vnějšími nečistotami.

Uzavíracích strojů je na trhu velké množství z důvodu širokého sortimentu víček, tvarů hrdel nápojových lahví a plechovek. Při použití automatického uzavíracího zařízení je nutné do linky zařadit také podavač víček.

2.6.1 Šroubová víčka

Předmětem této práce je uzavírací stroj pro kovová šroubová víčka na sklenice typu Twist-off. Tato víčka jsou z lisovaného plechu s lepeným pryžovým těsnícím kroužkem. Výhodou je možnost unášení víček pohybujícími se hrdly lahví (Obrázek 4). Víčka mohou být také plastová pro PET lahve a kanystry.

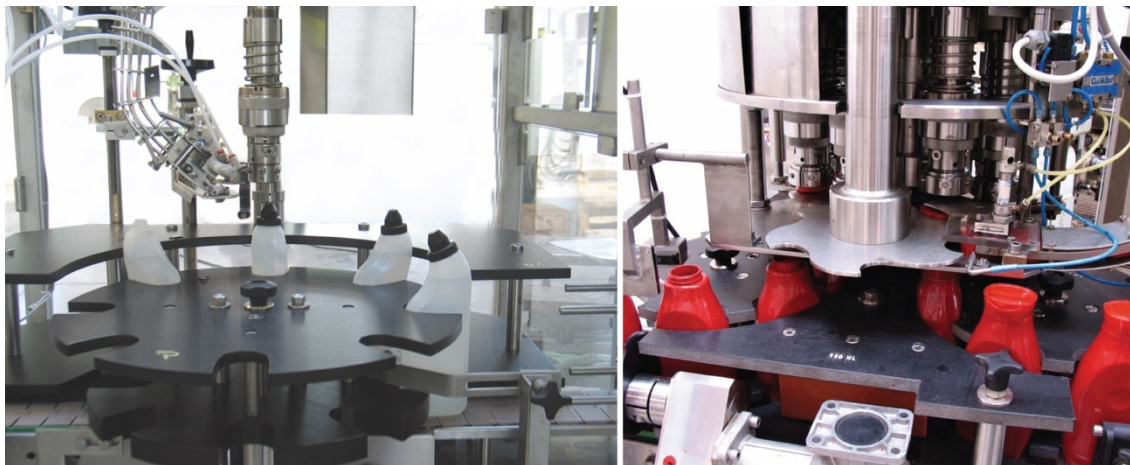


Obrázek 4: Proces nasazování šroubových víček ⁸

⁸ *Automatic Rinsing/Filling/Capping 8-8-4 Juice Filling Machine with CIP Cleaning System, Beverage Machinery.* Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Hirxuam5jBE>

2.6.2 Narážecí víčka

Narážecí víčka se používají především pro plastové obaly nekruhových tvarů, například kanystry, obaly šamponů a dresinků (Obrázek 5). Zavírací hlava pouze narazí správně orientované víčko na hrdlo obalu. Víčka mohou být opatřena závitem pro následné odšroubování uzávěru koncovým zákazníkem.



Obrázek 5: Proces nasazování narážecích víček⁹

2.6.3 Korunková víčka

Korunková víčka jsou jedním z nejstarších typů uzávěru skleněných lahví. Byly vynalezeny a patentovány roku 1892 Williamem Painterem v americkém Baltimoru (Obrázek 6).¹⁰

Nejčastěji se využívají pro uzavírání sycených nápojů, především piva, šumivých vín, cideru a limonád.

⁹ *Automatické uzavíračky lahví ULA*, ALTEC spol s.r.o.

Dostupné z: <http://www.altec-chotebor.cz/47-uzaviracky-automaticke-ula.html>

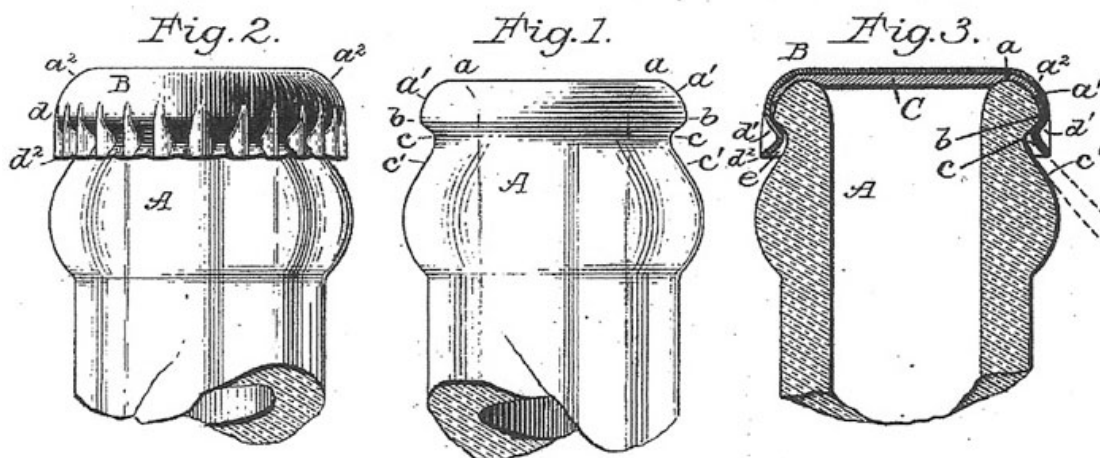
¹⁰ *PAINTER, William*, Bottle-sealing device. United States Patent Office. No. 468,226. 2.2.1892.

Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US468226>

W. PAINTER.
BOTTLE SEALING DEVICE.

No. 468,226.

Patented Feb. 2, 1892.



Obrázek 6: Schéma korunkového uzávěru

2.7 Podavače víček

Podavače víček zajišťují nepřetržitý přísun víček ze zásobníku do technologie. Nejčastěji se vyskytují v linkách ve dvou konfiguracích, a to jako vibrační zásobník nebo vertikální dopravník.

2.7.1 Vibrační zásobník

Vibrační zásobník víček nachází uplatnění v provozech, kde jsou používány malé průměry víček, kratší intervaly doplnění víček obsluhou do zásobníku a pouze jedna či několik málo variant víček. Sestává z násypky připevněné středovým šroubem k vibračnímu pohonu. Na horním okraji násypky jsou připevněny tvarové orientační prvky, zajišťující správnou orientaci víčka dle polohy jeho těžiště (Obrázek 7). Správně orientovaná víčka projdou dále do technologie, špatně orientovaná propadnou zpět do násypky. Frekvence vibrací, orientační prvky a povrchová úprava násypky je volena pro konkrétní typy a průměry víček. Při plnění většího portfolia obalů je nutná výměna celé násypky při přechodu na jiný druh víček.



Obrázek 7: Vibrační podavač ¹¹

2.7.2 Vertikální dopravníkový podavač

Vertikální podavače víček (Obrázek 8) jsou oproti vibračním univerzální a vyžadují jen velmi jednoduchou úpravu sklonu dopravníku při přechodu na jiný typ či velikost víčka. Pracují s polohou těžiště víčka. Pokud je víčko špatně orientováno, přepadne zpět do zásobníku. Rozměry zásobníku mohou být dimenzovány na velký počet víček a tím klesá náročnost na doplňování i při vysoké hodinové produkci. Nevýhodou je větší zastavěná plocha.



Obrázek 8: Vertikální podavač víček ¹²

¹¹ *Násypky*, Vondra a Vondra s.r.o.

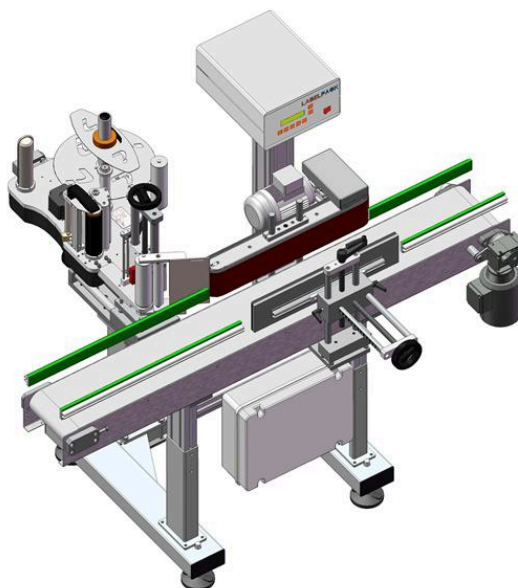
Dostupné z: <http://www.vondra-vondra.cz/cz/katalog/44-nasyvky/260-kuzelove-typ-nkf/>

¹² *Waterfall cap feeders*, Linapack Co., Ltd. Dostupné z: http://www.linapack.com/ancillary_cf.html

2.8 Etiketování

Etiketovací automaty patří k nejsložitějším strojům nápojářské linky. Jsou na ně kladeny vysoké nároky na přesnost umístění etikety, sensoriku a řízení. Konstrukčních řešení etiketovacích automatů je na trhu široká škála, základními typy jsou lineární a rotační automaty. Jelikož etiketování není předmětem této práce, je dále popsána pouze lineární varianta.

Lineární automat (Obrázek 9) je vybaven několika krokovými motory, které dle přednastavené délky etikety synchronně odvíjí cívky. Na jedné straně pohybuje se dopravník a na straně druhé pevná pryžová opěrka zajistí rotační a zároveň přímočarý pohyb lahve po dopravníku a tím dokonalé přilnutí etikety k láhvi po celém jejím obvodu.



Obrázek 9: Etiketovací automat válcových obalů¹³

¹³ *Etiketovací linky*, TECHNOLOGY s.r.o.
Dostupné z: <http://www.technology.cz/balici-stroje/etiketovaci-linky>

3 Procesní parametry

Rostlinné mléko, které bude plněno v připravované plničce, je směs vody, mandlové pasty a datlí. Složky suspenze jsou ve vodě rozptýleny v koncentraci až 12 % hm. mandlí a 3 % hm. datlí. Jelikož suspenze prochází pasterací, při které dochází k bobtnání pevných částic mandlí, je vhodné zjistit fyzikální vlastnosti suspenze experimentálně.

3.1 Teplota

Oblast provozních teplot se pro technologii výroby rostlinného mléka pohybuje od pokojové teploty až do 80 °C při pasteraci. Pro plnění je uvažována rovněž teplota pasterace, tedy 80 °C.

3.2 Hustota

Hustota je důležitým procesním parametrem, na základě kterého je navrhována rychlost plnění jak analyticky, tak ve výpočetním softwaru Ansys CFD – Fluent. Určení hustoty proběhlo v laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky, pomocí digitálního teploměru se sondou a pyknometru č. 6 s objemem $V = 103,065 \text{ cm}^3$ při teplotě 20 °C a hmotností $m_0 = 30,67 \text{ g}$. Změny objemu pyknometru se zvyšující se teplotou byly zanedbány.

První měření proběhlo při nejvyšší teplotě mléka 71,7 °C a další následovaly s postupným chladnutím mléka až do pokojové teploty 25 °C. Hustota byla stanovena dle vztahu (3-1) na základě hmotnosti pyknometru se vzorkem m_p , hmotnosti prázdného pyknometru m_0 a objemu pyknometru V . V rovnici (3-1) je zpracováno měření při 25 °C, ostatní proměřené hustoty jsou uvedeny v Tabulce č. 1.

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_p - m_0}{V} = \frac{135,28 - 30,67}{103,065 \cdot 10^{-3}} = 1014,6 \text{ kg/m}^3 \quad (3-1)$$

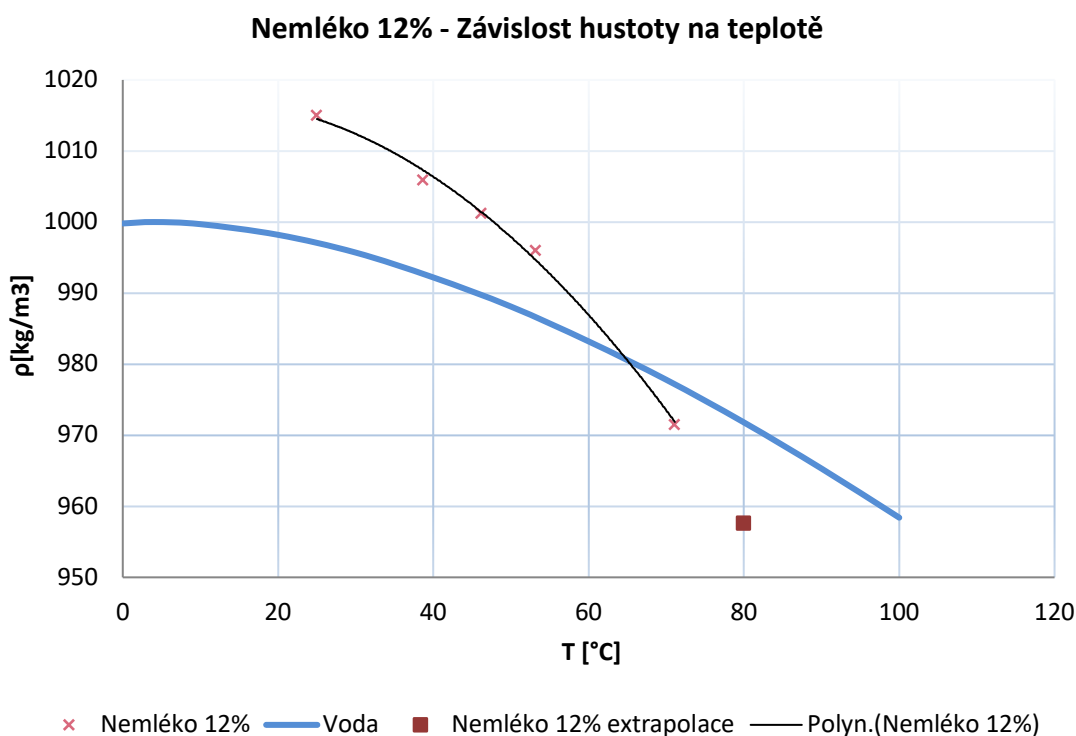
Tabulka 1: Vypočtené hodnoty hustoty v závislosti na teplotě

NEMLÉKO 12%			
T [°C]	m _p [g]	m [g]	ρ [kg/m ³]
25	135,28	104,61	1014,99
38,7	134,35	103,68	1005,96
46,2	133,86	103,19	1001,21
53,2	133,32	102,65	995,97
71,1	130,8	100,13	971,52
80	-	-	957,62

Hustota rostlinného mléka je vynesena do grafické závislosti (Obrázek 10). Pro srovnání je v grafu vynesena i teplotní závislost hustoty vody.

Pomocí regresní funkce byla z naměřených hodnot hustoty rostlinného mléka stanovena rovnice regrese (3-2), pomocí které byla extrapolována hodnota hustoty do teploty plnění (tj. 80 °C – viz poslední hodnota v tabulce 1). Rovnice platí pro teplotu dosazovanou ve °C.

$$\rho = -0,0123 \cdot T^2 + 0,258 \cdot T + 1015,7 \quad (3-2)$$



Obrázek 10: Grafická závislost hustoty vody a rostlinného mléka na teplotě

3.3 Viskozita

Viskozita je dalším nutným parametrem pro simulaci toku a pro správný návrh zařízení. Zjištěna byla taktéž experimentálně v laboratoři Ústavu procesní a zpracovatelské techniky.

3.3.1 Příprava vzorku

Měření viskozity probíhalo na rotačním reometru Rheotec RC20 mezi dvěma válci CC48. Vzorek mléka obsahoval větší částice mandlí, které bránily volnému otáčení válečku a vytvářely významné chyby v měření. Proběhla tedy filtrace částic skrz nerezové síto s velikostí ok 0,4 mm. Částic bylo na sítu zachyceno množství v řádu jednotek, a tak byl jejich vliv na viskozitu suspenze zanedbán.

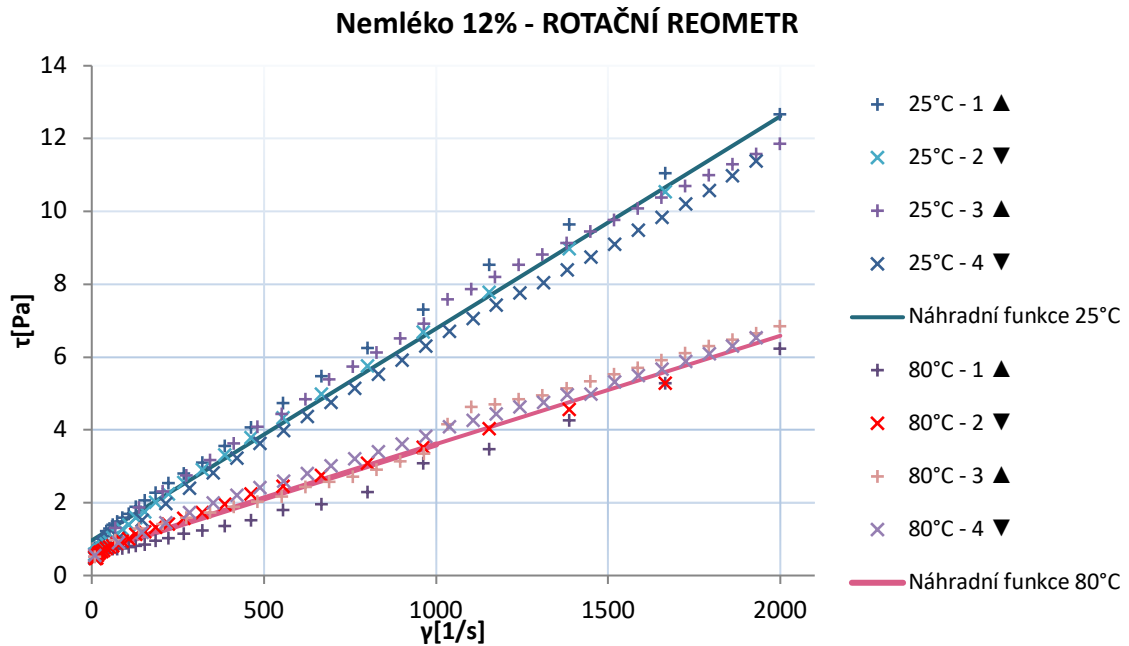
3.3.2 Měření

Vlastní měření na rotačním viskozimetru probíhalo při 25 °C a 80 °C. Pro měření byl zvolen interval smykové rychlosti deformace od 10 s⁻¹ do 2000 s⁻¹, logaritmicky rozdělený na 20 bodů. Měření probíhalo vždy s výdrží 20 s na dané hodnotě smykové rychlosti deformace. Rychlost otáčení se zvyšovala a po dosažení maximální smykové rychlosti deformace se zase snižovala až do počáteční hodnoty. Měření proběhlo dvakrát. Vzorek byl před zvýšením teploty a dalším měřením vyměněn za nový.

Při teplotě vzorku 80 °C proběhlo měření stejně jako při teplotě 25 °C, tedy dvakrát k nejvyšší rychlosti deformace a zase zpět.

3.3.3 Vyhodnocení

Na základě závislostí smykového napětí na rychlosti smykové deformace byly stanoveny rovnice lineární regrese pro každé měření. Koeficienty náhradní funkce pro 25 °C a 80 °C regresních rovnic byly vypočteny jako aritmetický průměr koeficientů regresních rovnic pro jednotlivá měření (Tabulka 2). Přesnější a formálně správnější metodou by bylo proložit jednu křivku všemi naměřenými body, při zanedbání usazování částic ve vzorku a odpařování vody ze vzorku. Zkušenost z praxe ukazuje, že se jednotlivé šarže od sebe liší, proto je chyba ve vyhodnocení zanedbatelná a postup je dostačující. Pro názornost jsou do grafu zobrazeny i náhradní funkce.



Obrázek 11: Grafická závislost napětí na smykové rychlosti deformace

Ze závislosti (Obrázek 11) je vidět, že lze nejlépe látku popsat Binghamským modelem (3-3).¹⁴

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma} \quad (3-3)$$

Tabulka 2: Koeficienty regresních rovnic

REGRESNÍ ROVNICE					
Odečtené koeficienty 25°C			Odečtené koeficienty 80°C		
	μ	τ_0		μ	τ_0
y1	0,0055	1,3174	y1	0,0028	0,3991
y2	0,0062	0,9872	y2	0,0029	0,6611
y3	0,0055	0,8335	y3	0,0030	0,8725
y4	0,0061	0,7121	y4	0,0032	0,6036
Ø	0,005825	0,96255	Ø	0,002975	0,634075

Výsledkem jsou tedy rovnice (3-4 a 3-5) Binghamského modelu.

$$\tau_{25^\circ\text{C}} = 0,96255 + 0,005825\dot{\gamma} \quad (3-4)$$

$$\tau_{80^\circ\text{C}} = 0,634075 + 0,002975\dot{\gamma} \quad (3-5)$$

¹⁴ RIEGER F., NOVÁK V., JIROUT T., *Hydromechanické procesy I.* 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03286-8

3.4 Rychlost proudění a doba naplnění lahve

Pro správný nástřel okrajových podmínek simulace a pro porovnání výsledků simulace je vhodné stanovit nejvyšší možnou rychlost proudění, při které je tok v trysce stále laminární, tedy Reynoldsovo číslo se bude pohybovat v intervalu hodnot od 0 do 2300. Předpokládá se, že plnění bude probíhat při rychlosti smykové deformace nad 200 s^{-1} , a tedy daleko od takto malé meze toku, lze pro zjednodušení výpočtu uvažovat kapalinu za newtonskou. Výpočet kritického Reynoldsova čísla je uveden v rovnici (3-6), ze které je odvozena rovnice (3-7) pro kritickou střední rychlost proudění při zvolené velikosti průměru potrubí plnicí trysky d .

$$Re_{krit} = \frac{\rho_{80} \cdot \bar{u} \cdot d}{\mu_{80}} = 2300 \quad (3-6)$$

$$\bar{u} = \frac{Re_{krit} \cdot \mu_{80}}{\rho_{80} \cdot d} = \frac{2300 \cdot 0,009275}{957,62 \cdot 0,015} = 0,47 \text{ m/s} \quad (3-7)$$

Doba naplnění lahve je vyjádřena v rovnici (3-9) získaná úpravou rovnice (3-8) pro výpočet rychlosti proudění, kde V představuje plněný.

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{V}{t \cdot S} = \frac{4 \cdot V}{t \cdot \pi \cdot d^2} \quad (3-8)$$

$$t = \frac{4 \cdot V}{\bar{u} \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 250 \cdot 10^{-6}}{0,47 \cdot \pi \cdot 0,015^2} = 2,97 \text{ s} \quad (3-9)$$

5 Numerická simulace proudění

Na základě numerické simulace proudění rostlinného mléka do lahve bude probíhat další návrh plnicího stroje. Znalost maximální vtokové rychlosti je nutná pro stanovení nejkratšího možného taktu plnicího automatu.

5.1 Geometrie

Pro potřeby simulace proudění rostlinného mléka do lahve je třeba vytvořit profil vnitřního prostoru lahve. Pro zjednodušení předpokládám dokonalé vystředění osy lahve s osou plnicí trysky. Simulace bude probíhat v režimu 2D, geometrie lahve je k dispozici jako 3D model ve formátu STEP (Obrázek 12).



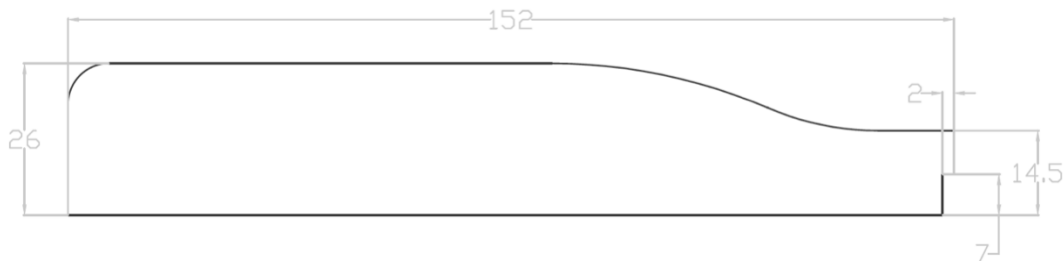
Obrázek 12: 3D model lahve

5.1.1 Vnitřní prostor lahve

Geometrii ve 3D bylo nejprve nutno zpracovat v Inventoru. Řezem lahve rovinou souběžnou s osou lahve a následným zobrazením říznuté geometrie v náčrtu jsem získal vnitřní křivku lahve (Obrázek 13). Součástí geometrie je i ústí trysky zapuštěné 2 mm do lahve pro zjednodušení simulace. Příkazem „Export jako DWG“ jsem takto připravenou 2D geometrii přenesl do softwaru AutoCAD.

V AutoCADu je nutné použití příkazu „REGION“, kterým se vybrané entity uzavřou do jedné křivky. Je možné vytvořit více regionů, pokud je model složitější a je výhodné později definovat několik konfigurací sítě. Dalším nutným krokem je regiony přesunout pod jednu barevnou hladinu, jinou než defaultní hladina 0.

Posledním krokem je export geometrie do formátu SAT¹⁵. Nejprve je třeba v okně pro export vybrat formát „ACIS – SAT“. Až po stisknutí tlačítka k uložení do zadané složky AutoCAD vyzve k vybrání regionů, které mají být uloženy. Stisknutím Enteru je volba uložena do dané destinace.



Obrázek 13: 2D Geometrie lahve importovaná do AutoCADu.

5.1.2 Příprava geometrie k výpočtu

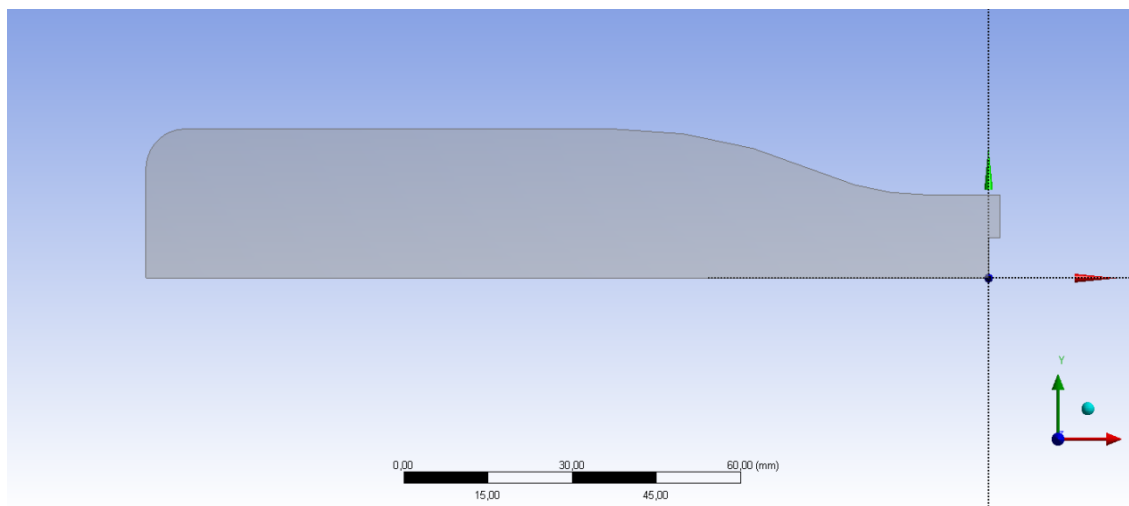
Grafický nástroj ANSYS-DesignModeler slouží k tvorbě výpočtové geometrie. DesignModeler vyžaduje dodržet pravidla geometrie pro další správnou funkci sítě a simulace.

Pro rotačně symetrické geometrie je nutné, aby osa geometrie byla totožná s osou x. Geometrie se musí také nacházet v prvním či druhém kvadrantu souřadného systému, tedy nad osou x. Žádná část geometrie se nesmí nacházet pod touto osou.

Pro další nastavení je vhodné, aby počátek souřadného systému byl současně krajním, či jinak významným bodem geometrie, od kterého lze jednoduše odměřovat další body a hranice geometrie. Pro můj případ jsem zvolil jako počátek okraj trysky vsunuté do lahve (Obrázek 14).

Posledním krokem je pojmenování sekcí geometrie, a to osu-axis, stěnu-wall, vtok-inlet, odfuk-outlet, vnitřní prostor-fluid.

¹⁵ Formát SAT - ACIS je používán v mnoha různých odvětvích, včetně CAD, CAM, CAE, AEC, CMM, 3D animace. ACIS obsahuje otevřenou objektovou C++ architekturu, která umožňuje robustní 3D modelování.



Obrázek 14: Geometrie importovaná do Design Modeleru

5.2 Síť

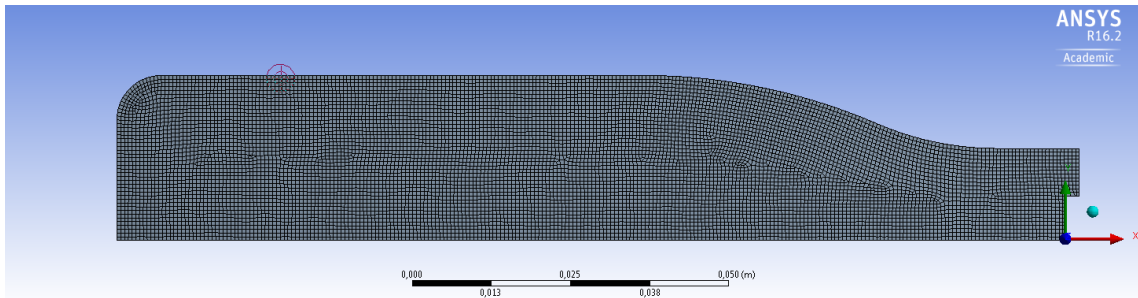
Prvním krokem v softwaru Ansys – CFD je tvorba sítě modelu. Kvalita sítě, počet elementů a počet uzlů ovlivňují délku výpočtu simulace a její kvalitu. Software obsahuje celou řadu nástrojů pro tvorbu a kontrolu sítě.

5.2.1 Tvorba sítě

Po importu geometrie z DesignModeleru je síť generována automaticky příkazem „GenerateMesh“. Fyzikální preference byly nastaveny na „CFD“, funkce velikosti na „Curvature“, vyhlazení sítě na „High“ a úhel elementu podél křivky na „Fine“, tzn. na 12° až 36°.

Po výběru plochy geometrie je přidán „Face Sizing“. Tato funkce umožňuje definovat velikost elementů sítě. Pro tuto geometrii byla zvolena velikost elementu $6 \cdot 10^{-4}$ m pro dosažení dostatečného počtu elementů a tím dostatečně jemné sítě.

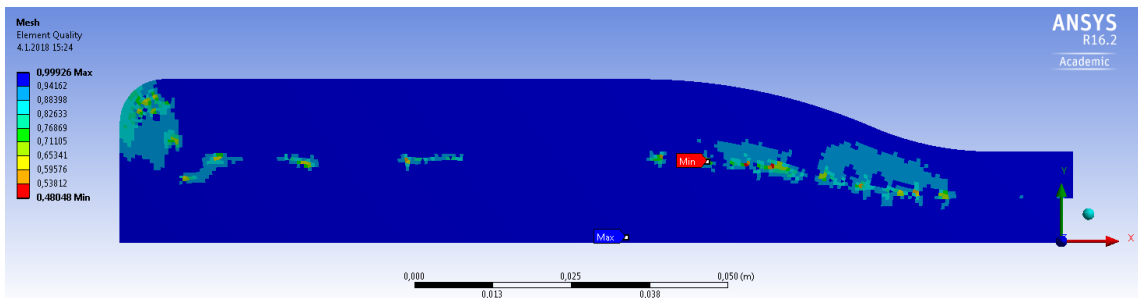
Příkazem „Insert – Method“ je definován tvar elementů. Pro 2D geometrie je na výběr z trojúhelníkových, dominantně čtvercových elementů nebo jejich kombinace. Jelikož má lahev téměř obdélníkový tvar, vychází nejlépe využití dominantně čtvercových elementů, tedy „Quadrilateral Dominant“, s využitím trojúhelníků pouze na hranicích sítě. Výsledkem je kvalitní síť bez viditelných vad (Obrázek 15). Generovaná síť je složena z 10191 uzlů a 9908 elementů.



Obrázek 15: Síť geometrie

5.2.2 Kontrola kvality sítě

Software pro tvorbu sítě nabízí i nástroje pro kontrolu elementů sítě. V detailech sítě je možno vybrat „Display – Display Style – Element Quality“, což vizuálně odhalí elementy, ve kterých by mohl nastat problém při následné simulaci. Jedná se například o příliš velkou deformaci nebo výrazně odlišnou velikost elementu (Obrázek 16). Nejnižší „Element Quality“ je v tomto případě 0,4 a takovýchto bodů je velmi málo. Pokud by síť vykazovala více nekvalitních elementů, je třeba zvolit jiné elementy, změnit velikost, popř. manuálně definovat napojení sousedních elementů.



Obrázek 16: Kontrola sítě

Další kontrolou je „Skewness“. Tento parametr lze definovat jako zešikmení či deformace elementu.

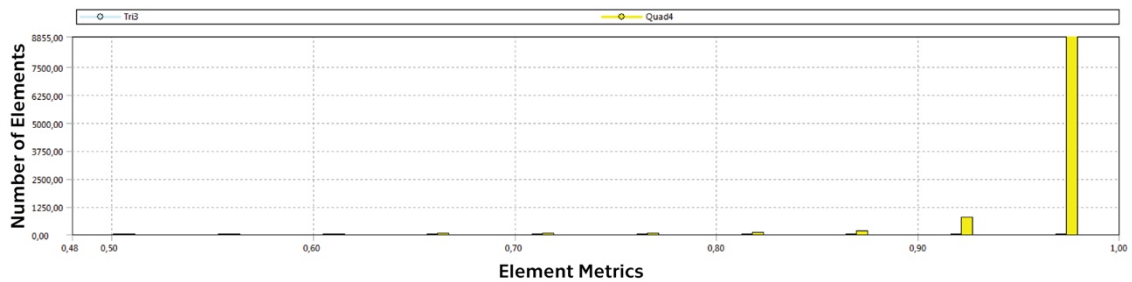
$$Skewness = \frac{\text{velikost optimálního elementu} - \text{velikost elementu}}{\text{velikost optimálního elementu}} \quad (5 - 1)$$

Tabulka 3: Hodnoty deformace elementů sítě

HODNOTA DEFORMACE ELEMENTŮ-SKEWNESS	KVALITA SÍTĚ
0.9 - <1	Velmi špatná
0.75 - 0.9	Špatná
0.5 - 0.75	Dobrá
0.25 - 0.5	Výborná
>0 - 0.25	Excelentní

Hodnoty deformace elementů a hodnocení sítě dle těchto hodnot je uvedeno v Tabulce 3. Pro vyšetřovanou geometrii lze hodnotu „Skewness“ zjistit jednoduše v detailech sítě a to ve „Statistics – MeshMetric – Skewness“. Její maximální hodnota pro tuto geometrii je rovna 0,58, což je dle výše zmiňované tabulky hodnoceno jako Dobrá síť.

V dialogovém okně je možné i grafické zobrazení počtu elementů v různých kvalitativních třídách (Obrázek 17), ze kterých je vidět významná převaha kvalitních elementů.



Obrázek 17: Grafické znázornění počtu elementů na jejich kvalitě

Na základě výše popsaných kontrol a jejich výsledků jsem určil, že takto připravená síť je dobrá a můžu ji bez dalších úprav využít k simulaci.

5.3 Simulace proudění

Tato kapitola je zaměřena na nastavení parametrů výpočtového modelu, definice tekutin, okrajových podmínek a průběh výpočtu v softwaru Fluent, určeném pro výpočet proudění tekutin.

5.3.1 Nastavení simulace

Připravená síť nastavená v odstavci 5.2 je automaticky importována do okna Fluentu. Základním nastavením je směr působení gravitace, časová závislost simulace a okrajové podmínky. Pokročilejším nastavením je výběr výpočetních metod. Pro tuto úlohu byla zvolena implicitní metoda PISO, pro svou vhodnost k řešení úloh závislých na čase.¹⁶ Posledním krokem je nastavení zobrazovacích nástrojů a zadání adresy pro ukládání výsledných hodnot simulace.

5.3.2 Nastavení tekutiny

V softwaru je třeba provést definici nového materiálu, a to rostlinného mléka. Pro zjednodušení jsem tekutinu definoval pro teplotu plnění 80 °C, tedy hustota je konstantní $\rho = 956 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, viskozitu jako model Herschel-Bulkley s indexem $n=1$, tudíž jako Binghamský model.

Důležitým krokem v definici materiálů je také určení povrchového napětí. Hodnota povrchového napětí rostlinného mléka je nahrazena hodnotou povrchového napětí mléka kravského. Smetana s obsahem tuku 40 % nabývá hodnot povrchového napětí $\sigma = 0,046 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ a $\sigma = 0,053 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ pro plnotučné mléko s obsahem tuku 3,3 %.¹⁷ Hodnoty jsou stanoveny pro vzorky o teplotě 20 °C. Pro výpočet jsem zvolil hodnotu uvnitř výše zmíněného intervalu, a to $\sigma=0,05 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$. Pro zjednodušení výpočtu uvažuji tuto hodnotu jako konstantu.

¹⁶Choosing the Pressure-Velocity Coupling Method, 2006. Fluent Inc..

Dostupné z: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node1021.htm>

¹⁷MUKHERJEE N., BANSAL B., CHEN X. D., MEASUREMENT OF SURFACE TENSION OF HOMOGENISED MILKS. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/37988127_Measurement_of_Surface_Tension_of_Homogenised_Milks

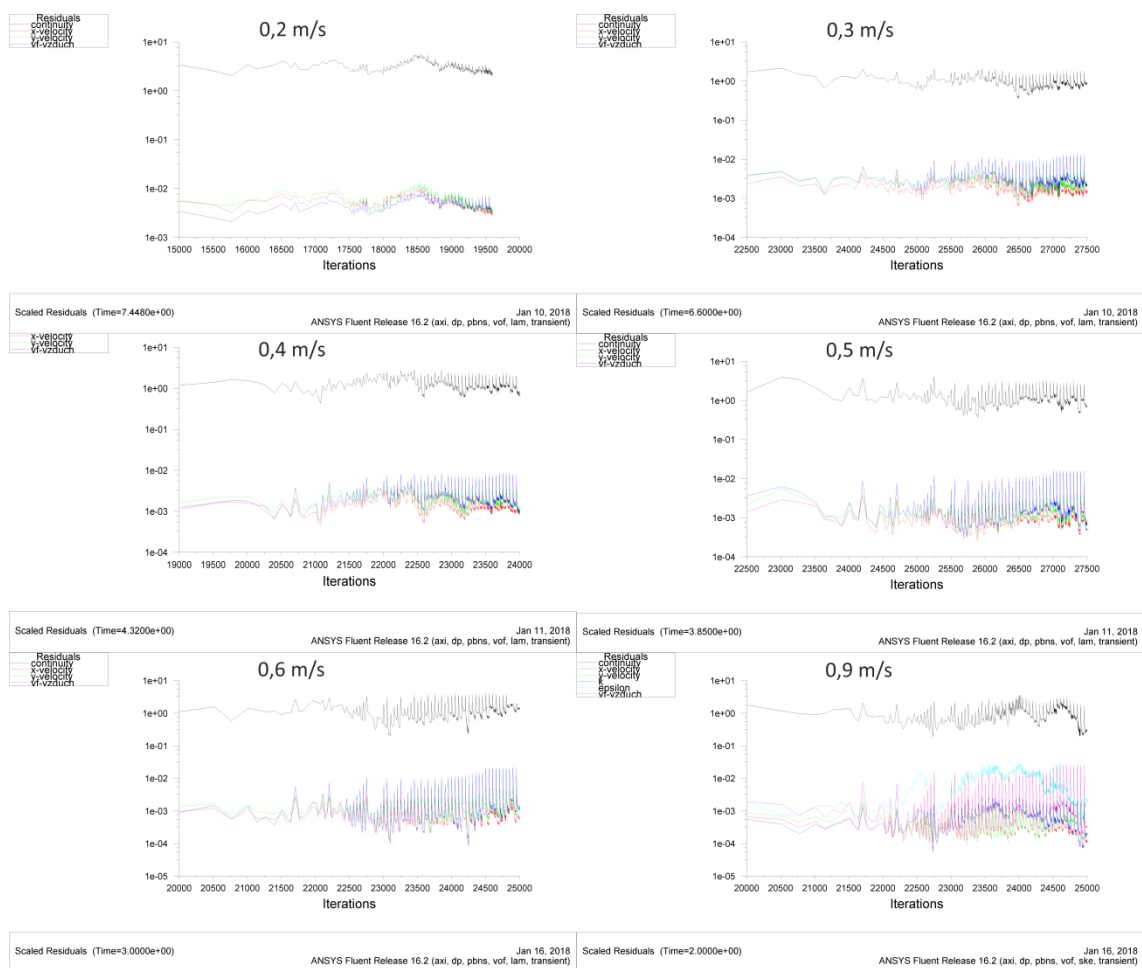
5.3.3 Numerická simulace

Pro provedení správného nastavení podmínek zbývá jen určit kvalitu simulace. Pro dosažení dostatečně dlouhé simulace, aby byla lahev naplněna, byly provedeny výpočty dle tabulky 4. Počet časových kroků zůstal stejný pro všechny simulace, měněným parametrem byla délka časového kroku. Ten se snižoval se zvyšující se rychlostí. Skutečný počet časových kroků je vždy vyšší než vypočtený, aby bylo dosaženo úplného naplnění. Při vyšších rychlostech plnění docházelo k napěnění tekutiny a k vytékání hrdlem lahve.

Tabulka 4: Hodnoty časových kroků, jejich počet, počet iterací výpočtu

PARAMETRY DÉLKY VÝPOČTU						
Rychlost plnění [m·s ⁻¹]	Objemový tok [m ³ ·s ⁻¹]	Doba plnění [s]	Časový krok [s]	Počet časových kroků	Počet iterací	Skutečný počet čas. kroků
0,2	3,53E-05	7,44	0,019	400	20000	400
0,3	5,30E-05	4,96	0,012	400	20000	550
0,4	7,07E-05	3,72	0,009	400	20000	480
0,5	8,84E-05	2,98	0,007	400	20000	550
0,6	1,06E-04	2,48	0,006	400	20000	500
0,9	1,59E-04	1,65	0,004	400	20000	500

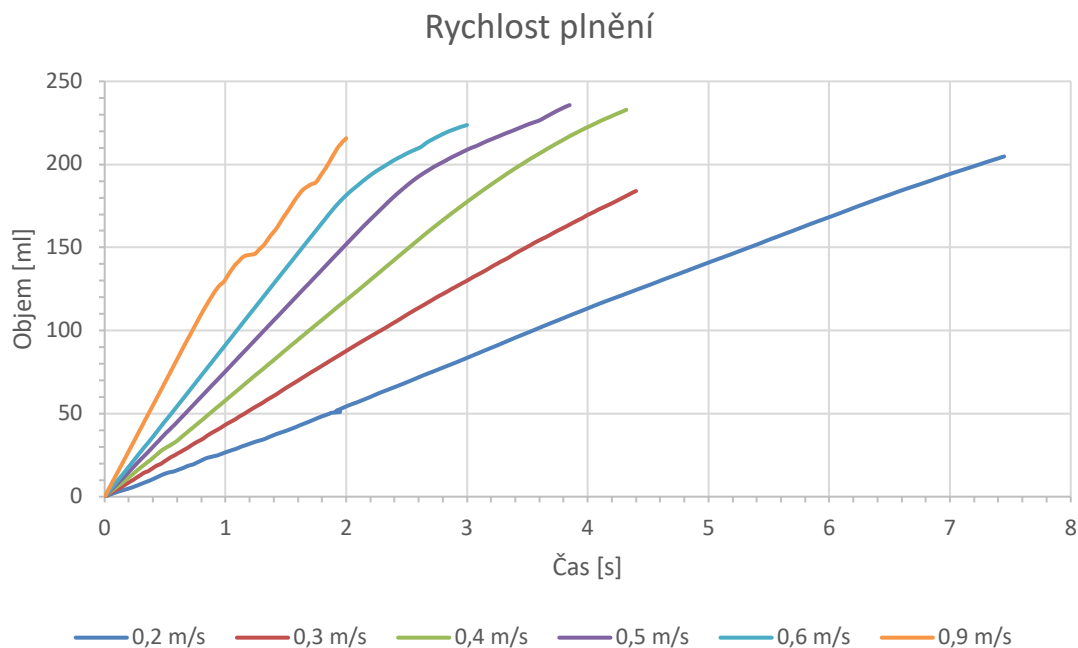
S ohledem na nastavení parametrů simulace (množství elementů, kvalita sítě, počet iterací) bylo provedeno šest časově nenáročných výpočtů pro různé rychlosti proudění. Průběhy výpočtů jsou uvedeny na Obrázku č.18. Pro výpočet rychlosti proudění 0,9 m/s byl použit turbulentní model „ k-epsilon“. Tento model by bylo vhodnější využít i pro rychlosti 0,5 m/s a 0,6 m/s.



Obrázek 18: Průběhy residuí výpočtu plnění symetrické geometrie

5.4 Vyhodnocení simulace

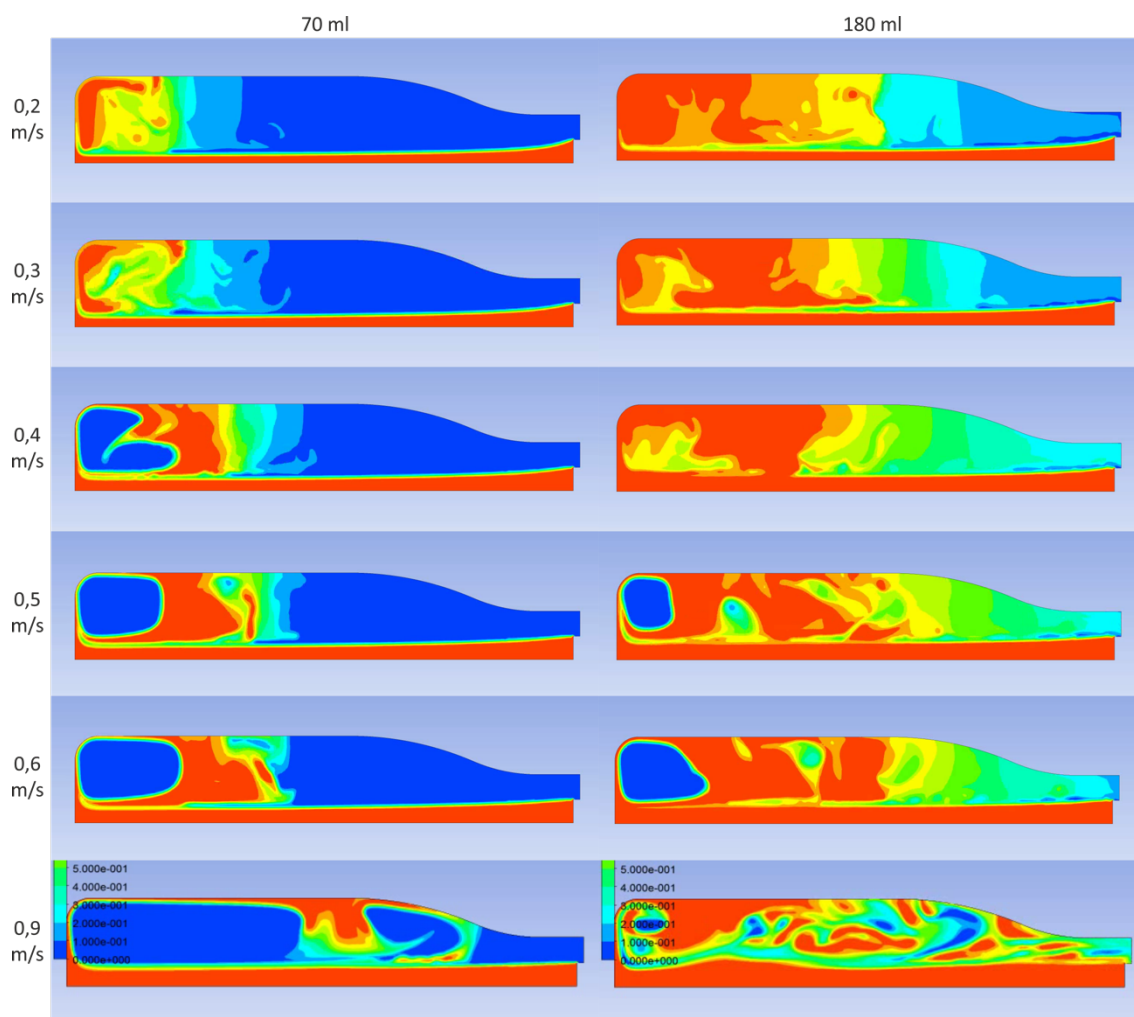
Cílem simulace bylo zjištění maximální rychlosti, při které nedojde k napěnění a vystříknutí rostlinného mléka z lahve. Jedním z výstupů simulace jsou textové soubory s aktuálním množstvím naplněné látky v závislosti na časovém kroku. Tyto průběhy pro různé rychlosti plnění jsou zpracovány viz Obrázek 19. Je z něj vidět, že při rychlosti 0,2 m/s nedochází k žádnému úniku tekutiny z lahve a plnicí charakteristika je lineární. Oproti tomu při rychlosti 0,6 m/s je vidět značné snížení rychlosti plnění nad objemem 200 ml, což by mohlo znamenat pění mléka a jeho úniky hrdlem lahve. Z důvodu chybného nastavení délky simulace pro rychlost plnění 0,3 m/s byla simulace ukončena předčasně a lahev nebyla zcela naplněna.



Obrázek 19: Průběhy rychlosti plnění

Tvrzení z minulého odstavce potvrzuje i grafický výstup ze simulace (Obrázek 20). Pro srovnání jsou snímky pořízeny při naplnění 70 ml a 180 ml.

Ze simulací vychází optimální rychlost plnění v intervalu od 0,3 do 0,4 m/s. V dalším odstavci jsou tyto výsledky ověřeny experimentem.



Obrázek 20: Průběhy plnění při různých rychlostech nátoku mléka do lahve

5.5 Experiment

Pro ověření dat ze simulace posloužil jednoduchý experiment, kdy bylo rostlinné mléko plněno výplachovou stříkačkou o objemu 150 ml s upravenou tryskou o vnitřním průměru 15 mm, která byla vsazena do lahve. Postupným zvyšováním tlaku na píst stříkačky bylo docíleno různých rychlostí toku mléka v trysce stříkačky.

Experiment byl zaznamenáván kamerou s rychlostí snímání 60 snímků za sekundu. Hodnoty získané z výpočtů jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 5).

Tabulka 5: Experimentální hodnoty plnění

HODNOTY ZÍSKANÉ EXPERIMENTEM			
t_0 [s]	t_f [s]	t [s]	u [$m \cdot s^{-1}$]
19,56	20,94	1,38	0,48
24,30	25,41	1,11	0,60
14,85	15,60	0,75	0,89

Výstupem je také video, které lze zhlédnout v odkazu: <https://vimeo.com/251621872> , nebo po načtení QR kódu (Obrázek 21).

V první části videa je vidět porovnání experimentu a numericky vypočtené simulace, v další části pak simulace pro zbylé rychlosti, k nimž se nepovedlo natočit srovnání. Z experimentu je vidět, že simulace proběhla v pořádku a je srovnatelná s realitou.



Obrázek 21: QR kód s odkazem na video experimentu a numerické simulace

5.6 Výsledky

Obsahem této kapitoly byla simulace a přibližné určení optimální rychlosti proudění rostlinného mléka plnicí tryskou. Na základě analytických výpočtů byla nastavena numerická simulace proudění. Simulace byla ověřena experimentem.

Výsledkem je optimální rychlost, kdy nedochází k napěnění mléka a úniku tekutiny hrdlem lahve následkem vysoké rychlosti plnění. Hodnota optimální rychlosti proudění je dle experimentů a simulace $u = 0,4$ m/s. Při počátku plnění se kapalina načerčí, ale s postupným plněním se hladina ustálí a plnění je rovnoměrné bez vzduchových kavern. Na základě optimální rychlosti plnění je možné určit čas plnění dle rovnice (3-9), jehož hodnota je $t = 3,54$ s. Takt plnicího stroje je tedy i s časovou rezervou 4 s a tedy jeho hodinová produkce činí 900 kusů lahví s objemem 250 ml.

6 Konstrukce

Konstrukce a realizace automatického plnicího zařízení je velmi nákladná. Společnost, pro kterou je toto zařízení zpracováváno nedisponuje dostatečnými prostředky pro realizaci tohoto zařízení v jednom projektu. Místo toho bude probíhat realizace v několika na sebe navazujících krocích a jednotlivá zařízení se budou postupně doplňovat nad lineární pásový dopravník.

Prvním krokem realizace byla konstrukce a výroba plničky marmelády. Ta proběhla jako samostatný projekt, který není zahrnut v této práci. Druhým krokem je výroba plnicího čerpadla a plnicího ventilu. Ve třetím kroku bude realizována uzavíračka s vibračním podavačem víček a v posledním čtvrtém kroku budou implementovány již vyrobené dílčí sestavy do hlavní sestavy karuselového plnicího automatu.

6.1 Technogel Rotary 3000

Základem přestavby je plnicí a uzavírací karusel mražených produktů Technogel Rotary 3000 italské výroby (Obrázek 22).¹⁸ Rok výroby 1999 neumožňoval použití složité automatizace pomocí průmyslového počítače. Rozváděcí kolo karuselu pohání asynchronní motor s konstantními otáčkami $920 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a výkonem 370 W. V kole je 12 hlav pro umístění kornoutů či kelímků a je tedy nutné zajištění jeho periodické otočení o 30° a zastavení v poloze. Tento krokový pohyb zajišťuje úhlová šneková převodovka s vynechanými zuby ve šnekovém kole.



Obrázek 22: Technogel Rotary 3000

¹⁸ ROTARY FILLERS, TECHNOGEL S.P.A.

Dostupné z: <http://www.technogel.com/en/industrial-line/14/rotary-fillers>

Chod stroje řídí vačková hřídel poháněná řemenicí z hlavního asynchronního motoru. Otáčky hlavního talíře a vačkové hřídele jsou tedy synchronní. Vačková hřídel ovládá pneumatické koncové spínače, a ty řídí lineární pneumatické válce napřímo. Toto řešení je velmi jednoduché a přesné bez potřeby dalších pneumatických rozváděčů, jelikož vačky drží koncové spínače v sepnuté poloze požadovanou dobu a stejnou dobu zůstávají i pneumatické válce v pracovní poloze. Potřeba přestavby a změna pohybů je díky vačkové hřídeli složitá. V dnešní době je vhodnější využít PLC řízení a elektronických koncových snímačů. Celý systém je pružný a snadno modifikovatelný na jiný takt, jiné balení a jiný druh plněného produktu.

Kromě rámu stroje budou pro přestavbu využity některé stávající díly, například kluzná pouzdra, kluzná vedení a sloupy k uchycení zařízení k rámu stroje. V náhledech jsou díly označeny poznámkou „Vyrobeno“.

6.2 Materiály

Plnicím automatem se budou plnit lahve rostlinnými výrobky s neutrálním či mírně kyselým pH. Vylučuje se plnění mléčných produktů, není tedy nutné použití nerezové oceli 1.4401 a je dostačující využití nerezové oceli 1.4301 a z ní vyrobených, snadněji dostupných komponent, jako např. Tri-Clamp spojení či armatury.

Na součásti ve styku s produktem, které není nutné vyrábět z nerezové oceli, je použit PE500¹⁹. Jeho předností je velmi malý třecí součinitel, a proto nachází uplatnění v pohyblivých součástech, jako písty plnicího čerpadla a plnicího ventilu.

Těsnění Tri-Clamp spojů jsou zvolena z materiálu PTFE²⁰.

¹⁹ *Polyetylen s molekulovou hmotností (500.000 g/mol) s dobrou kombinací tuhosti, houževnatosti a schopností tlumit mechanické rázy s odolností proti otěru a oděru. PE 500 je univerzální třídou používanou zejména v potravinářství. Používá se rovněž v mnoha mechanických, chemických a elektrických aplikacích.*

PE 500 [PE-HMW] Polyetylen. EPP Plasty a.s.

Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/pe500.php>

²⁰ *PTFE – polytetrafluoretylen je velmi významným plastem ze široké skupiny fluorových polymerů. K jeho výhodám patří fyziologická nezávadnost v rozsahu pracovních teplot, nepatrná adheze a výborné těsnící účinky.*

PTFE – technické informace, SITTECH CZ, s.r.o.

Dostupné z: <http://www.sittech.cz/ptfe-technicke-informace>

Ostatní těsnění, ať už v pístech, pístnicích nebo podpůrných konstrukcích, jsou volena z materiálu MVQ 70²¹. Jedná se především o těsnící O-kroužky.

Součásti, které nejsou ve styku s produktem, jsou vyrobeny z duralových desek spojených nerezovými šrouby. Podpůrná konstrukce stroje je z důvodu snadného čištění vyrobena z nerezových trubek o průměru 30 a 50 mm. Stůl automatu je vyroben také z duralových desek a zakrytován nerezovými plechy.

6.3 Spojení součástí

Požadavkem zákazníka je schopnost plnit různá balení a i různé suspenze. Vzhledem k tendenci plněné suspenze ulpívat na stěnách potrubí a plnicího zařízení je zde vhodné propláchnout zařízení horkou vodou a sestavu následně rozebrat a mechanicky vyčistit. K rychlému sestavení je vhodné využití spojek Tri-Clamp (Obrázek 23).



Obrázek 23: Sestava Tri-Clamp potravinářského spojení²²

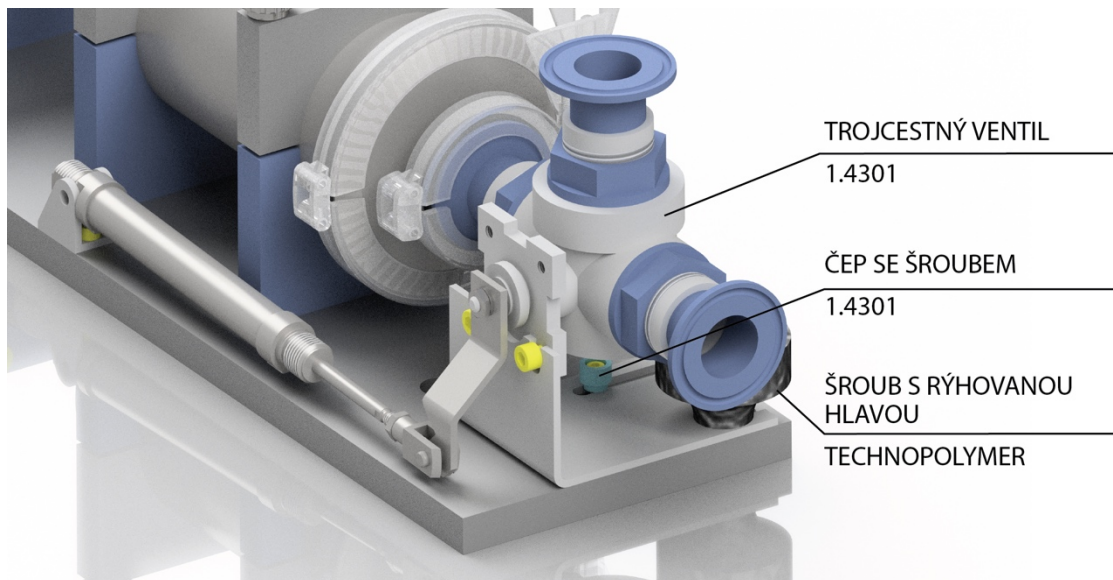
Spojení Tri-Clamp zajišťuje kvalitní hygienické spojení a rychlé připojení a odpojení komponent v případě čištění či záměny dílů pro plnění jiného produktu. Výhodou je jeho snadná dostupnost u dodavatelů a nízká cena.

²¹ *Silikon* je materiál s vysokou odolností vůči stárnutí, solným a kyselým roztokům. Teplotní rozsah použití je od -50°C do +200°C. Číslo udává jednotku tvrdosti Shore. *Specifikace těsnících materiálů*, Armat spol s.r.o. Dostupné z: <http://www.armat.cz/>

²² *Female Threaded Ferule*, MEGAIRON.
Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/NEW-style2-Pcs-1-2-DN15-Sanitary-Female-Threaded-Ferule-Pipe-Fittings-Tri-Clamp-Gasket-Stainless/32408340813.html>

Díly, u nichž nelze použít spojení Tri-Clamp, jsou spojovány šrouby s plnou plastovou hlavou. Plná hlava šroubu je zde vhodná kvůli snadnému čištění bez zbytečných osazení a zhloubení, odkud je velmi těžké vyčistit zbytky produktu.

Pro zajištění přesné polohy součástí bez nutnosti použití nářadí (např. ventilu plnicího čerpadla - Obrázek 24) jsou použity čepy s nerezovými šrouby.



Obrázek 24: Detail uložení 3-cestného ventilu

K základní duralové desce jsou díly upnuty nerezovými šrouby ze spodní strany. Hlavy šroubů jsou zapuštěny do vyfrézovaných děr. Šrouby jsou zašroubovány do neprůchozích děr součástí. Pokud je nutné, aby díry byly průchozí, jsou konce šroubů opatřeny kloboukovými maticemi.

6.4 Lícování a těsnění součástí

Vzhledem k vysokým teplotám plnění, pohybujícím se od 70 do 80 °C je nutné brát v úvahu teplotní dilatace součástí. Jelikož píst a válec nejsou vyrobeny ze stejného materiálu, mohlo by dojít k průsakům za studena a po zahřátí by došlo k velkému opotřebování pístu a O-kroužků, zpomalení cyklu plnění a v nejhorším případě k zadření.

6.4.1 Lícování pístu plnicího čerpadla

Teplotní dilatace dílu z PE500 je několikanásobně vyšší, než dílu z nerezové oceli 1.4301. Vychází to z vyšší hodnoty součinitele teplotní roztažnosti. Hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 6.

Tabulka 6: Vstupní hodnoty pro výpočet teplotní roztažnosti plnicího čerpadla

VELIČINA	JEDNOTKA	VÁLEC	PÍST
Materiál	-	1.4301	PE500
Jmenovitý rozměr	mm	81,5	81,5
Součinitel teplotní roztažnosti (α)	$1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	16	150
Tolerance +	mm	0,05	-0,65
Tolerance -	mm	0	-0,75

Výpočet teplotní dilatace válce z nerezové oceli 1.4301 z pokojové teploty 20 °C na provozní teplotu 80 °C je proveden dle rovnice (6-1). Předpokladem pro výpočet je prohřátí celého objemu tělesa na stejnou teplotu. Stejným způsobem je dopočítána celá Tabulka 7 a z ní odvozená grafická závislost (Obrázek 25).

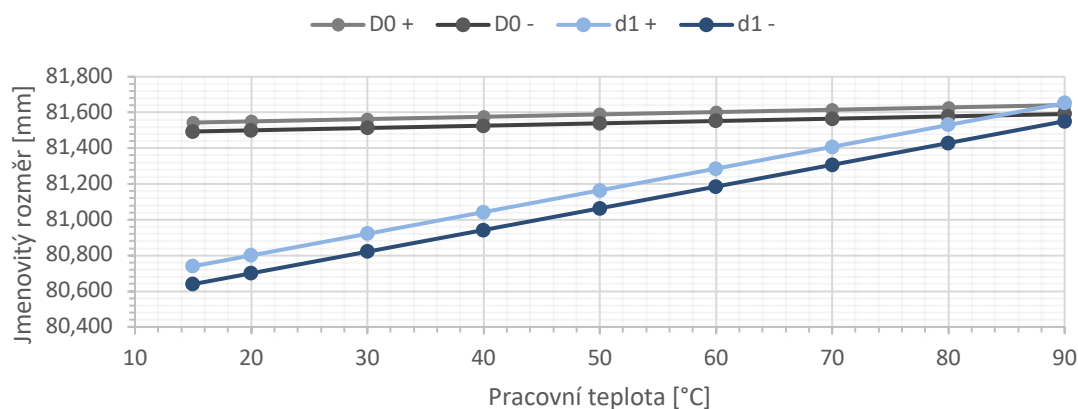
$$d_1 = d_0 + d_0 \cdot \lambda \cdot \Delta T =$$

$$= 81,55 + 81,55 \cdot 16 \cdot 10^{-6} \cdot (80 - 20) = 81,628 \text{ mm} \quad (6-1)$$

Tabulka 7: Vypočtené hodnoty vyšetřovaných rozměrů plnicího čerpadla

PRACOVNÍ TEPLOTA	15	20	30	40	50	60	70	80	90
D0 +	81,543	81,550	81,563	81,576	81,589	81,602	81,615	81,628	81,641
D0 -	81,493	81,500	81,513	81,526	81,539	81,552	81,565	81,578	81,591
d1 +	80,739	80,800	80,921	81,043	81,164	81,286	81,408	81,530	81,652
d1 -	80,639	80,700	80,821	80,942	81,064	81,185	81,307	81,429	81,551
Δ MAX	0,904	0,850	0,742	0,634	0,525	0,417	0,308	0,199	0,090
Δ MIN	0,754	0,700	0,592	0,484	0,375	0,266	0,157	0,048	-0,061

LÍCOVÁNÍ PÍSTU PLNICÍHO ČERPADLA



Obrázek 25: Teplotní závislost výrobních tolerancí plnicího čerpadla.

Rozdíl mezi výrobním a provozním rozměrem by mohl způsobit problémy před najetím na provozní teplotu. Použitím O-kroužků se silou prstence 5 mm lze zajistit dokonalou těsnost i za pokojové teploty. Drážka je tedy soustružena tak, aby k těsnění došlo už při pokojové teplotě. Při najetí na provozní teplotu bude kroužek více deformován, avšak díky jeho většímu průřezu jádra nebude docházet k velkému napětí a otěru.

Výsledný výrobní rozměr válce je tedy $\varnothing 81,5_0^{0,05}$ a pístu $\varnothing 81,5_{-0,8}^{-0,7}$. Tyto hodnoty byly použity jako výchozí pro výpočet a v Tabulce 7 jsou uvedeny pro teplotu 20 °C.

6.4.2 Lícování plnicího ventilu

Návrh rozměrů je nutné provést i u plnicího ventilu. Vstupní hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 8.

Tabulka 8: Vstupní hodnoty pro výpočet teplotní roztažnosti plnicího ventilu

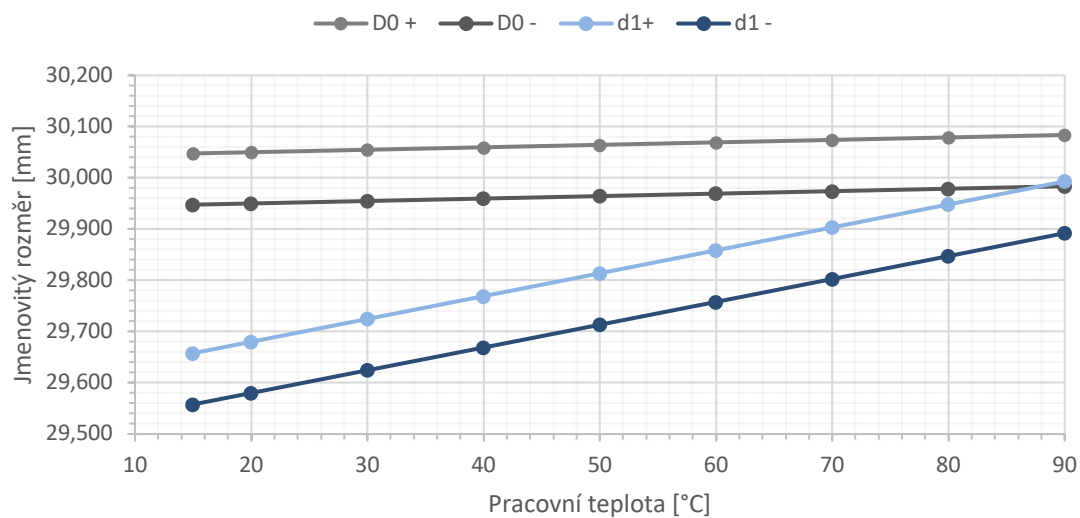
VELIČINA	JEDNOTKA	VÁLEC	PÍST
Materiál	-	1.4301	PE500
Jmenovitý rozměr	mm	30	30
Součinitel teplotní roztažnosti (α)	$1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	16	150
Tolerance +	mm	0,05	-0,3
Tolerance -	mm	-0,05	-0,4

Výpočet rozměrů kuželky a těla ventilu jsou uvedeny v Tabulce 9 a jsou vypočteny z rovnice (6-1). Obrázek 26 zobrazuje grafickou závislost změny průměru na teplotě.

Tabulka 9: Vypočtené hodnoty vyšetřovaných rozměrů plnicího čerpadla

PRACOVNÍ TEPLOTA	15	20	30	40	50	60	70	80	90
D0 +	30,048	30,050	30,055	30,060	30,064	30,069	30,074	30,079	30,084
D0 -	29,948	29,950	29,955	29,960	29,964	29,969	29,974	29,979	29,984
d1+	29,658	29,680	29,725	29,769	29,814	29,858	29,903	29,948	29,993
d1 -	29,558	29,580	29,624	29,669	29,713	29,758	29,803	29,847	29,892
Δ MAX	0,490	0,470	0,430	0,391	0,351	0,311	0,272	0,232	0,192
Δ MIN	0,290	0,270	0,230	0,190	0,151	0,111	0,071	0,031	-0,009

LÍCOVÁNÍ PÍSTU PLNÍČÍHO VENTILU



Obrázek 26: Teplotní závislost výrobních tolerancí plnicího ventilu

Výsledný výrobní rozměr válce je tedy $\varnothing 30_{-0,05}^{0,05}$ a pístu $\varnothing 30_{-0,42}^{-0,32}$. K těsnění je použit O-kroužek o síle 2 mm.

6.5 Konstrukční řešení

6.5.1 Plnicí ventil

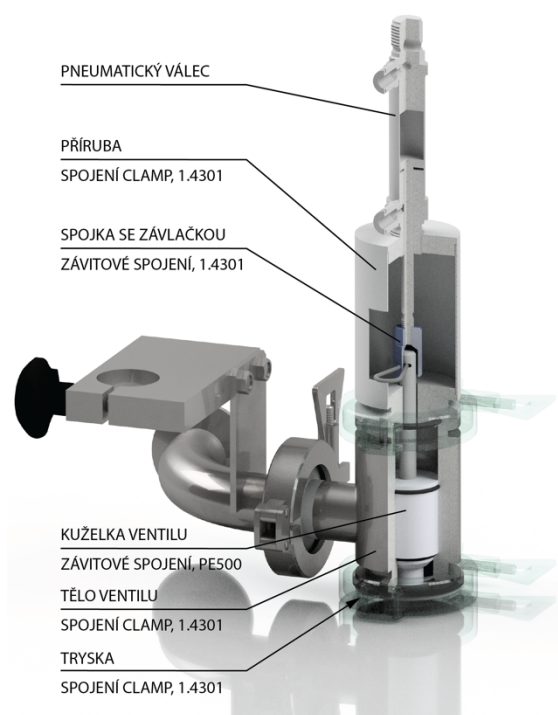
Plnicí ventil (Obrázek 27) slouží k naplnění lahve požadovaným množstvím produktu. Toho je docíleno zastavením toku tekutiny po dosažení dolní úvratě pístu plnicího čerpadla. Je zde nutný kvůli zamezení samovolného vytékání rostlinného mléka s nízkou viskozitou z přívodní hadice. K tomu by docházelo díky dimenzi hadice DN25 nutné pro plnění hustých suspenzí, jako je jogurt, majonéza apod.

Ovládání ventilu zajišťuje pneumatický píst s délkou zdvihu 25 mm.

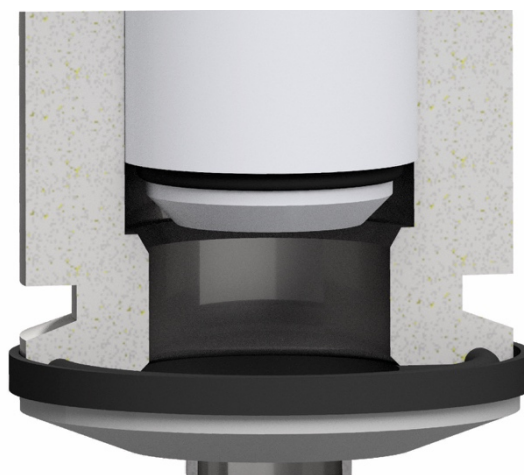
Sestava je spojena Tri-Clamp spojkami s PTFE těsněním. Spojení pístnic pneumatického válce a pístu ventilu je řešeno závlačkou pro snadné odpojení a vyčištění sestavy. Vzhledem k tomu, že pneumatický válec je při nejvyšším provozním tlaku 6 barů schopen vyvinout maximální sílu 121 N, je toto řešení možné a k přestřižení závlačky nedojde.

Výměnná tryska, její délka a vnitřní průměr, je nastavena dle viskozity plněné suspenze, pro případ rostlinného mléka se bude plnit tryskou s vnitřním průměrem 15 mm. Možná je i úprava pro plnění jogurtů a majonéz zvětšením plnicího otvoru až na 25 mm.

Těsnění kuželky ventilu zajišťuje O-kroužek v drážce kuželky. Těsnící plochou v těle ventilu je sedlová plocha pod úhlem 30°, do které je O-kroužek vmáčknut (Obrázek 28). Přesný prostor pro O-kroužek je dán rovnou čelní plochou, na kterou dosedne kuželka.



Obrázek 27: Detail plnicího ventilu



Obrázek 28: Detail těsnění kuželky

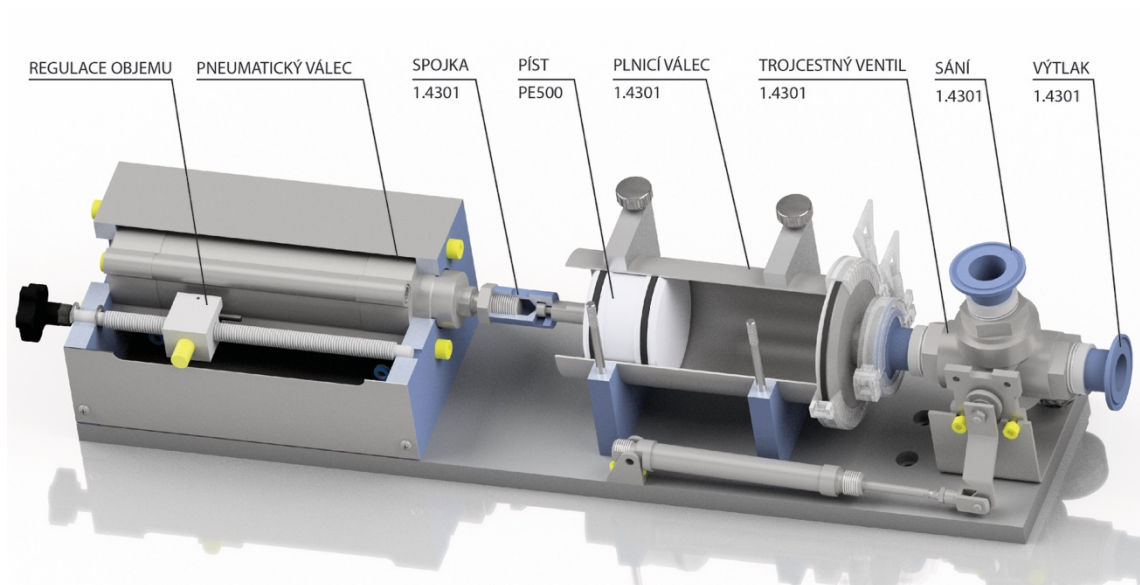
6.5.2 Plnicí čerpadlo

Plnicí čerpadlo (Obrázek 29) je sestaveno z válce z nerezové oceli 1.4301 a pístu z PE500. Zdvih pístu opět zajišťuje pneumatický válec se zdvihem 100 mm, zde je však spojení pístnic řešeno válcovou spojkou s frézovanou T-drážkou. Do drážky je zasunuta osazená pístnice čerpadla. Toto spojení zajistí souosost pístnic a umožní rychlé vyjmutí obsluhou bez potřeby jakéhokoliv nářadí.

Válec čerpadla je k celé sestavě přichycen dělenými duralovými objímkami. Tyto jsou osazeny závrtnými šrouby a staženy nerezovými rýhovanými maticemi pro snadnou a rychlou montáž. Axiální poloha válce je nastavena polohou 3-cestného ventilu.

Přepínání sání a výtaku čerpadla zajišťuje nerezový 3-cestný ventil ovládaný pneumatickým válcem se zdvihem 80 mm. Toto řešení je cenově výhodné a nevyžaduje velkých konstrukčních úprav nakoupených komponent.

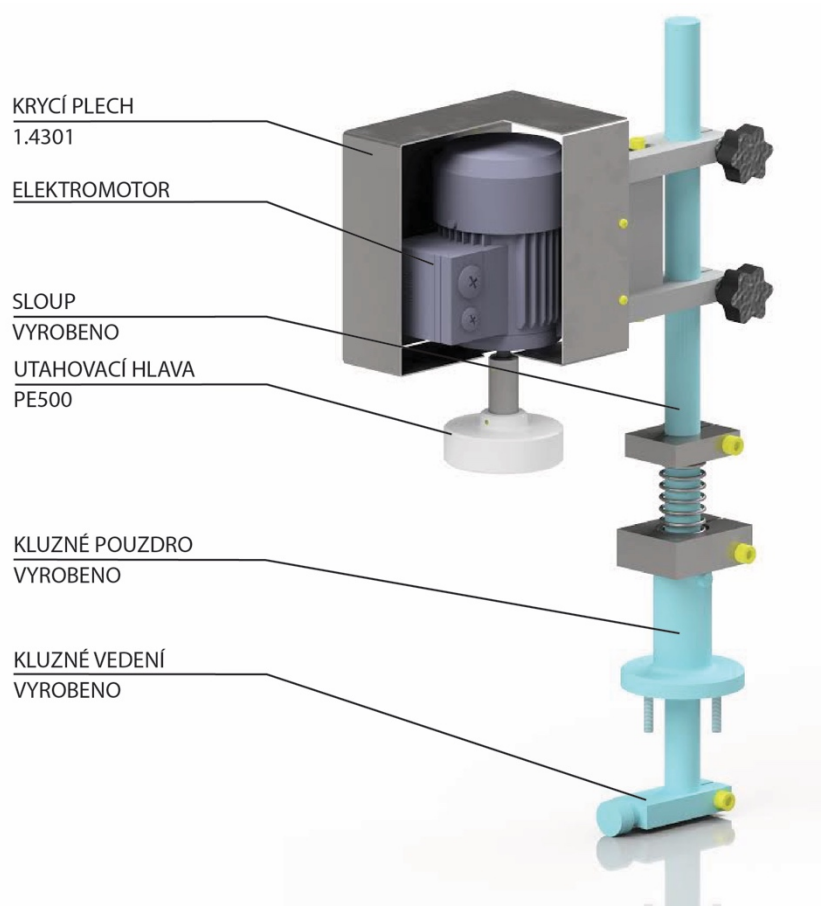
Sestavu spojují Tri-Clamp spojky, těsněné PTFE těsněním.



Obrázek 29: Detail plnicího čerpadla

6.5.3 Uzavíračka

Automatická uzavíračka lahví (Obrázek 30) je třeba k těsnému spojení plechového Twist-off víčka se sklenicí. Pokládání víček na sklenici bude v první fázi prováděno ručně, v budoucnu bude linka opatřena vibračním zásobníkem a podavačem víček. Ve správně utaženém obalu se díky změně objemu vlivem ochlazení plněného produktu vyvine ve sklenici podtlak. Důležitý parametr pro návrh uzavíračky je krouticí moment potřebný k utažení víčka. Utahovací moment však nesmí překročit maximální doporučenou hodnotu. Došlo by ke stržení závitu víčka a těsnicí efekt by nebyl dostatečný. Do produktu by pronikl vzduch z okolí obsahující nežádoucí mikroorganismy, což vede ke zkrácení doby expirace produktu. Uzavíračka bude sloužit pro utahování víček o průměru od 33 do 70 mm. Tomu odpovídají maximální utahovací momenty od 2 do 4 Nm.²³



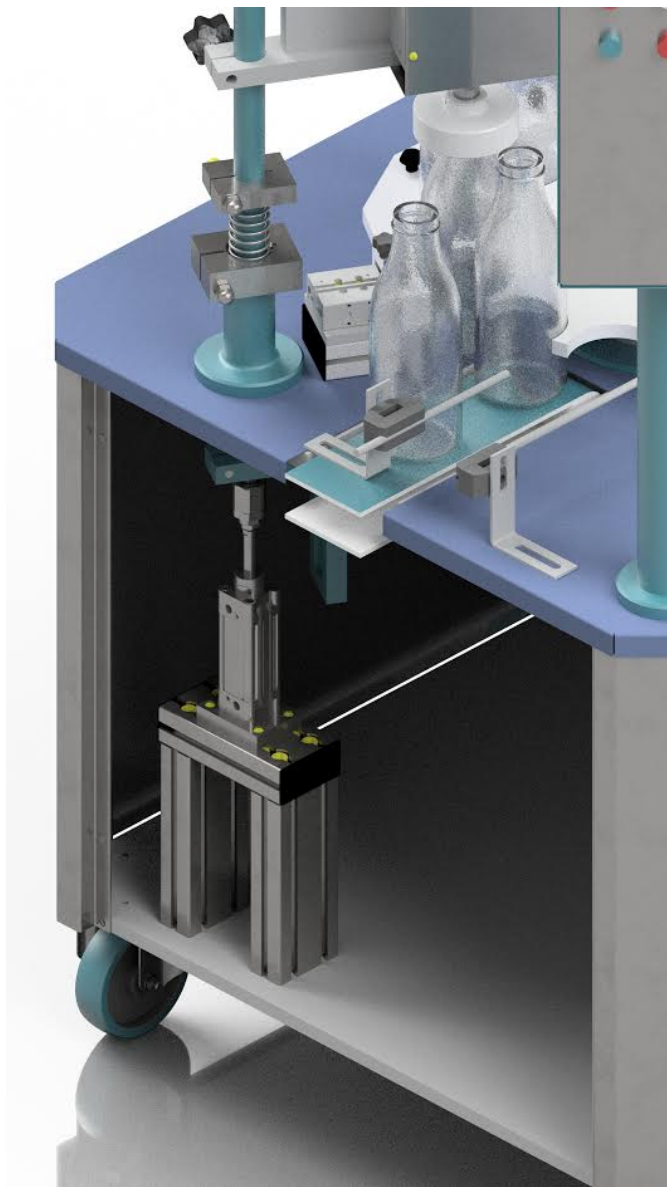
Obrázek 30: Uzavíračka

²³ TORQUE GUIDE, SKS Bottle & Packaging, Inc.
Dostupné z: <https://www.sks-bottle.com/TorqueHelp.html>

K pohonu utahovací hlavy je zvolen jednofázový asynchronní motor s výkonem 180 W při otáčkách 1390 min^{-1} . Při těchto otáčkách dosahuje motor maximálního kroučícího momentu 1,2 Nm. Utahování bude probíhat za nepřetržitého chodu motoru, a tak na víčko bude kromě kroučícího momentu působit navíc setrvačná síla rotující hlavy.

Regulace utažení víčka je řešena přítlačnou silou utahovací hlavy na sklenici s víčkem. Po dosažení požadovaného momentu dojde k prokluzu víčka a utahovací hlavy a kroučící moment nebude dále přenášen na víčko. Motor se při tomto kroku nezastaví. Přítlak je vyvíjen pneumatickým válcem a velikost přítlačné síly je řízena redukčním ventilem stlačeného vzduchu (Obrázek 31).

Pro tuto sestavu byly využity některé díly z automatu Technogel Rotary 3000 (kapitola 6.1). Vyznačeny jsou tyrkysovou barvou a jejich seznam je uveden v kusovníku 1805-03-00-00 (viz. Příloha).

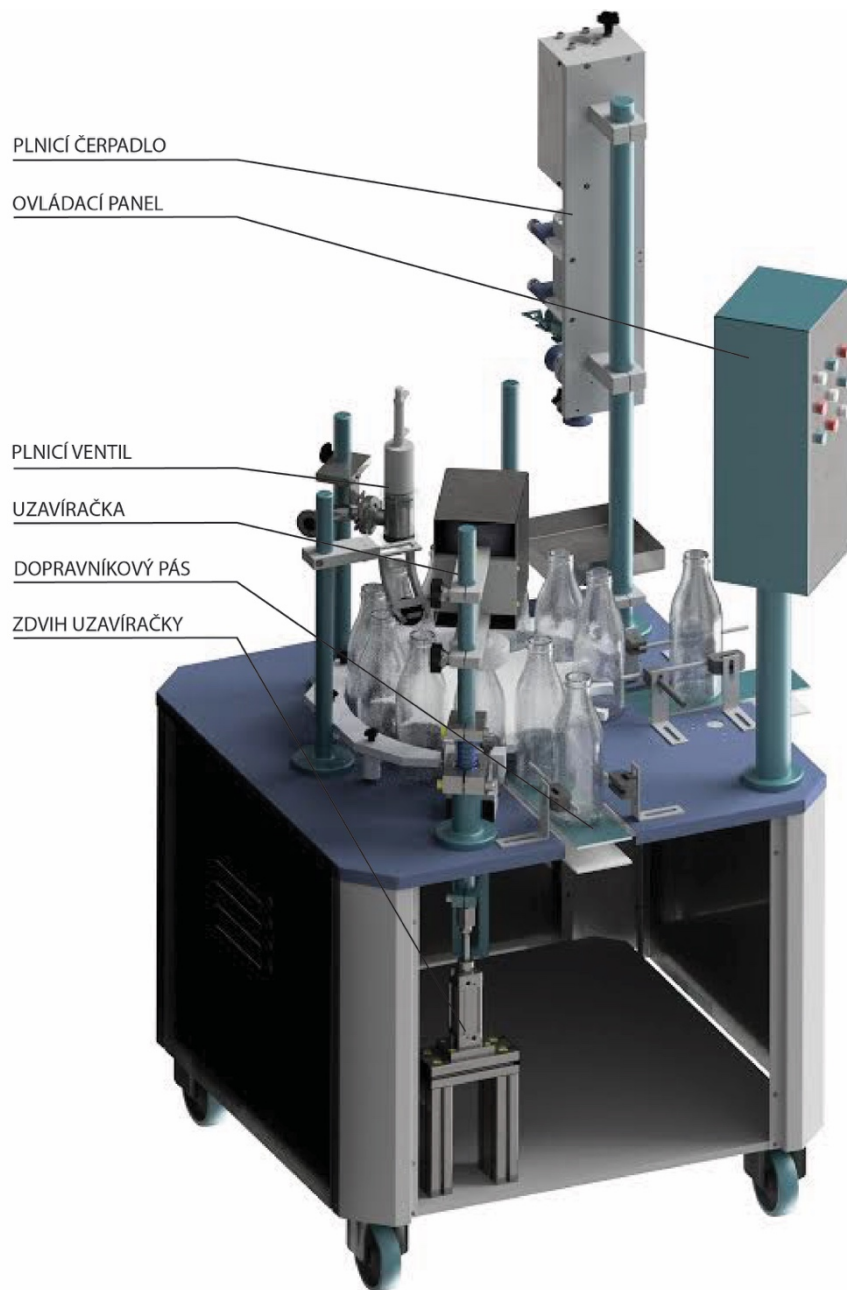


Obrázek 31: Detail zdvihu uzavíračky.

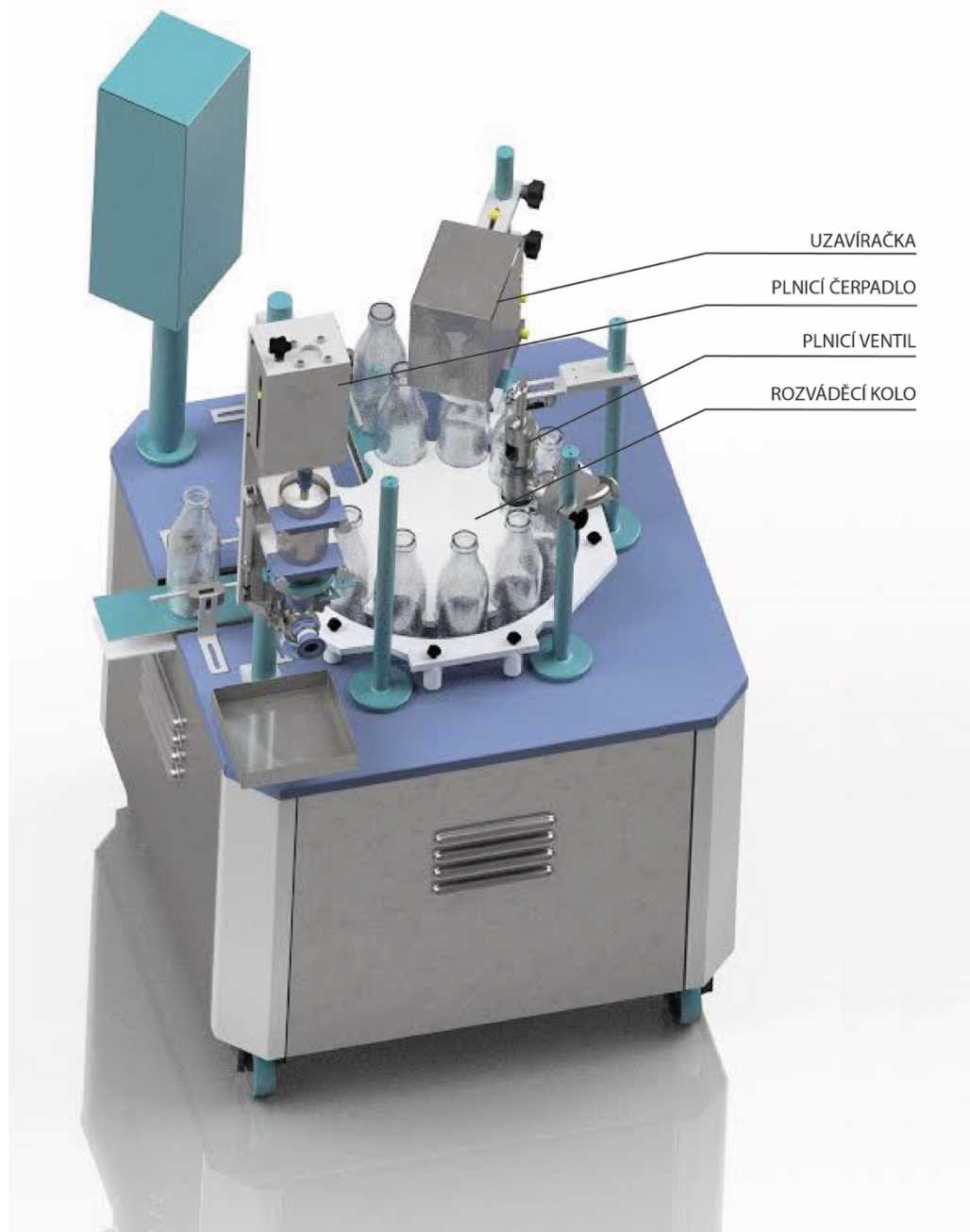
6.5.4 Sestava karuselu

Karuselová sestava je posledním krokem přestavby popsané v úvodu 6. kapitoly. Bude osazena plnicím ventilem (6.5.1), plnicím čerpadlem (6.5.2) a uzavíračkou (6.5.3). Doplněna bude o dopravníkové pásy pro transport prázdných sterilních sklenic do karuselu a plných uzavřených sklenic z prostoru karuselu.

Sestava karuselu bude realizována během prvních měsíců roku 2019, proto je v této práci uveden pouze koncept řešení a rozmístění výše popsaných zařízení v prostoru karuselu (Obrázek 32, Obrázek 33).



Obrázek 32: Koncept karuselové sestavy - přední pohled



Obrázek 33: Koncept karuselové sestavy - zadní pohled

6.6 Čištění

Čištění sestavy plnicího ventilu a čerpadla, které jsou ve styku s produktem, je prováděno ručně obsluhou. Dojde k demontáži Tri-Clamp objímek, matic s rýhovanou hlavou a veškeré díly spojené těmito prvky jsou obsluhou rozebrány a mechanicky očištěny od produktu. Poté jsou díly vloženy do 1 % vodného roztoku kyselého dezinfekčního přípravku. Zde jsou uchovány až do dalšího sestavení k použití.

7 Řízení

Mechanické logické řízení pohybů stroje, například vačkami, ozubenými koly či mechanickými pneumatickými koncovými senzory jsou dnes na ústupu díky stále se rozšiřující nabídce elektronických senzorů a řídicích jednotek. Pohyby stroje tak mohou být svázány pouze řídicí jednotkou. Cena této elektroniky rapidně klesá a dnes je možné zakoupit například koncový pákový snímač za 12 Kč s DPH za kus.²⁴ Dlouhodobá spolehlivost těchto low-endových snímačů není zaručena, a tak je výhodné se při výběru držet sortimentu prověřených dodavatelů, jako jsou společnosti SICK, Technoline a Lanbao. Nižší řady snímačů od těchto značek lze pořídit od 200 do 600 Kč s DPH za kus.

7.1 Sensorika

Senzory pracují na různých fyzikálních principech a tím je dána jejich vhodnost pro konkrétní aplikace. V následujících kapitolách jsou uvedeny příklady senzorů, vyskytujících se v tomto projektu.

7.1.1 Koncové polohy pneumatických válců

Pneumatické válce jsou od výrobce dodány s magnetem umístěným v pístu. Koncová poloha je snímána magnetickými snímači, pracujícími se změnami magnetického pole a s tím se měnícím indukovaným napětím ve snímači. Snímače jsou umístěny v T-drážce u válců s čtyřhranným tělem, u válců s trubkovým tělem jsou snímače připevněny k tělu pomocí stahovacích objímek. Snímače jsou nastaveny dle požadovaných koncových poloh při montáži.

7.1.2 Přítomnost sklenice

Přítomnost sklenice pod plnicí hlavou je kontrolována difuzním snímačem. Funkce tohoto snímače spočívá ve vyslání světelného paprsku o definované vlnové délce (závisí na snímaném materiálu, vzdálenosti), který je od snímaného materiálu odražen zpět do snímače. Ve většině aplikací je využito snímače s vysílačem a přijímačem v jednom těle. Pro využití v plnicím automatu navrhovaném v této práci je vybrán difuzní snímač se

²⁴ Koncový doraz pákový s kladkou 5A 125V, ECLIPSERA s.r.o. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz>

snímáním objektu v maximální vzdálenosti 100 mm od čela senzoru, s válcovým tělem opatřeným závitem M18x1.

7.1.3 Poloha rozváděcího kola

Polohu a otáčení rozváděcího kola zajišťuje krokový motor Nema34 s kroutícím momentem 8,7 Nm. Tento pohon zajišťuje natočení kola s přesností 1,8 °. Pro najíždění do počáteční polohy a kontrolu polohy je rozváděcí kolo po obvodu opatřeno ocelovými kolíky, vždy v mezeře mezi lahvemi. Kolíky jsou snímány indukčním snímačem. Tělo tohoto snímače tvoří cívka navinutá na feritovém jádře. Proud procházející cívkou vytváří magnetické pole kolem cívky. Pokud je vložen elektricky vodivý předmět před cívkou, jsou generovány v předmětu vířivé proudy. Tyto proudy změni impedanci cívky ve snímači, tato změna je vyhodnocena, zesílena a převedena na výstupní signál.

7.1.4 Přítomnost víček

Přítomnost kovových víček je sledována obdobně jako poloha rozváděcího kola, popsána v odstavci 7.1.3.

7.2 Řídicí členy

Pohyby akčních členů zajišťují řídicí členy. Do této kategorie patří pneumatické rozváděče stlačeného vzduchu pro pneumatické válce. Samotné rozváděče jsou vybaveny jednou či dvěma elektromagnetickými cívkami a jsou řízeny z řídicí jednotky elektrickým signálem. Dle signálu jsou cívky sepnuty a tím přestavena poloha rozváděče.

7.2.1 Rozváděč 5/2

Označení rozváděčů 5/2 značí takový rozváděč, který má 5 pneumatických připojení (1 vstup, 2 výstupy, 2 odvětrání) a 2 definované polohy výstupu stlačeného vzduchu. Rozváděče s jednou cívkou lze zakoupit jako NC (Normally closed) nebo NO (Normally open). Toto udává, do jakého výstupu bude směřován stlačený vzduch bez vstupu signálu do rozváděče.

Rozváděče 5/2 jsou využity pro takové aplikace, které nevyžadují zastavení pneumatického válce v určité poloze a pohybují se pouze mezi koncovými polohami, například válec plnicího ventilu a válec přepínání polohy 3-cestného ventilu čerpadla.

7.2.2 Rozváděč 5/3

Princip těchto rozváděčů je obdobný s těmi popsány v kapitole 7.2.1. Oproti nim má navíc třetí středovou polohu a druhou elektromagnetickou cívku. Ve střední poloze mohou být všechny vstupy a výstupy uzavřeny (válec je pevně zastaven v požadované poloze), oba vstupy pod tlakem (toto není vhodné pro zastavení pístu v požadované poloze díky rozdílným činným plochám pístu v pneumatickém válci. To má za následek pomalé vysunování válce) nebo oba vstupy odvětrané (s válcem je v této poloze možno volně pohybovat). Střední poloha je nastavena, pokud nepřichází signál ani na jednu z elektromagnetických cívek rozváděče.

Pro tento projekt byl využit rozváděč 5/3 s uzavřenými vstupy a výstupy ve středové poloze.

7.3 Řídicí systém

Řízení chodu automatu bude zajištěno modulárním PLC Siemens Simatic S7-1200.

Jak bylo již výše zmíněno, výroba a sestavení celého automatu bude probíhat na fáze.

K řízení dílčích sestav bude v tuto chvíli využito programovatelné relé EASY EXM-12DC-DA-RT-WIFI(Obrázek 34).²⁵



Obrázek 34: Programovatelné relé EASY EXM-12DC-DA-RT-WIFI

²⁵ Programovatelné jednotky – PLC, MIVALT s.r.o.

Dostupné z: http://www.mivalt.cz/images/produkty/elektronicka-ridici-zarizeni/programovatelne-jednotky-plc/PLC_EXM-12DC-DA-RT-Wifi.jpg

Relé EASY je výhodné pro jednoduché logické řízení. Vybavení pro bezdrátovou komunikaci umožňuje řízení z PC s operačním systémem Windows či z chytrých telefonů s operačním systémem Android. U chytrých telefonů s operačním systémem iOS je pro bezdrátové ovládání nutné zakoupení zpoplatněné aplikace.

K programovatelnému relé je možné připojit až 8 rozšiřujících modulů, například další digitální vstupy a výstupy, modul pro termočlánky a tranzistorové výstupy.

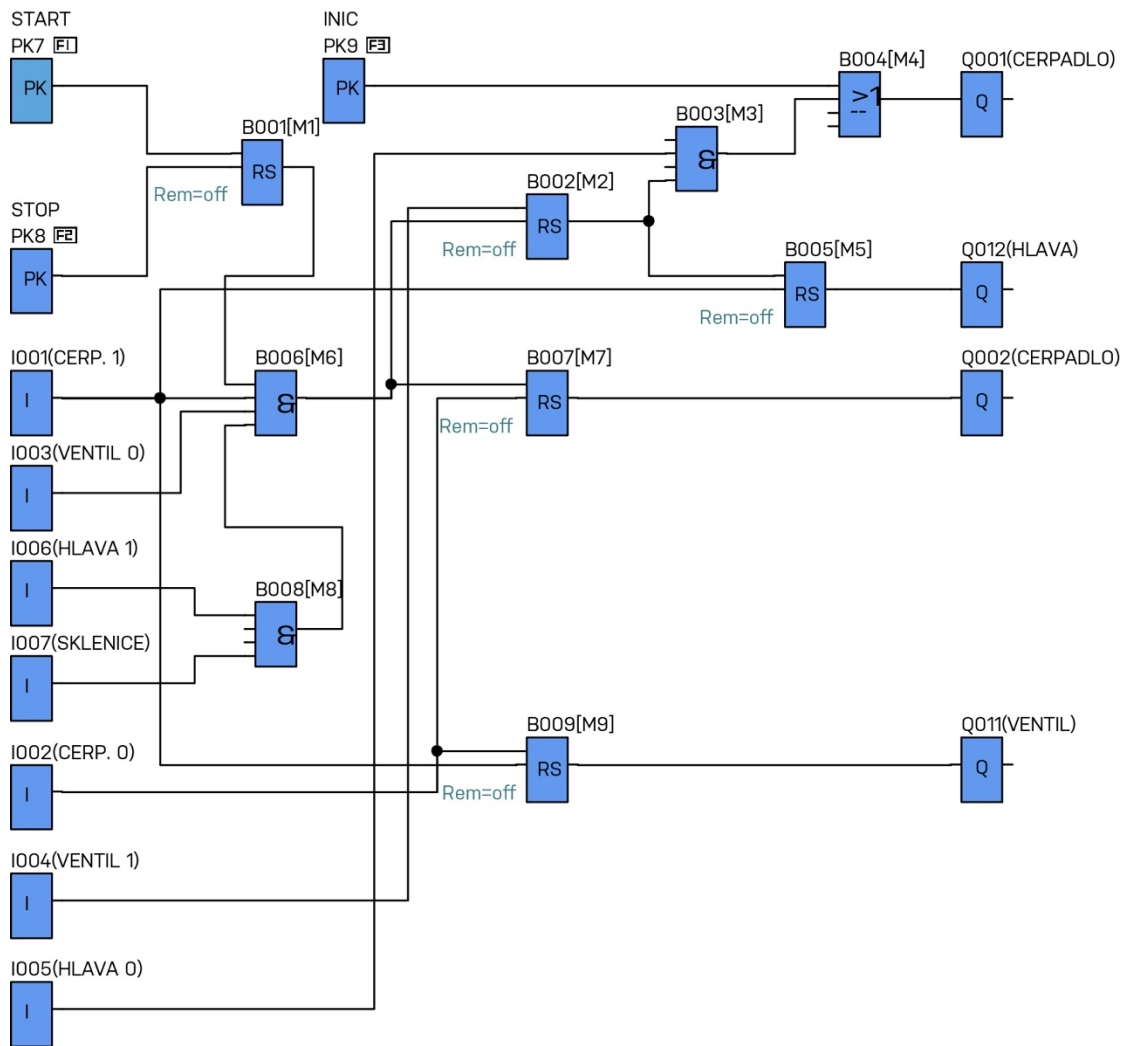
Programovací software je možné stáhnout zdarma ze stránek výrobce, je velmi jednoduchý a intuitivní, avšak vybavený velkým množstvím logických prvků a předpřipravených programů pro různé aplikace.

Elektrické zapojení senzorů a řídicí jednotky pro dílčí sestavy bude provedeno ve stejnosměrné síti s napětím 24 V. Hlavním důvodem je bezpečnost provozu, jelikož zařízení budou sloužit pro plnění vodivých kapalin. Častá manipulace obsluhou se zařízeními může mít za následek porušení izolace vodičů a střídavá síť s napětím 230 V by tak mohla být pro obsluhu nebezpečná.

Dalším z důvodů je unifikace zdroje napájení. Některé senzory je možné zakoupit pro stejnosměrnou síť, některé pro střídavou. Řídicí jednotky jsou však dodávány pouze pro stejnosměrnou síť. Zdroj pak bude sloužit jak pro senzory, tak pro řídicí jednotku.

7.3.1 Schéma logického řízení

Mezi prvními vyráběnými a do provozu nasazenými sestavami bude plnicí ventil (kapitola 6.5.1) a plnicí čerpadlo (kapitola 6.5.2). Řízeny budou spolu s plničkou marmelády, která není součástí této práce. Následující schéma (Obrázek 35) zobrazuje návrh řízení plnicího čerpadla a ventilu.



Obrázek 35: Schéma logického řízení

Najíždění válce plnicího čerpadla do počáteční pozice je řešeno tlačítkem INIC. Spuštění pracovního cyklu se provádí stisknutím tlačítka START. Cyklus je opakovaně prováděn, pokud je splněna podmínka přítomnosti sklenice pod plnicím ventilem nebo pod hrdlem plničky marmelády. Dále musí být splněny podmínky přítomnosti pneumatických válců v koncových polohách. Po naplnění výrobní série je cyklus ukončen tlačítkem STOP.

8 Závěr

Návrh funkčního procesního zařízení závisí na správně určených parametrech látek, se kterými bude zařízení pracovat. V úvodní části práce byly zjištěny hlavní procesní parametry, a to teplota plnění, hustota a viskozita plněné suspenze. S pomocí simulace proudění v softwaru Ansys-Fluent byla určena optimální rychlost proudění rostlinného mléka plnicí tryskou, aby nedocházelo k pění mléka a jeho vytékání z hrdla lahve. Na základě analytických výpočtů byla nastavena numerická simulace proudění, která byla následně ověřena experimentem. Výsledkem je optimální rychlost, kdy nedochází k napění mléka a k úniku tekutiny hrdlem lahve následkem vysoké rychlosti plnění. Hodnota optimální rychlosti proudění je dle experimentů a simulace 0,4 m/s. Na základě optimální rychlosti plnění je možné určit dobu potřebnou k naplnění lahve, jejíž hodnota je 3,54 s. Takt plnicího stroje je tedy i s časovou rezervou na výměnu sklenice pod plnicím ventilem 4 s. Hodinová produkce činí 900 kusů lahví s objemem 250 ml.

Po důkladné rešerši v průmyslu využívaných konstrukčních řešení plnicích a uzavíraček bylo navrženo unikátní řešení právě pro potřeby společnosti Nemléko s.r.o. K sestavám plnicího čerpadla, ventilu a uzavíračky byla zpracována kompletní výrobní dokumentace (viz. Příloha). Při konstrukci bylo nutné brát ohled na teplotní roztažnost pohyblivých součástí při plnění horkého produktu při teplotě 80 °C. Výsledkem analýzy teplotní roztažnosti součástí jsou tolerované průměry válce čerpadla $\varnothing D = 81,5_{0}^{0,05}$ a pístu čerpadla $\varnothing d = 81,5_{-0,8}^{-0,7}$. Obdobně pro válce ventilu $\varnothing D = 30_{-0,05}^{0,05}$ a pístu ventilu $\varnothing d = 30_{-0,42}^{-0,32}$.

Sestavy plnicího čerpadla a ventilu budou jako první realizovány a zkušeny v provozu s dopravníkovým pásem. K sestavě plnicího čerpadla a plnicí hlavy byl navržen řídicí systém pro programovatelné relé.

Součástí práce je také koncept přestavby plnicího automatu mražených výrobků Technogel Rotary 3000 a jeho osazení novými sestavami, jehož realizace je plánována na začátek roku 2019.

9 Seznam použité literatury

Automatic Rinsing/Filling/Capping 8-8-4 Juice Filling Machine with CIP Cleaning System, 2016. [online]. Beverage Machinery. [cit. 22.5.2018]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Hirxuum5jBE>

Automatické uzavíračky lahví ULA, [online]. ALTEC spol s.r.o. [cit. 20.6.2018]. Dostupné z: <http://www.altec-chotebor.cz/47-uzaviracky-automaticke-ula.html>

Awad R.A., Hassan Z.M.R. and Salama Wafaa M., 2014. *Surface Tension and Foaming Properties as a Simple Index in Relation to Buffalo Milk Adulteration*. International Journal of Dairy Science, 9: 106-115. Dostupné z: <https://scialert.net/abstract/?doi=ijds.2014.106.115>

BAKKER, André. Applied Computational Fluid Dynamics. 2002. Dostupné z: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>

BOJKO, Marian.: 3D Proudění – ANSYS FLUENT. Vyd. 1. V Ostravě: Ediční středisko VŠB – TUO, 2012, 309 s. ISBN 978-80-248-2607-3.

Bottle-sealing device, 1892. [online]. Google Patents. [cit. 20.6.2018]. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US468226>

Depaletizátory, [online]. Alvey manex a.s. [cit. 16.5.2018]. Dostupné z: <http://www.alvey.cz/paletizacni-a-depaletizacni-systemy/depaletizatory/>

Etiketovací linky, [online]. TECHNOLOGY s.r.o. [cit. 10.5.2018]. Dostupné z: <http://www.technology.cz/balici-stroje/etiketovaci-linky>

Female Threaded Ferule, [online]. MEGAIRON. [cit. 29.5.2018]. Dostupné z: <https://www.aliexpress.com/item/NEW-style2-Pcs-1-2-DN15-Sanitary-Female-Threaded-Ferrule-Pipe-Fittings-Tri-Clamp-Gasket-Stainless/32408340813.html>

Filling Machines for Products That Foam, [online]. Liquid Packaging Solutions, Inc. [cit. 13.3.2018]. Dostupné z: <https://www.liquidpackagingsolution.com/news/filling-machines-for-products-that-foam>

GRAVITY FILLING MACHINE PRINCIPLES [online]. APACKS [cit. 12.3.2018]. Dostupné z: <http://www.apacks.com/gravity-filling-machine-principles>

Honec J., Richter M., Valenta P., Brambor J.: *VIZUÁLNÍ KONTROLA VRATNÝCH OBALŮ V POTRAVINÁŘSKÝCH LINKÁCH*, [online]. [cit. 20.6.2018]. Praha: 2002.

ISBN: 1213- 8134. Dostupné z:

[http://cmm.ensmp.fr/~brambor/public/docs/publications/\(HonecRichtValenB02\)Vizualni-kontrola-vratnych-obalu-v-potravinarskych-linkach.cz.pdf](http://cmm.ensmp.fr/~brambor/public/docs/publications/(HonecRichtValenB02)Vizualni-kontrola-vratnych-obalu-v-potravinarskych-linkach.cz.pdf)

Choosing the Pressure-Velocity Coupling Method, 2006. [online]. Fluent Inc. [cit. 22.5.2018].

Dostupné z: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node1021.htm>

Katalog výrobce plnicích zařízení, [online]. [cit.20.3.2018]. Accutek Packaging Equipment Companies, Inc.

Dostupné z: <https://www.accutekpackaging.com/uploads/images/2.jpg>

Koncový doraz pákový s kladkou 5A 125V, [online]. ECLIPSERA s.r.o.

[cit. 28.6.2018]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz>

KRATOCHVÍLE, Antonín. *Lahvárenská technika*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství SNTL, 1983,

MUKHERJEE N., BANSAL B., CHEN X. D., *MEASUREMENT OF SURFACE TENSION OF HOMOGENISED MILKS*. 2005. [online]. [cit. 20.6.2018]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/37988127_Measurement_of_Surface_Tension_of_Homogenised_Milks

Myčky lahví pro velmi nízké výkony, [online]. NATE – nápojová technika a.s.

[cit. 20.3.2018]. Dostupné z: <http://www.nate.cz/226-mycky-lahvi-pro-velmi-nizke-vykony.html>

Násypky, [online]. Vondra a Vondra s.r.o. [cit. 20.6.2018].

Dostupné z:

<http://www.vondra-vondra.cz/cz/katalog/44-nasyvky/260-kuzelove-typ-nkf/>

PAC Low-Energy Bottle Washing Machine, [online]. PAC Global GmbH. [cit. 2.4.2018].

Dostupné z: <http://www.pacglobal.ch/en/top-nav/contact.html>

PAINTER, William, Bottle-sealing device, [online]. United States Patent Office.

[cit. 2.4.2018]. No. 468,226. 2.2.1892.

Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US468226>

PE 500 [PE-HMW] Polyetylen, [online]. EPP Plasty a.s. [cit. 20.3.2018].

Dostupné z: <http://www.eppplasty.cz/pe500.php>

PTFE – technické informace, [online]. [cit.20.3.2018]. SITTECH CZ, s.r.o.

Dostupné z: <http://www.sittech.cz/ptfe-technicke-informace>

RIEGER, František. NOVÁK, Václav. JIROUT, Tomáš. *Hydromechanické procesy I*. 1. vyd.

Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, ISBN 80-01-03286-8

ROTARY FILLERS, [online].. TECHNOGEL S.P.A. [cit.15.5.2018]

Dostupné z: <http://www.technogel.com/en/industrial-line/14/rotary-fillers>

Rotary liquid filler, [online]. LAUB/HUNT PACKAGING SYSTEMS. [cit. 29.3.2018].

Dostupné z: <http://www.laubhunt.com/admin/IMAGE/Product/PGfillerWeb.doc.pdf>

Specifikace těsnících materiálů, [online]. Armat spol s.r.o. [cit. 20.3.2018]. Dostupné z:

<http://www.armat.cz/pdf/specifikace-tesnicich-materialu-epdm-silikon-ptfe-viton-nbr.pdf>

Technologie UV-C, [online]. UVC Servis s.r.o. [cit. 20.3.2018].

Dostupné z: <http://uvc.cz/uv-dezinfekce.html>

TORQUE GUIDE, [online]. SKS Bottle & Packaging, Inc. [cit. 22.6.2018].

Dostupné z: <https://www.sks-bottle.com/TorqueHelp.html>

Waterfall cap feeders, [online]. Linapack Co. Ltd. [cit. 20.6.2018].

Dostupné z: http://www.linapack.com/ancillary_cf.html

WILSON, Michael, Daniel M. MULVIHILL, William J. DONNELLY and Brian P. GILL, 1989.

Surface active properties at the air–water interface of β -casein and its fragments derived by plasmin proteolysis. *Journal of Dairy Research* [online]. B.m.: Cambridge University Press, vol. 56, no. 3, pp. 487–494.

Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/S0022029900028971>

ZENGENI, Brian T., *BINGHAM YIELD STRESS AND BINGHAM PLASTIC VISCOSITY OF HOMOGENEOUS NON-NEWTONIAN SLURRIES*, [online]. 2016. [cit. 20.5.2018].

Dostupné z: <http://etd.cput.ac.za/bitstream/handle/20.500.11838/2458/210233265-Zengeni-Brian-Tonderai-Mtech-Mechanical-Engineering-Eng-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

10 Seznam symbolů

SYMBOL	VELIČINA	JEDNOTKA
d	Průměr	m
m	Hmotnost	kg
m_0	Hmotnost prázdného pyknometru	g
m_p	Hmotnost plného pyknometru	g
Re_{krit}	Kritická hodnota Reynoldsova čísla	-
S	Průřez	m ²
t	Čas	s
t_0	Čas zahájení plnění	s
t_f	Čas ukončení plnění	s
T	Teplota	°C
\bar{u}	Střední rychlost	m·s ⁻¹
V	Objem	m ³
\dot{V}	Objemový průtok	m ³ ·s ⁻¹
$\dot{\gamma}$	Rychlost smykové deformace	s ⁻¹
μ	Dynamická viskozita	Pa·s
$\mu_{80^\circ C}$	Dynamická viskozita při teplotě 80 °C	Pa·s
ρ	Hustota	kg·m ⁻³
$\rho_{80^\circ C}$	Hustota při teplotě 80 °C	kg·m ⁻³
σ	Povrchové napětí	N·m ⁻¹
τ	Napětí	Pa
τ_0	Počáteční napětí	Pa
$\tau_{25^\circ C}$	Napětí při teplotě 25 °C	Pa
$\tau_{80^\circ C}$	Napětí při teplotě 80 °C	Pa

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Myčka lahví	9
Obrázek 2: Optická kontrola lahví	10
Obrázek 3: Průběh výškového plnění	11
Obrázek 4: Proces nasazování šroubových víček	12
Obrázek 5: Proces nasazování narážecích víček	13
Obrázek 6: Schéma korunkového uzávěru	14
Obrázek 7: Vibrační podavač	15
Obrázek 8: Vertikální podavač víček	15
Obrázek 9: Etiketovací automat válcových obalů	16
Obrázek 10: Grafická závislost hustoty vody a rostlinného mléka na teplotě	18
Obrázek 11: Grafická závislost napětí na smykové rychlosti deformace	20
Obrázek 12: 3D model lahve	22
Obrázek 13: 2D Geometrie lahve importovaná do AutoCADu.	23
Obrázek 14: Geometrie importovaná do Design Modeleru	24
Obrázek 15: Sít geometrie	25
Obrázek 16: Kontrola sítě	25
Obrázek 17: Grafické znázornění počtu elementů na jejich kvalitě	26
Obrázek 18: Průběhy residuí výpočtu plnění symetrické geometrie	29
Obrázek 19: Průběhy rychlosti plnění	30
Obrázek 20: Průběhy plnění při různých rychlostech nátoku mléka do lahve	31
Obrázek 21: QR kód s odkazem na video experimentu a numerické simulace	32
Obrázek 22: Technogel Rotary 3000	33
Obrázek 23: Sestava Tri-Clamp potravinářského spojení	35
Obrázek 24: Detail uložení 3-cestného ventilu	36
Obrázek 25: Teplotní závislost výrobních tolerancí plnicího čerpadla.	37
Obrázek 26: Teplotní závislost výrobních tolerancí plnicího ventilu	39
Obrázek 27: Detail plnicího ventilu	40
Obrázek 28: Detail těsnění kuželky	40
Obrázek 29: Detail plnicího čerpadla	41
Obrázek 30: Uzavíračka	42
Obrázek 31: Detail zdvihu uzavíračky.	44
Obrázek 32: Koncept karuselové sestavy - přední pohled	45
Obrázek 33: Koncept karuselové sestavy - zadní pohled	46
Obrázek 34: Programovatelné relé EASY EXM-12DC-DA-RT-WIFI	49
Obrázek 35: Schéma logického řízení	51

12 Seznam rovnic

Rovnice 3-1: Výpočet hustoty	17
Rovnice 3-2: Regresní funkce hustoty	18
Rovnice 3-3: Binghamský model	20
Rovnice 3-4: Výpočet smykového napětí při 25°C	20
Rovnice 3-5: Výpočet smykového napětí při 80°C	20
Rovnice 3-6: Výpočet Reynoldsova čísla	21
Rovnice 3-7: Výpočet střední rychlosti	21
Rovnice 3-8: Výpočet střední rychlosti	21
Rovnice 3-9: Výpočet doby plnění	21
Rovnice 5-1: Skewness	25
Rovnice 6-1: Výpočet teplotní dilatace	37

13 Seznam tabulek

Tabulka 1: Vypočtené hodnoty hustoty v závislosti na teplotě	18
Tabulka 2: Koeficienty regresních rovnic	20
Tabulka 3: Hodnoty deformace elementů sítě	25
Tabulka 4: Hodnoty časových kroků, jejich počet, počet iterací výpočtu	28
Tabulka 5: Experimentální hodnoty plnění	31
Tabulka 6: Vstupní hodnoty pro výpočet teplotní roztažnosti plnicího čerpadla	37
Tabulka 7: Vypočtené hodnoty vyšetřovaných rozměrů plnicího čerpadla	37
Tabulka 8: Vstupní hodnoty pro výpočet teplotní roztažnosti plnicího ventilu	38
Tabulka 9: Vypočtené hodnoty vyšetřovaných rozměrů plnicího čerpadla	38

14 Seznam příloh

1805-00-00-00	SESTAVA KARUSELU
1805-01-00-00	SESTAVA PLNIČKY
1805-01-00-01	ZÁKLADNÍ DESKA
1805-01-00-02	DRŽÁK PÍSTU
1805-01-00-03	STAVĚCÍ ŠROUB
1805-01-00-04	DRŽÁK SNÍMAČE
1805-01-00-05	ČEP
1805-01-00-06	DRŽÁK VÁLCE
1805-01-00-07	DRŽÁK VÁLCE HORNÍ
1805-01-00-08	PLECH VENTILU
1805-01-00-09	VLOŽKA ŠROUBU M4
1805-01-00-10	SPOJKA
1805-01-00-11	PÍSTNICE
1805-01-00-12	PÍST
1805-01-00-13	PÁKA
1805-01-00-14	KRYT VÁLCE
1805-01-01-00	SESTAVA VÁLCE
1805-01-01-01	CLAMP VÍČKO DN80
1805-01-02-00	SESTAVA VÍČKA
1805-01-02-01	CLAMP VÍČKO DN80
1805-01-03-00	SESTAVA ŠROUBENÍ
1805-01-03-01	NIPL DN25
1805-02-00-00	SESTAVA PLNICÍ HLAVY
1805-02-00-01	KUŽELKA PLNIČE
1805-02-00-02	HŘÍDEL KUŽELKY
1805-02-00-03	SPOJKA PÍSTU
1805-02-00-04	DRŽÁK HLAVY
1805-02-00-05	CLAMP VÍČKO DN25
1805-02-01-00	SESTAVA TĚLA VENTILU
1805-02-01-01	TĚLO PLNIČE
1805-02-01-02	TR28x1,5
1805-02-02-00	SESTAVA KOLENA
1805-02-02-01	PLECH KOLENA
1805-02-03-00	SESTAVA VÍKA HLAVY
1805-02-03-01	PŘÍRUBA HLAVY
1805-02-03-02	TR50x1
1805-02-03-03	VÍČKO HLAVY
1805-03-00-00	SESTAVA UZAVÍRAČKY
1805-03-00-01	SVĚRNÝ SPOJ
1805-03-00-02	SVĚRNÝ SPOJ
1805-03-01-00	SESTAVA MOTORU
1805-03-01-01	DESKA MOTORU
1805-03-01-02	SVĚRNÝ SPOJ
1805-03-01-03	DESKA BOČNÍ
1805-03-01-04	TRUBKOVÁ SPOJKA
1805-03-01-05	HLAVA UTAHOVAČKY
1805-03-01-06	PLECH MOTORU