

Vliv geometrie a uspořádání tokových cest vstřikovacího nástroje na vlastnosti taveniny

Bc. Kamil Kyas

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kamil KYAS**

Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **Vliv geometrie a uspořádání tokových cest
vstřikovacího nástroje na vlastnosti taveniny**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární studii na dané téma.
2. Proveďte analýzy vstřikovacího procesu v programu Cadmould Rubber.
3. Navrhněte úpravy formy a proveďte vstřikování vzorků.
4. Vyhodnoňte a diskutujte získané výsledky.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

dle zadání vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

20. února 2009

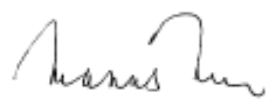
Termín odevzdání diplomové práce:

20. května 2009

Ve Zlíně dne 16. února 2009



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
vedoucí katedry

ABSTRAKT

V teoretické části byla popsána problematika vstřikování se zaměřením na vstřikování elastomerů, dále byly zmíněny základní typy vstřikovacích strojů, problematika konstrukce vstřikovacích forem a vstřikovaných výrobků.

V praktické části byla provedena analýza vstřikovacího procesu elastomerní směsi pro firmu Rubena a.s. Dále byl sledován vliv vstřikovacího tlaku a drsnosti povrchu na zatékavost elastomerní směsi. V poslední části byl zkoumán vliv geometrie a uspořádání tokových cest vstřikovacího nástroje na vlastnosti taveniny. Jednotlivé návrhy trajektorií byly zhodnoceny analýzami v programu Cadmould.

Klíčová slova: Zatékavost, vstřikování, vstřikovací tlak, elastomer,

ABSTRACT

In the theoretical part there was written about injection molding process especially about injection elastomers. As well as there was described basic types of injection molding machines, problems about construction of injection moulding and injected products.

In the practical part, analysis of the injection process with rubber compounds was made for the company Rubena a.s. Further influence of injection pressure and surface roughness on fluidity of elastomer was examined. In the last part influence on geometry and layout flow channel of injection molding tool on properties of melt was researched. Each suggestions of trajectory was reviewed by analysis in the Cadmould software.

Keywords: Fluidity, injection molding, injection pressure, elastomer

Velmi rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří přispěli svými radami ke vzniku této diplomové práce. Zvláště pak chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Staňkovi, Ph.D. za odborné rady a čas, který mi po dobu vytváření této práce věnoval. Zároveň bych ještě poděkoval doc. Ing. Miroslavu Maňasovi, CSc., Ing. Davidu Maňasovi, Ph.D. a Ing. Ondřeji Wilczynskému, Ph.D. za odborné konzultace.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně, 20.5.2008

podpis

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 9 |
| I TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1 VSTŘIKOVÁNÍ | 11 |
| 1.1 VSTŘIKOVÁNÍ ELASTOMERŮ | 11 |
| 1.2 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS ELASTOMERŮ..... | 11 |
| 2 VSTŘIKOVACÍ STROJ | 14 |
| 2.1 VSTŘIKOVACÍ JEDNOTKA..... | 14 |
| 2.1.1 Vstřikovací jednotka bez předplastikace..... | 15 |
| 2.1.2 Vstřikovací jednotka s předplastikací | 16 |
| 2.2 UZAVÍRACÍ JEDNOTKA..... | 17 |
| 2.2.1 Hydraulická uzavírací jednotka..... | 18 |
| 2.2.2 Hydraulicko-mechanická uzavírací jednotka | 18 |
| 2.2.3 Elektromechanická uzavírací jednotka..... | 18 |
| 2.3 OVLÁDÁNÍ A ŘÍZENÍ VSTŘIKOVACÍHO STROJE..... | 18 |
| 3 VSTŘIKOVACÍ FORMA | 19 |
| 3.1 KONSTRUKCE FOREM..... | 19 |
| 3.1.1 Postup při konstrukci formy | 20 |
| 3.1.2 Zaformování výstřiku | 20 |
| 3.1.3 Dimenzování tvarové dutiny | 21 |
| 3.2 DOPRAVA TAVENINY Z VSTŘIKOVACÍHO STROJE DO DUTINY | 22 |
| 3.2.1 Vstřikovací tryska..... | 22 |
| 3.2.2 Rozváděcí kanály | 23 |
| 3.2.3 Vtokové ústí | 25 |
| 3.3 VYHAZOVACÍ SYSTÉMY | 25 |
| 3.3.1 Vyhazování pomocí vyhazovacích kolíků..... | 26 |
| 3.3.2 Pneumatické vyhazování..... | 26 |
| 3.3.3 Ruční a mechanické vyhazování | 26 |
| 3.4 ODVZDUŠNĚNÍ FOREM | 26 |
| 3.5 TEMPERACE FOREM | 27 |
| 3.6 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PŘI VÝROBĚ FOREM..... | 28 |
| 4 PROBLÉMY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ ELASTOMERŮ | 29 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 4.1 | SMRŠTĚNÍ A ROZMĚROVÁ STÁLOST VÝROBKU | 29 |
| 4.2 | SOUDRŽNOST A PŘILNAVOST | 29 |
| 4.3 | PROPADLINY | 29 |
| 4.4 | PŘEDČASNÁ VULKANIZACE | 30 |
| 4.5 | POMERANČOVÁ KÚRA | 30 |
| 4.6 | PÓROVITOST | 30 |
| 4.7 | VZDUCHOVÉ KAPSY | 30 |
| 5 | CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI KAUČUKU A PRYŽE..... | 31 |
| 5.1 | ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI KAUČUKŮ..... | 32 |
| 5.1.1 | Teplota skelného přechodu..... | 32 |
| 5.1.2 | Viskozita | 33 |
| 5.1.3 | Vulkanizovatelnost..... | 34 |
| 5.2 | ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI PRYŽE | 35 |
| 5.3 | SLOŽKY KAUČUKOVÉ SMĚSI | 36 |
| 5.3.1 | Kaučuk | 36 |
| 5.3.2 | Vulkanizační přísady..... | 37 |
| 5.3.3 | Antidegradanty | 38 |
| 5.3.4 | Plniva..... | 38 |
| 5.3.5 | Změkčovadla | 39 |
| 5.3.6 | Zvláštní přísady | 39 |
| 5.4 | VULKANIZACE KAUČUKOVÉ SMĚSI | 39 |
| 5.5 | CHEMICKÉ ZMĚNY PŘI EXPLOATACI A STÁRNUTÍ PRYŽE..... | 40 |
| 5.5.1 | Účinek ozonu | 40 |
| 5.5.2 | Účinek kyslíku..... | 40 |
| 5.5.3 | Anaerobní stárnutí | 41 |
| 6 | COMPUTER AIDED ENGINEERING (CAE)..... | 42 |
| 6.1 | CADMOULD RUBBER | 42 |
| II | STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE | 43 |
| III | PRAKTICKÁ ČÁST | 45 |
| 7 | ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU | 46 |
| 7.1 | ZÍSKÁNÍ MATERIÁLOVÝCH DAT PRO SIMULACI V PROGRAMU CADMOULD | 46 |
| 7.1.1 | Rychlost vulkanizace..... | 48 |
| 7.1.2 | Komplexní dynamická viskozita..... | 49 |
| 7.2 | NASTAVENÍ PROCESNÍCH PARAMETRŮ..... | 49 |
| 7.3 | VÝSLEDKY ANALÝZ..... | 50 |
| 7.3.1 | Plnění dutiny | 50 |
| 7.3.2 | Průběh teplotního pole | 50 |
| 7.3.3 | Průběh stupně vulkanizace | 53 |
| 7.3.4 | Studené spoje | 56 |
| 7.3.5 | Vzduchové kapsy | 57 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 8 | VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ A DRSNOSTI POVRCHU NA PLNĚNÍ DUTINY FORMY | 58 |
| 8.1 | VSTŘIKOVACÍ STROJ | 58 |
| 8.2 | VSTŘIKOVACÍ FORMA | 59 |
| 8.2.1 | Spodní část formy..... | 59 |
| 8.2.2 | Horní díl formy..... | 60 |
| 8.3 | PROCESNÍ PODMÍNKY | 61 |
| 8.4 | ZKUŠEBNÍ VZOREK | 61 |
| 8.5 | VÝSLEDKY MĚŘENÍ | 62 |
| 9 | VLIV TVARU TRAJEKTORIE NA PLNĚNÍ DUTINY FORMY | 64 |
| 9.1 | NASTAVENÍ ANALÝZY | 64 |
| 9.2 | ANALÝZA JEDNOTLIVÝCH TRAJEKTORIÍ..... | 64 |
| 9.2.1 | Trajektorie 1 | 64 |
| 9.2.2 | Trajektorie 2 | 70 |
| 9.2.3 | Trajektorie 3 | 75 |
| 9.2.4 | Trajektorie 4 | 80 |
| 9.2.5 | Trajektorie 5 | 85 |
| 9.2.6 | Trajektorie 6 | 89 |
| | DISKUZE VÝSLEDKU | 94 |
| | ZÁVĚR | 96 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 97 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 99 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 100 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 103 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 104 |

ÚVOD

Technologie vstřikování se za posledních několik let ukázala jako velmi dobrý výrobní proces. Je ale velkou snahou tuto výrobu zdokonalovat a také použít jiné materiály, jako jsou třeba i elastomery.

Jak je známo elastomerní směsi se skládají z různých přísad a z rozdílného množství, proto každá směs je „originál“ a má různé tokové vlastnosti. Tyto vlastnosti lze změřit pomocí RPA 2000 (Rubber Process Analyzer) a pomocí změřených dat lze simulovat vstřikovací proces díky softwaru Cadmould rubber.

Během posledního desetiletí je od vstřikovaných výrobků vyžadována především vysoká rozměrová pevnost. Tento požadavek může být splněn pouze při dodržení optimálních zpracovatelských parametrů.

Tato práce se zabývá vlivem geometrie a uspořádáním tokových cest vstřikovacího nástroje na vlastnosti taveniny. Vlivem geometrie tokových cest je myšlena změna tvaru průřezu, vliv délky kanálu a dalších parametrů.

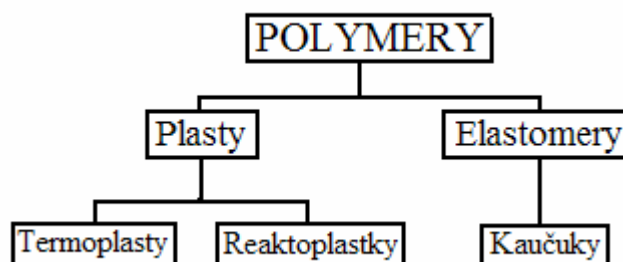
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je nejrozšířenějším způsobem výroby požadovaných dílů z polymerů. Vyznačuje se poměrně složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a forma. V průběhu vstřikování je roztavený plast ve vstřikovací stroji tlakem dopravován do dutiny formy a tam ochlazen ve tvaru vyráběné součásti. [1]

Je nesporné, že kvalita použitého plastu bude vždy důležitá a volba správného typu bude mít podstatný vliv na konečnou aplikaci. Je třeba si také uvědomit, že správná volba plastu může být degradována nesprávným technologickým postupem, který je nutno dokonale znát a u výroby ho respektovat. [1]

Vstřikování lze rozdělit podle druhu vstřikovaného materiálu. V dnešní době lze běžně vstřikovat všechny druhy polymerů: termoplasty, reaktoplasty i kaučuky.



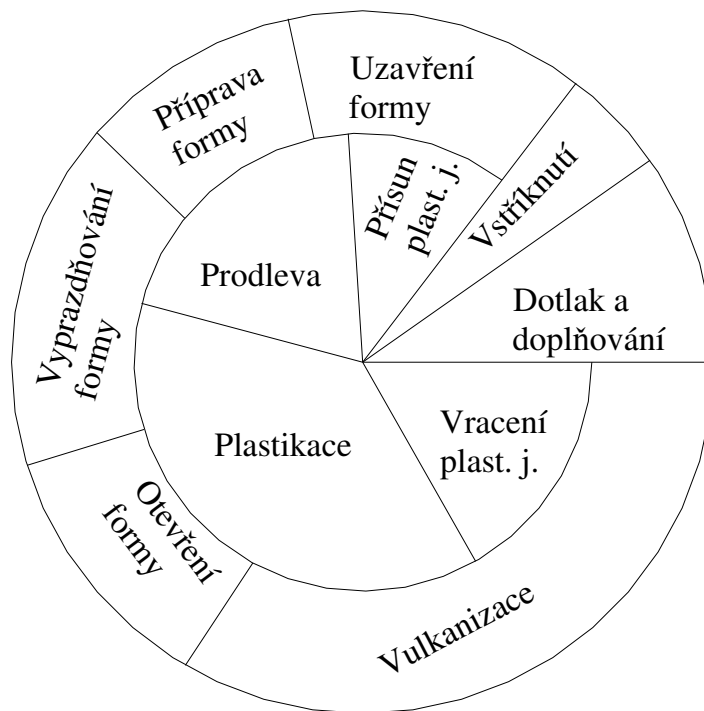
Obr. 1. Základní rozdělení polymeru

1.1 Vstřikování elastomerů

Vstřikování elastomerů se stává nejlépe zavedeným pracovním procesem i v gumárenském průmyslu. Má spoustu výhod oproti ostatním technologiím na zpracování kaučukové směsi. Tyto výhody zahrnují snížení mzdových nákladů, kratší časy potřebné k vulkanizaci směsi, lepší rozměrovou kontrolu a odpovídající mechanické vlastnosti výrobku. [8]

1.2 Vstřikovací cyklus elastomerů

Vstřikovací cyklus, jak lze vidět na Obr. 2., zahrnuje dvě oblasti. Jedna se vztahuje k plastikační jednotce, druhá k formě. K uzavřené formě se přisune plastikační jednotka, ze které se vstříkne zplastikovaný materiál do dutiny formy. [4]



Obr. 2. Vstřikovací cyklus elastomerů

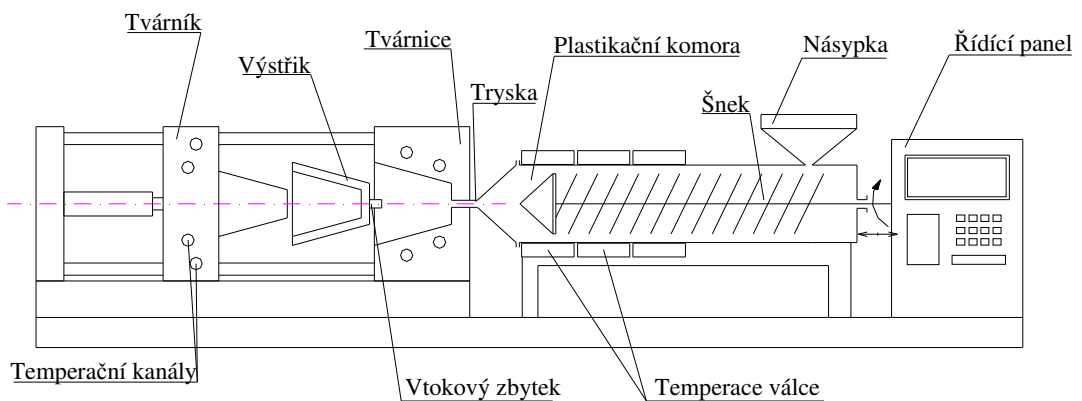
Doba, po kterou se plní dutina formy, se nazývá doba plnění. Po zaplnění dutiny formy se působí na materiál dále tlakem, který se nazývá dotlak. Dotlak bývá stejný nebo nižší než vstřikovací tlak. Doba, po kterou působí dotlak, se nazývá doba doplňování. Smyslem dotlaku je částečně vyrovnat vliv smrštění a zabránit unikání materiálu z dutiny formy. Doba doplňování je omezena zatuhnutím materiálu ve vtokovém systému. Potom již její další prodlužování nemá vliv na tlakové poměry v dutině formy. Dotlak ztrácí význam u tenkostěnných výstřiků. Po zatuhnutí vtokového ústí následuje vulkanizace, během které se ze syrové kaučukové směsi, za pomoci vulkanizačního činidla, zvýšené teploty a tlaku, stává elastický vulkanizát. Tato z vulkanizovaná pryž je vyhozena a chlazená pomocí vzduchu.

Časová prodleva před zahájením nového cyklu slouží pro uložení vložek do formy, případně k úpravě dutiny formy, odstranění zbytků materiálu a přetoků. Při vstřikování elastomeru se často používá separačního prvku, který se nanese na tvarové části, protože pryž má tendenci k přilepení se na stěny formy. U plně automatizovaných procesů tato prodleva prakticky odpadá. [4]

Při vstřikování termoplastů je vstřikovací cyklus obdobný pouze s tím rozdílem, že odpadá vulkanizace a chlazení probíhá přímo ve formě. Vstřikování termoplastů bývá i energeticky méně náročné. [4]

2 VSTŘIKOVACÍ STROJ

Vstřikovací stroj slouží k výrobě plastových popř. pryžových dílů. Lze vyrábět i výrobky velmi složitých tvarů v úzkých výrobních tolerancích a v obrovských sériích. Převádí materiál ve formě granulí nebo tablet, u gumárenských směsí ve formě pásků nebo drtě na taveninu, kterou poté vstřikuje do dutiny formy. Po zafixování tvaru je hotový výrobek vyhozen z formy. [15]



Obr. 3. Popis vstřikovacího stroje

Aby byl vstřikovací stroj schopen vykonat všechny zmíněné operace, musí obsahovat následující části:

- uzavírací jednotku
- vstřikovací jednotku
- řídicí jednotku [15]

2.1 Vstřikovací jednotka

Vstřikovací jednotka připraví a dopraví požadované množství roztaveného plastu s předepsanými technologickými parametry do formy. Množství dopravované taveniny musí být menší, než je kapacita vstřikovací jednotky při jednom zdvihu. Při malém vstřikovacím množství setrvává polymer ve vstřikovací jednotce delší dobu a může nastat jeho degradace. Maximální vstřikované množství nemá překročit 90% kapacity jednotky,

protože je nutná rezerva pro případné doplnění úbytku hmoty při chlazení. Optimální množství je 80%. [1]

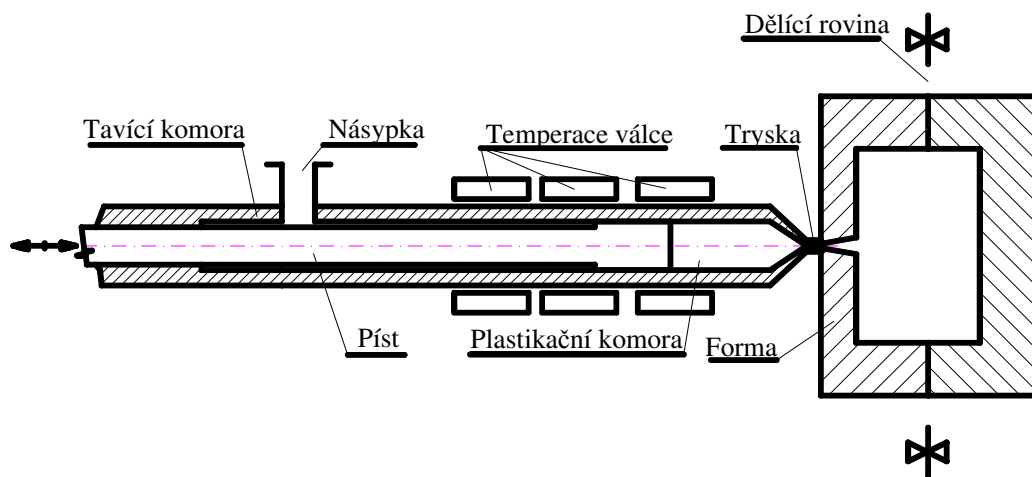
Při vstřikování elastomerů se využívají tři hlavní druhy vstřikovacích jednotek: pístová vstřikovací jednotka, šneková vstřikovací jednotka a pístová vstřikovací jednotka se šnekovou předplastikací. [4]

2.1.1 Vstřikovací jednotka bez předplastikace

Ve vstřikovací jednotce bez předplastikace probíhá plastikace v tavicí komoře (pístová plastikace) nebo v pracovním válci (šneková plastikace). [4]

Při pístové plastikaci se dávkuje zpracováváný materiál dávkovacím zařízením do tavicí komory a to buď objemově nebo hmotově. V tavicí komoře se materiál roztaví a tavenina se vstříkne pístem do formy. [4]

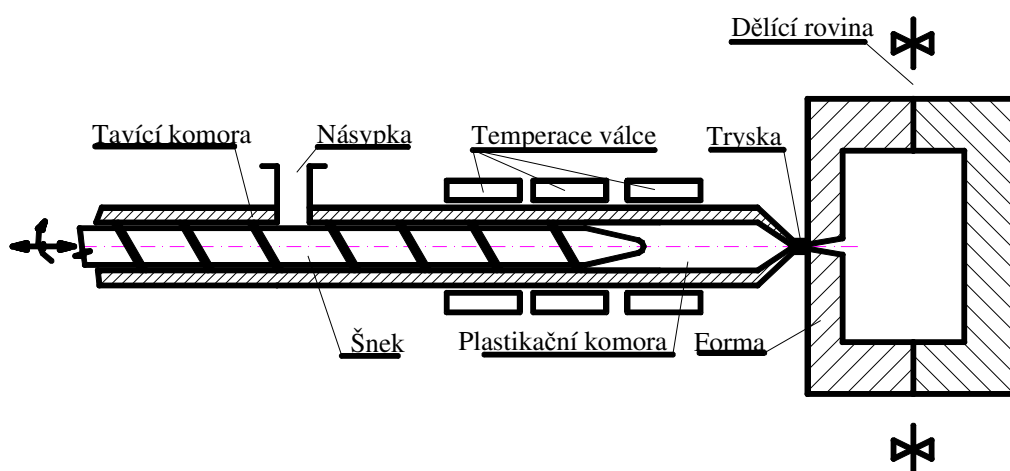
Výhodou vstřikovacích jednotek s pístovou plastikací je jednoduchá konstrukce a snadné docílení poměrně vysokých vstřikovacích tlaků (přes 100MPa). Nevýhodou je horší homogenizace taveniny. [4];



Obr. 4. Pístová vstřikovací jednotka [8]

U vstřikovací jednotky se šnekovou plastikací vstupuje zpracováváný materiál z násypky do pracovního válce. V pracovním válci se polymer plastikuje, homogenizuje a dopravuje pomocí šneku. Šnek se otáčí a posouvá směrem dozadu, čímž vytváří prostor pro taveninu. Po zplastikování potřebného množství se materiál axiálním pohybem šneku vstříkne přes

vstřikovací trysku do formy. Pracovní válec je opatřen topením. Přímočarý i rotační pohon šneku bývá většinou realizován přímočarým a rotačním hydromotorem, popř. elektropohonem s mechanickými převody. Aby byl umožněn axiální pohyb, jsou hnací kolo i hřídel šneku opatřeny drážkováním. [4]

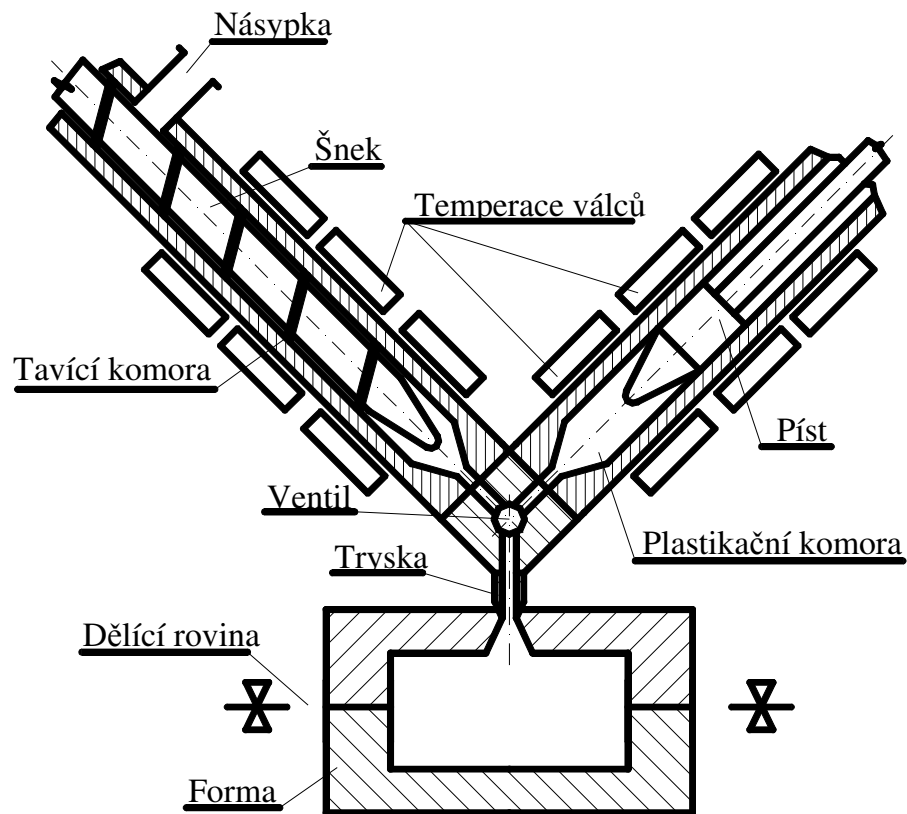


Obr. 5. Šneková vstřikovací jednotka [8]

2.1.2 Vstřikovací jednotka s předplastikací

Zajištění dostatečného plastikačního výkonu a dokonalé homogenizace taveniny vedly k rozdělení vstřikovací jednotky na část plastikační a část vstřikovací. Zpracovávaný materiál se plastikuje v oddělené plastikační jednotce a takto připravená tavenina se dopravuje do vstřikovacího válce, odkud se pak vstříkne pístem do formy. Toto uspořádání umožňuje i výrazné zkrácení vstřikovacího cyklu. [4]

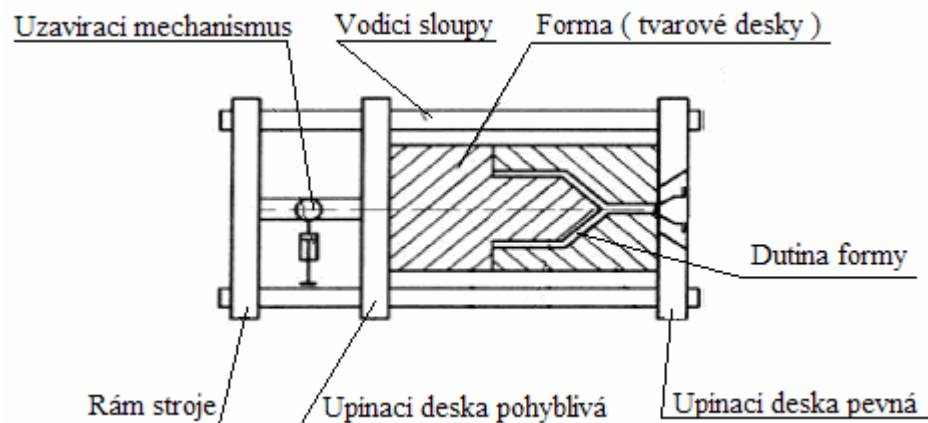
Plastikace probíhá v pracovním válci. Vstřikování je zajištěno vstřikovacím pístem. Toto uspořádání umožňuje spojit výhody šnekové plastikace s výhodami vstřikování pístem. Dosahuje se tím rychlé a dokonalé plastikace materiálu a vysokých vstřikovacích tlaků i rychlostí. Při šnekové plastikaci se lépe ovládají plastikační podmínky a dosahuje se vyšších výkonů. Nevýhodou tohoto uspořádání je složitost a vyšší nároky na seřizování a údržbu. Uplatnění nacházejí zejména při vstřikování objemových výrobků a při vstřikování elastomerů. [4]



Obr. 6. Pístová vstřikovací jednotka se šnekovou plastikací [8]

2.2 Uzavírací jednotka

Uzavírací jednotka ovládá formu a zajišťuje její dokonalé uzavření, otevření i případné vyprázdnění. Velikost uzavíracího tlaku je nastavitelná a je přímo závislá na velikosti vstřikovacího tlaku, ploše dutiny a vtoků v dělicí rovině. [6]



Obr. 7. Schéma uzavírací jednotky [4]

Uzavření a otevření formy zajišťuje uzavírací mechanismus. Má nejrůznější provedení.

Podle druhu pohonu lze rozdělit uzavírací jednotku na hydraulickou, hydraulicko-mechanickou a elektromechanickou.

2.2.1 Hydraulická uzavírací jednotka

Hydraulické uzavírací jednotky umožňují pootevření nástroje hydraulickým tlakem. Vyžadují zajištění závorou. Výhodou je nastavení libovolné hloubky otevření nástroje. Nevýhodou je, že uzavírací rychlost je nutno upravovat v hydraulickém obvodu. [1]

2.2.2 Hydraulicko-mechanická uzavírací jednotka

Hydraulicko-mechanická jednotka je nejčastěji používána u strojů menších gramáží. Zaručuje vyšší rychlost uzavírání, potřebné zpomalení před uzavřením formy a dostatečnou tuhost. Je konstruována jako kloubový mechanismus ovládaný hydraulickým válcem. [1]

2.2.3 Elektromechanická uzavírací jednotka

Podobně jako hydraulicko-mechanické ústrojí pracuje i elektromechanické uzavírací ústrojí. Rozdíl je pouze v tom, že potřebnou energii dodává elektromotor a nikoliv hydromotor. Od klikového kotouče se přenáší pohyb ojnicí na pákový mechanismus, který je spojen s pohyblivou upínací deskou. Na desce je upnuta část formy. Deska je vedena na sloupech, spojených pevnou upínací deskou a třmenem. [11]

2.3 Ovládání a řízení vstřikovacího stroje

Ovládací a řídicí jednotka umožňuje alternativní volbu a úpravu programu. Zajišťuje automatický provoz a samočinné dodržování nastavených technologických parametrů (teplota v různých pásmech topného válce, teplota formy, vstřikovací tlak, doba vstřikování, atd.). [5]

3 VSTŘIKOVACÍ FORMA

Vstřikovací forma je nástroj, jehož použitím na speciálním vstřikovacím stroji vznikne výrobek z polymerní hmoty. Dnes používané vstřikovací formy jsou technicky poměrně značně komplikovaná zařízení, na která se kladou nemalé nároky z hlediska kvality, produktivity, spolehlivosti a automatizace výroby. [7]

Formy se skládají zpravidla ze dvou hlavních částí, z nichž jedna je upnuta na pevné straně vstřikovacího stroje a druhá na jeho pohyblivé straně. Část upnutá na pevné straně se obvykle nazývá tvárnice a její hlavní funkcí je zajištění přívodu taveniny do dutiny formy, a to pomocí vtokového systému. Část upnutá na pohyblivé straně vstřikovacího stroje se většinou nazývá tvárník a její hlavní funkcí je zajištění správného vysunutí vstřikovaného výrobku z dutiny formy pomocí vyhazovacího systému formy. Obě části vstřikovacího nástroje pak současně dokáží zajistit správnou funkčnost výstřiku.[7]

3.1 Konstrukce forem

Výroba dílů vstřikováním probíhá na vstřikovacím stroji a ve formě v krátkém čase, za působení dostatečného tlaku, teploty a dalších nutných parametrů. Z toho vyplývají základní požadavky na stroj a formu, které spolu úzce souvisí. [1]

U formy se vyžaduje:

- vysoká přesnost a požadovaná jakost funkčních ploch zhotovené dutiny formy a ostatních funkčních dílů,
- maximální tuhost a pevnost jednotlivých částí formy i celků, pro zachycení potřebných tlaků,
- vhodný vtokový systém, vyhazování, odvzdušnění, temperování apod. [1]

Vyšší nároky na přesnost a jakost se projeví ve zvýšené pracnosti při jejich konstrukci i výrobě. Větší robustnost forem, kterou vyžadují použité tlaky při vstřikování, často svádí k méně citlivému zacházení. To bývá někdy příčinou jejich nedokonalé funkce, snížené přesnosti i životnosti. Proto je nutné respektovat zásady a směrnice při jejich konstrukci, výrobě i obsluze. [1]

3.1.1 Postup při konstrukci formy

Výkres vyráběné součásti spolu s konstrukčním návrhem a dalšími doplňujícími údaji, jsou podkladem pro konstruktéra forem. Vlastní konstrukce pak má následující postup:

- posouzení výkresu součásti z hlediska tvaru, rozměrů a tvářecích podmínek. Je třeba znovu zkontrolovat rozměry, jejich tolerance, rozdíly v tloušťce stěn s ohledem na propadliny a lunkry. Nezanedbat ani úpravy ostrých hran a rohů, které vyvolávají velké pnutí a obtížné plnění dutiny,
- určení, případně upřesnění dělicí roviny součásti a způsob zaformování s ohledem na funkci a vzhled. Respektovat také směr a velikost potřebných úkosů. Zaformování musí odpovídat vhodnému umístění ústí vtoků a vyhazování z dutiny formy,
- dimenzování tvarových dutin a jejich uspořádání ve formě. Volba vhodného typu, tvaru a velikosti vtokového systému včetně jeho jednotlivých částí,
- určení koncepce vyhazovacího a temperačního systému i odvzdušnění dutin formy,
- návržení rámu formy s ohledem na danou typizaci, počet i rozmístění dutin, systém vyhazování i temperace formy,
- vhodné uspořádání středění a upínání formy na stroj s ohledem na využití dostupných prostředků,
- zkontrolování funkčních parametrů formy, hmotnost výstřiku, jeho průmětnou plochu, vstřikovací a uzavírací tlak a další faktory s ohledem na doporučený stroj.

Celá koncepce konstrukce vstřikovací formy musí směřovat k možné a snadné výrobní technologii dle stanovených požadavků. Je vhodné s objednavatelem návrh formy konzultovat. U externích zákazníků předložit objednateli případné návrhy a doplňky výkresu součásti i návrhu konstrukčního řešení formy ke schválení. [1]

3.1.2 Zaformování výstřiku

Správné zaformování výstřiku a vhodná volba dělicí plochy náleží k rozhodujícím zásadám konstrukce formy. Umožňuje dodržet tvar a rozměry výstřiku i ekonomiku výroby. Vychází z konstrukčního řešení vyráběného dílu. [1]

Dělicí plocha (rovina) bývá zpravidla rovina rovnoběžná s upínáním formy. Může však být i šikmá, nebo různě tvarovaná, případně vytváří u výstřiků s bočními otvory hlavní a vedlejší dělicí plochy. Taková koncepce způsobuje obtížnější výrobu formy. Je snaha se takovým tvarům vyhnout. Nepřesnost v dělicí ploše může způsobit nedovření formy během plnění. To má za následek vznik otřepů nebo zvětšení rozměrů výstřiku ve směru uzavírání formy. Proto je třeba, aby dělicí plocha: [1]

- umožnila snadné vyjímání výstřiku z formy,
- byla pravidelná, jednoduchého geometrického tvaru, snadno vyrobitelná, dobře slicovatelná a probíhala v hranách výrobku,
- byla umístěna tak, aby splňovala požadavek výroby přesných rozměrů, směr technologických úkosů a sousost výstřiku, pokud je v obou polovinách formy.

Pozitivní úlohu hraje dělicí plocha při odvzdušnění dutin formy. [1]

3.1.3 Dimenzování tvarové dutiny

Tvar a rozměry funkčních dílů, které jsou převážně umístěny v různých částech formy, tvoří po jejím uzavření tvarovou dutinu. Jejich dimenzování je důležitou etapou konstrukčního řešení. [1]

Chybně dimenzované rozměry se projeví v nedodržení rozměrů výstřiku. V případě, že se nejedná o rozměr s předepsanou tolerancí, lze tuto chybu někdy napravit úpravou technologických parametrů, někdy však jen nákladnou korekcí rozměrů formy. [1]

Povrch i rozměry výstřiku jsou tedy dány přesností tvarové dutiny a kvalitou její plochy, která je obvykle složena z tvárnice, tvárníku, jádra a tvarových vložek. Přesnost dutin se pohybuje v rozmezí IT 8 až IT 10 a ovlivňují ji tři činitelé:

- smrštění plastu (provozní),
- výrobní tolerance,
- opotřebení dutiny formy. [1]

Nejčastější příčinou chybného dimenzování rozměru je především nepřesný odhad smrštění daného rozměru v průběhu tváření plastu. Správný odhad velikosti smrštění pro konkrétní rozměry dílů, je někdy obtížně určit. Konstruktor je většinou odkázán na vlastní zkušenosti

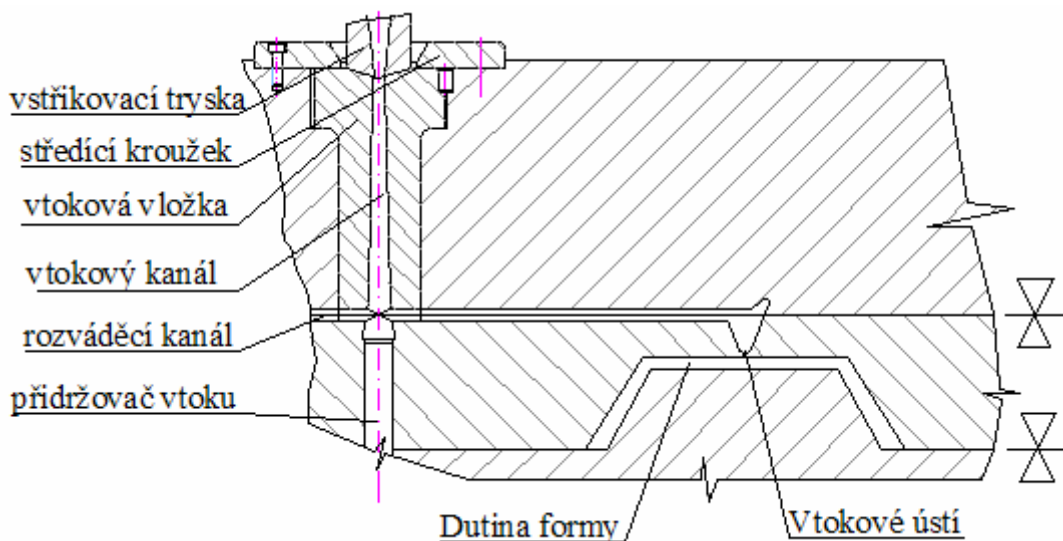
nebo může využít softwaru pracujícího na bázi konečných prvků. Konečně prvkový program dokáže vygenerovat na základě dostupných informací deformaci nebo smrštění výrobku po vyjmutí z formy. [1]

Velikost smrštění ovlivňuje:

- tvar výstřiku (rozměry a tloušťka stěn,...),
- konstrukce formy (vtokový systém, poloha ústí vtoku, velikost jeho průřezu, teplota formy,...),
- technologie vstřikování (tlak, teplota taveniny,...),

Způsob výroby formy, především dutiny určuje její přesnost i výrobní toleranci. Při opotřebení dutiny formy se odhaduje na (10 až 40)% z celkové tolerance výrobku. [1]

3.2 Doprava taveniny z vstřikovacího stroje do dutiny



Obr. 8. Zobrazení dopravení taveniny z vstřikovacího stroje do dutiny [1]

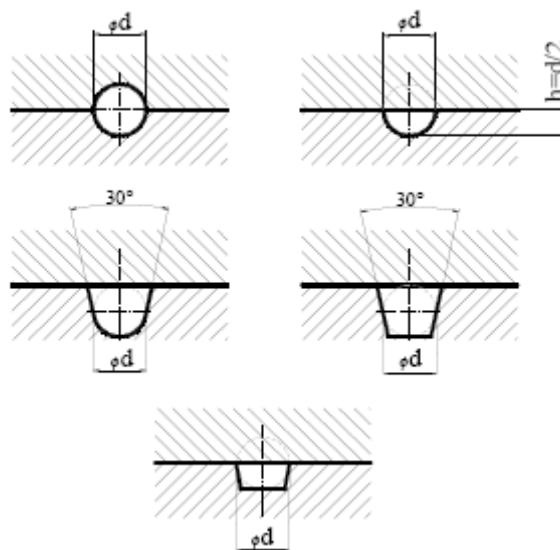
3.2.1 Vstřikovací tryska

Kaučuková směs je vstříknuta z plastikační komory stroje do formy pomocí vstřikovacích trysek, jejich tvar a vnější rozměry musí být takový, aby byly kompatibilní s každou vstřikovací formou (speciálně s vstřikovací vložkou). Se zvyšujícím se vnitřním průměrem trysky vstřikovací tlak, vstřikovací čas a teploty klesá. Průměry vstřikovací trysky jsou voleny tak, aby teplota narostla o 25 °C během (5-10) s vstřikovacího času. Tento poměr

bývá upraven, jestliže je to nutné k zabránění předčasné vulkanizaci během plnění dutiny formy. Trysky mohou být v rozsahu od průměru 3mm pro vstříkovaný objem 500 cm³, do 10 mm pro vstříkovaný objem 4000 cm³. [8]

3.2.2 Rozváděcí kanály

Tyto kanály vedou elastomerní směs z tokové vložky do dutiny formy. Jejich tvar v řezu je obvykle trapézovitý, půl-kruhový nebo kruhový. Měly by být co nejkratší a přímé jak je jen možné ke snížení tlakové ztráty. [8]



Obr. 9. Tvary rozváděcích kanálů [1]

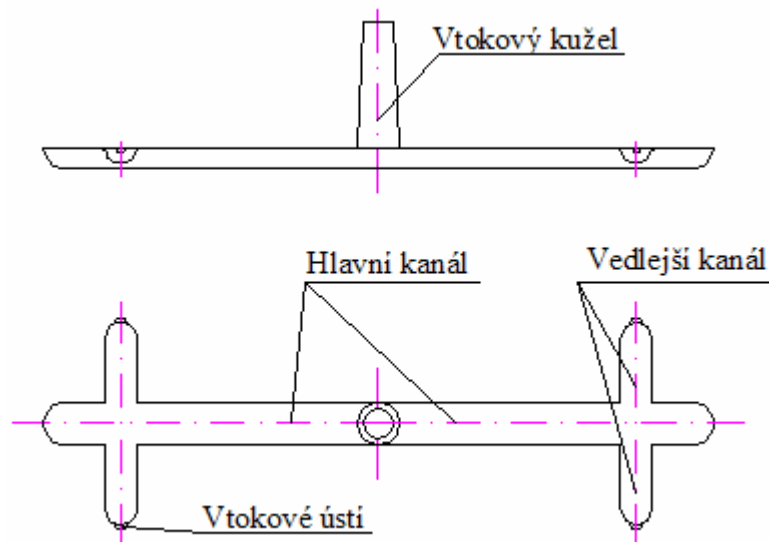
Tvar a rozměry vtokového systému spolu s umístěním jejího ústrojí ovlivňují: [1]

- rozměry, vzhled i vlastnosti výstřiku,
- spotřebu elastomerní směsi,
- náročnost opracování a začištění výstřiku,
- energetickou náročnost výroby,

Obecně při řešení vtokového systému musí být zabezpečeno aby:

- dráha vtoku od vstříkovacího stroje do dutiny formy byla co nejkratší, bez zbytečných tlakových i časových ztrát,
- dráha byla ke všem tvářecím dutinám stejně dlouhá a tím se zajistilo rovnoměrné plnění všech dutin,

- průřez vtokových kanálů byl dostatečně velký, aby byla jistota, že po vyplnění tvářecí dutiny bude jádro taveniny ještě v plastickém stavu, a tím se umožnilo působení dotlaku,
- u vícenásobných forem je vhodné odstupňování průřezů kanálů, aby byla zachována stejná rychlost taveniny. [1]



Obr. 10. Odstupňované vtokové kanály [1]

Aby bylo možné uvedené zásady splnit je potřebné:

- zaoblit všechny ostré hrany vtokových kanálů min. $R=1$ mm,
- stanovit úkosovitost vtoků pro jejich snadné odformování,
- leštit povrch vtokového systému orientovaného ve směru vyjímání. Drsnost nemá klesnout pod $0,2 \mu\text{m}$. Tím se usnadní vyhazování,
- řešit zachycení čela proudící taveniny prodloužením rozváděcího kanálu. Zabrání se tím proniknutí chladnějšího čela proudu taveniny do tvarové dutiny a tím snížení povrchových vad výstřiku,
- ve vtokovém systému vyloučit místa s velkým nahromaděním materiálu,
- neprovádět větvení vtokového systému pod ostrým úhlem, ale někdy právě naopak pod úhlem větším než 90° . [1]

3.2.3 Vtokové ústí

Vtokové ústí se vytváří zúžením rozváděcího kanálu. Jen ve výjimečných případech může být použit plný nezúžený vtok (pro potlačení propadlin, lunkrů u velkoobjemových dílů).

[1]

Pozice vtoku je často důležitější než jeho velikost nebo typ. Vtokové ústí bývá umístěno:

- do nejtlustšího místa výstřiku. Tavenina má téci vždy z místa většího průřezu do míst s menším průřezem. To proto, aby tavenina tuhla nejdříve na vzdálenějším místě od vtokového ústí,
- do geometrického středu dutiny tak, aby tavenina zatékala do všech míst rovnoměrně,
- u výstřiků se žebry má tavenina proudit ve směru jejich orientace,
- mimo místa velkého namáhání nebo opticky činných ploch výstřiku,
- u výstřiku s otvory se umísťuje ústí do těchto otvorů, nebo v jejich blízkosti. U obdélníkových otvorů nebo tvarů zajistit proudění ve směru delší strany,
- s ohledem na možnost úniku vzduchu z tvarové dutiny,
- aby bylo možno ovlivnit nasměrování při případech vzniku studených spojů mimo vzhledová a mechanicky namáhaná místa,
- s ohledem na zamezení volného toku taveniny a tím turbulentního plnění dutiny. Tavenina krátce po vstupu má dopadnout na nějakou překážku,
- aby stopa po odstranění vtoku nesnižovala estetickou hodnotu výstřiku. [1]

3.3 Vyhazovací systémy

Vyhazování výstřiků z formy je činnost, kdy se z dutiny nebo z tvárníku otevřené formy vysune nebo vytlačí zhotovený výstřik. K tomu slouží vyhazovací zařízení které doplňuje formu a svojí funkcí má zajišťovat automatický výrobní cyklus. Základní podmínkou dobrého vyhazování výstřiku je hladký povrch a úkosovitost jejich stěn ve směru vyhazování.[2]

Při vstřikování je snaha o to, aby byl dosažen automatický cyklus. Bohužel v mnoha případech automatického cyklu při vstřikování elastomerů nelze dosáhnout a to hlavně kvůli složitému vyhazování hotových výrobků.

3.3.1 Vyhazování pomocí vyhazovacích kolíků

Uvedený systém lze použít všude tam, kde je možné umístit vyhazovače proti ploše výstřiku ve směru vyhození. Je výrobně jednoduchý a funkčně zaručený. [2]

Správná volba tvaru vyhazovacího kolíku i jeho vhodného umístění umožní snadné vyhození výstřiku bez poškození. Kolík se má opírat o stěnu nebo žebro výstřiku a nesmí ho při vyhazování bortit. Jinak by mohla nastat jeho trvalá deformace. Po styčných plochách vyhazovacích kolíků zůstávají na výstřiku stopy. Proto není vhodné je umístit na vzhledových plochách. [2]

3.3.2 Pneumatické vyhazování

Je vhodným systémem pro vyhazování tenkostěnných výstřiků větších rozměrů ve tvaru nádob, které vyžadují při vyhazování zavzdušnit, aby se nedeformovaly. Způsob je pro výstřiky uvedeného tvaru velmi výhodný. Běžné mechanické vyhazování větších výstřiků vyžaduje značné zvětšení délky formy (velký zdvih vyhazovače), bez záruky dobré funkce.[2]

3.3.3 Ruční a mechanické vyhazování

Ruční vyhazování se využívá u jednoduchých výstřiků, nebo naopak u velmi složitých, kde se na pomoc využívá i různých mechanických nebo hydraulických mechanismů, které dokáží zvulkanizovaný výrobek vyhodit z formy bez jeho poškození.

Jemné díly mohou být vyjmuty po otevření formy pomocí robotického tažného (vakuového) zařízení, který vyjme každou část na pás, v nejlepším případě je pryžový výstřik umístěn pomocí robotického ramene přímo do krabice.

3.4 Odvzdušnění forem

Odvzdušnění tvarové dutiny u vstřikovacích forem je potřebné, protože doba vstřiku je velmi krátká a mohlo by dojít k nedokonalému vyplnění tvarové dutiny taveninou plastu,

k nebezpečnému zvýšení tlaku, k poklesu pevnosti v místech studených spojů nebo k tzv. diesel efektu, kdy může dojít až ke spálení materiálu. Proto je nutné zajistit intenzivní odvod vzduchu z tvarové dutiny formy, a to nejenom netěsnostmi v dělicí rovině, ale i konstrukcí odvzdušňovacích kanálků, které však nesmějí být příčinou vzniku otřepů na výrobku. Odvzdušnění má být provedeno v dělicí rovině na protilehlém místě vtoku. Na dostatečné odvzdušnění formy má vliv umístění vtoku, způsob zaformování výstřiku, umístění vyhazovačů, přítomnost tvarových vložek, apod. [6]

3.5 Temperace forem

Temperací forem se rozumí jejich udržování na požadované teplotě, která je zpravidla vyšší než pokojová a nižší než vstřikovací. Při vstřikování elastomerů se výstřik nechladí, ale naopak se ohřívá na vytvrzovací (vulkanizační) teplotu (140 až 190)°C podle druhu elastomerní směsi. Správně navržený temperanční systém umožňuje: [3]

- optimální dobu vstřikovacího cyklu a hospodárnost provozu,
- dosažení kvalitních výrobků při optimální struktuře (fyzikální vlastnosti, přesnost, vzhled).

Na řešení temperačního systému mají vliv zejména tyto faktory: [2]

- druh vstřikovaného materiálu,
- velikost a tvar výstřiku,
- požadavky na přesnost výstřiku,
- druh a rozměry vtokového systému.

Úkolem temperace je: [2]

- zajistit rovnoměrnou teplotu formy na optimální výši po celém povrchu její dutiny (podle zpracovávaného plastu),
- odvést teplo z dutiny formy naplněné taveninou tak, aby celý pracovní cyklus měl ekonomickou délku.

Pokud má forma dostatečnou hmotnost a dobře řešený temperanční systém, zvýší se její tepelná i rozměrová stabilita a sníží se nebezpečí deformace, při vysokých vstřikovacích tlacích. [2]

Lokální nerovnoměrné rozložení teplot má za následek zvětšení rozměrových a zejména tvarových úchylek výstřiku. Někdy se však záměrně temperují různé části formy odlišně, aby se eliminovaly tvarové deformace způsobené anizotropií smrštění plastu. [2]

3.6 Materiály používané při výrobě forem

Při výrobě vstřikovaných dílů se od formy vyžaduje dosažení požadované kvality, životnosti a nízkých pořizovacích nákladů. Významný činitel pro splnění těchto podmínek je materiál forem, který je ovlivněn provozními podmínkami výroby, určené: [2]

- druhem vstřikovaného plastu,
- přesností a jakostí výstřiku,
- podmínkami vstřikování,
- vstřikovacím strojem.

Pro výrobu forem se tedy používají takové materiály, které splňují provozní požadavky v optimální míře. Jejich široký výběr lze zredukovat na tyto tři: [2]

- oceli vhodné k chemickému i tepelnému zpracování,
- neželezné slitiny kovů (Cu, Al, ...),
- ostatní materiály (izolační, tepelně nevodivé ...).

Od použitých materiálů na formy se vyžaduje především: [2]

- dostatečná mechanická pevnost,
- dobrá obrobiteľnosť.

Z hlediska technologie výroby výstřiků má navíc materiál funkčních dílů zajišťovat speciální požadavky na kvalitu struktury, která je dána: [2]

- dobrou leštitelností a obrobiteľnosť,
- zvýšenou odolností proti otěru,
- odolností proti korozi a chemickým vlivům elastomeru,
- stálostí rozměrů a minimálními deformacemi při kalení,
- vhodnými fyzikálními vlastnostmi.

4 PROBLÉMY PŘI VSTŘIKOVÁNÍ ELASTOMERŮ

Při vstřikování elastomerů mohou nastat různé problémy (technologické, ekonomické, designérské atd.), ale existuje řada problémů, které nelze zjistit, dokud se forma neotevře. Některé z nich jsou stručně popsány níže. [8]

4.1 Smrštění a rozměrová stálost výrobku

Během chlazení se smršťuje dutina formy i výrobek, obvykle s rozdílnou hodnotou, protože kovy a elastomery mají rozdílný koeficient tepelné roztažnosti. Smrštění je obvykle definováno jako rozdíl mezi rozměry dutiny formy a konečného výrobku, u obou za pokojové teploty. Smrštění by mohlo být lépe definováno, kdyby se vztahovalo k horké formě a zchlazenému výrobku, ale výše uvedenou definici je jednodušší použít v praxi na konkrétních případech. [8]

Smrštění se dělí na smrštění během vstřikování a dodatečné smrštění, které se projeví postupem času. Hodnota smrštění nemusí být pro konstrukci dutiny formy takový problém, pokud by tato hodnota nebyla proměnná, což ve většině případů je. [8]

4.2 Soudržnost a přilnavost

Přilnavost elastomeru k povrchu dutiny formy není žádána, naopak soudržnost výrobku je nutná. Aby nedošlo k přilepení kaučukové směsi k povrchu dutiny, používá se vhodný separační prostředek. Většina separačních prostředků je založena na silikonové bázi a jsou nanášeny na povrch dutiny v dělicí rovině. [8]

4.3 Propadliny

Tento termín se používá pro vady na výrobcích, které vypadají jako trhliny, nebo propadlé dutiny. Jsou způsobeny tepelnou roztažností pryže po zesíťování, ta se může dostat během vulkanizace do dělicí roviny nebo do vtokových kanálků, což je způsobeno změnou objemu během síťování a způsobí prasknutí (propadliny). Velmi záleží na tvaru (geometrii) výrobku (koule je nejzávažnějším případem). [8]

Redukce propadlin je možná zmenšením tloušťky stěny, zvětšením velikosti dotlaku a zvětšením velikosti vtoku. Lze také využít retardérů vulkanizace, protože oddalují dobu, kdy materiál začne vulkanizovat, tím se může zvýšit teplota taveniny i doba dotlaku a

zajistí se vyplnění formy před začátkem vulkanizace. Jestliže není možné odstranit nebo redukovat propadliny změnou procesních parametrů, tak je lze eliminovat úpravou povrchu. [8]

4.4 Předčasná vulkanizace

U vstřikování elastomerů může dojít k předčasné vulkanizaci před vstříknutím elastomerní směsi do vstřikovací formy. Tím se zhorší tokové vlastnosti. Slabý tok taveniny do formy vede k deformaci nebo nedotečení výstřiku. K zabránění nebo odstranění předčasné vulkanizace je nutné, aby forma byla zcela vyplněna před tím, než kaučuková směs začne vulkanizovat a ujistit se, že dutina formy je rovnoměrně vyhřívána. Dále lze eliminovat přidáním retardérů vulkanizace do směsi. [8]

4.5 Pomerančová kůra

Pomerančová kůra je způsobena kontaktem první vstříknuté vrstvy s horkým povrchem formy. Tato vrstva začne síťovat před tím, než je dutina formy úplně zaplněna. Pomerančová kůra vzniká sloučením dříve a později zvulkanizovaným kaučukem. [8]

4.6 Pórovitost

Pórovitost bývá způsobena nedostatečnou vulkanizací a přítomností těkavých látek, nejčastěji vodou ve směsi. Vyšší vstřikovací teplota a vyšší teplota formy nebo delší doba vulkanizace mohou pomoci vyřešit tento problém. [8]

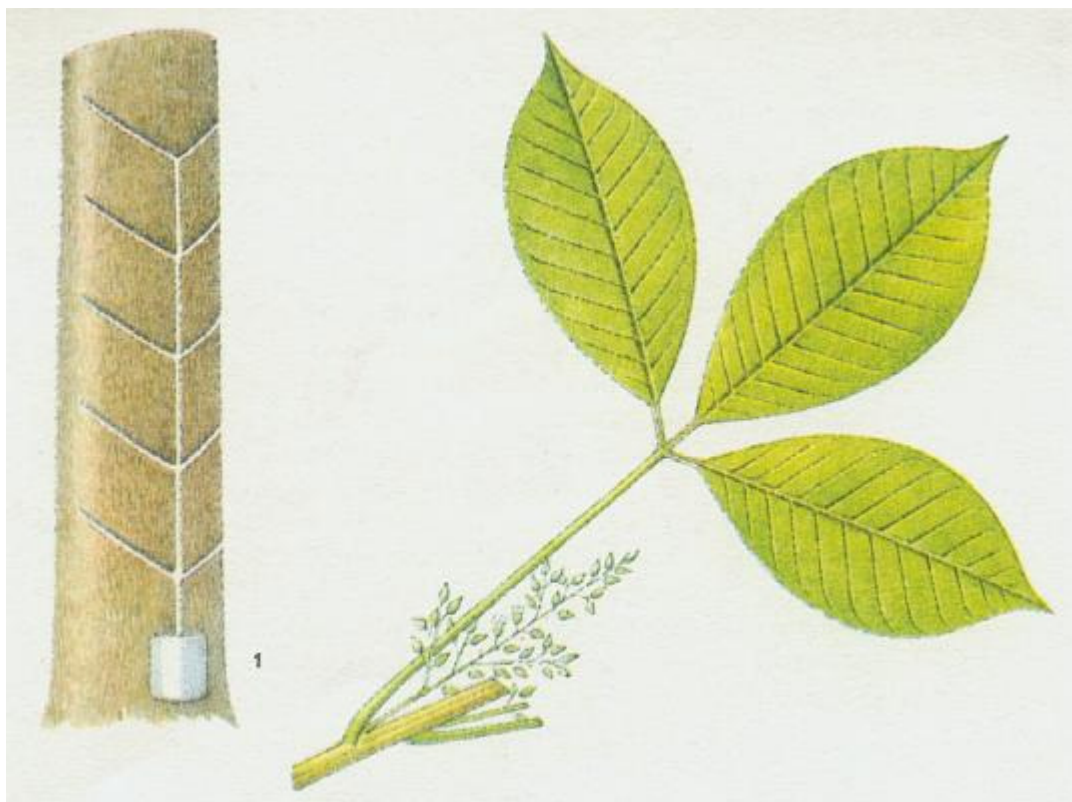
4.7 Vzduchové kapsy

Vzduchové kapsy v kaučukové směsi jsou velmi časté. Mohou být eliminovány zvýšením dotlaku, snížením vstřikovací rychlosti nebo efektivním odvodušněním formy. [8]

5 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI KAUČUKU A PRYŽE

Proti klasickému průmyslu, jako je sklářství, hutnictví, textilní průmysl apod., je obor zpracování kaučuku velmi mladý, okolo 150 let. S kaučukem se Evropané seznámili však již před 500 lety, brzy po objevení Ameriky. [9]

Kolumbovi námořníci pozorovali hry amerických domorodců s pružnou koulí. Tyto míče si američtí Indiáni zhotovovali z vyschlé tekutiny, vytékající z poraněných stromů (*hevea brasiliensis*), volně rostoucích v subtropickém pásmu Amerických ostrovů [9]



Obr. 11. *Hevea brasiliensis* – zdroj přírodního kaučuku

Do Evropy se přírodní kaučuk dostal již r. 1736. K jeho prvnímu použití došlo v r. 1791. Byla to výroba nepromokavých plachet a hlavně pytlů pro přepravu pošty. Kaučuk se rozpouštěl v terpentýnové silici a roztokem se natíral textil, který byl po vyschnutí nepropustný pro vodu. Skutečný základ gumárenství však položil až v roce 1839 Charles Goodyear. Výrobu kaučukového zboží v USA zahájil se svými společníky nepříliš úspěšně v roce 1833. O pět let později se spojil s Nathanielem Haywardem a snažili se zlepšit kvalitu kaučukových výrobků jejich impregnací roztoky síry. Vypracovali postup modifikace kaučuku založený na solarizačním procesu, tj. vystavení kaučukové folie

nejdříve účinku oxidu siřičitého nebo síry a potom účinku slunečních paprsků, který Hayward v r. 1839 patentoval. Zápach vyrobeného zboží a jeho tvrdnutí v chladném počasí však patentovaný postup prakticky znehodnotily. [9]

Goodyear pokračoval ve své výzkumné práci. Správně usoudil, že síra chemicky reaguje s kaučukem a brzy na to experimentálně dokázal, že směs kaučuku a síry poskytuje zahříváním produkt nových vlastností. [9]

V roce 1842 William Brockendon ukázal jednomu anglickému výzkumníkovi Thomasi Hancockovi několik Goodyearových výrobků. Hancock zjistil, že páchnou po síře a jsou odolné vůči chladu. Hancock tehdy neznal Goodyearův způsob jejich přípravy a nezávisle na něm objevil, že změněných vlastností kaučuku lze dosáhnout jeho zahříváním v roztavené síře. Tímto způsobem také jako první připravil tvrdou pryž (ebonit). A byl prvním, kdo pro vytvarování kaučukové směsi a její následující tepelné zpracování použil ocelové formy. [9]

Hlavní rozvoj gumárenského průmyslu nastal až po vynálezu pneumatiky. První ji patentoval v r. 1845 Robert Thomson. Byla to vlastně hadice z pogumovaného textilu, opatřená koženým pouzdrem, přišroubovaná na obvod dřevěného kola. Thomsonův vynález však našel praktické uplatnění až po r. 1888, kdy obdobnou pneumatiku, určenou pro jízdní kola patentoval John Dunlop. Byl to ovšem zásadní vynález, který umožnil další technický pokrok v dopravě a také vývoj automobilu. [9]

5.1 Základní vlastnosti kaučuků

Nejdůležitějšími vlastnostmi kaučuků jsou:

- teplota skelného přechodu (teplota zesklenní) T_g ,
- viskozita (plasticita),
- vulkanizovatelnost (schopnost kaučuku být vulkanizací převeden na pryž). [9]

5.1.1 Teplota skelného přechodu

Všechny kaučuky mají mít schopnost, aby z nich byli připraveny vulkanizáty použitelné v rozmezí běžných teplot, při nichž pracuje člověk. Proto jejich teplota skelného přechodu bývá podstatně menší než 20°C . Hodnoty T_g běžných kaučuků uvádí tabulka 1. [9]

Tab. 1. Teploty skelného přechodu běžných kaučuků [9]

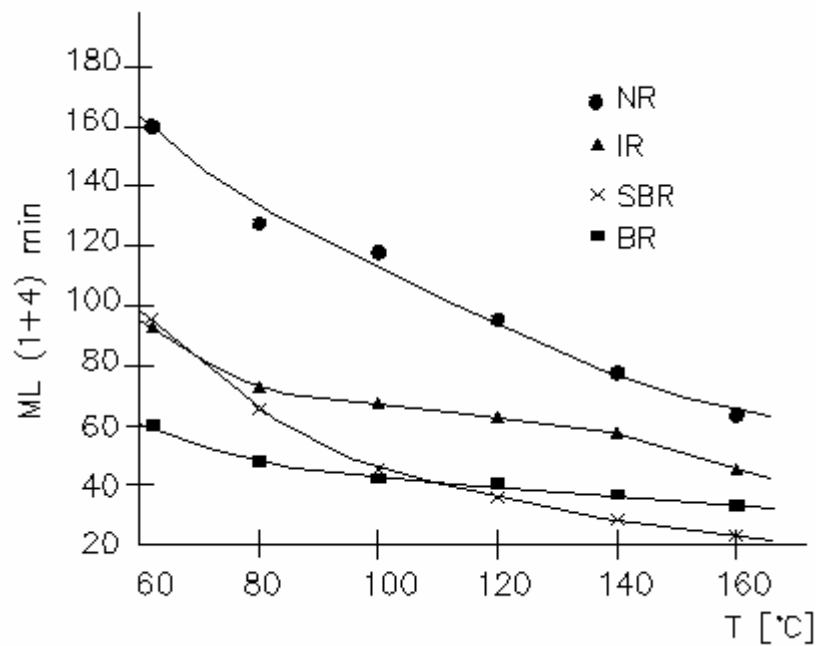
| Kaučuk | Tg[°C] |
|--|--------|
| Silikonový kaučuk | -120 |
| Butadienový kaučuk | -100 |
| Butylkaučuk | -79 |
| Přírodní a izoprenový kaučuk | -75 |
| Butadienový kaučuk s 23% styrenu v kopolymeru | -60 |
| s 53% styrenu v kopolymeru | -14 |
| Polynorbornen | +35 |
| Polynorbornen se 200dsk oleje | -60 |

5.1.2 Viskozita

Charakteristickou vlastností závislou na molární hmotnosti kaučuku a její distribuci je jeho viskozita. Charakterizuje zpracovatelnost kaučuku, tj. schopnost být mechanicky hněten a dále zpracováván. K tomuto účelu se nejčastěji používá viskozita Mooney. Její hodnota se u tzv. přímozpracovatelných kaučuků pohybuje kolem 50 ML (1+4) při 100°C. [9]

Viskozita kaučuků závisí na teplotě. Se vzrůstem teploty v důsledku poklesu mezimolekulárních soudržných sil klesá. [9]

Naproti tomu snižováním teploty viskozita kaučuků vzrůstá, a to tím více, čím více se blížíme k jeho teplotě zesklenní (T_g). Při pomalém ochlazení snadno krystalizujících kaučuků dochází k jejich samovolné krystalizaci a tím k tvrdnutí kaučuku nad teplotou zesklenní. [9]



Obr. 12. Závislost viskozity Mooney typických kaučuků na teplotě [9]

Tuhost nevulkanizovaného kaučuku je tedy velmi závislá na teplotě. Ohřátím kaučuk měkne, ochlazením tuhne. Tuto citlivost na teplotu prakticky ztrácí vulkanizací. [9]

5.1.3 Vulkanizovatelnost

Přímozpracovatelné kaučuky (syntetické a některé nové druhy kaučuku přírodního) nebo lámaný kaučuk a jejich směsi s přísadami se vyznačují schopností měnit poměrně snadno tvar působením napětí. Vytvořená deformace má převážně nevratný charakter. Mají tedy dostatečnou plasticitu, zejména při teplotách nad 100°C. Konečné výrobky (pryž) však musí mít stabilní tvar a dobré mechanické vlastnosti. Potřebné změny těchto vlastností se docilují vulkanizací. [9]

Vulkanizací mění kaučuk podstatně prakticky všechny svoje vlastnosti. Ztrácí také rozpustnost v rozpouštědlech, pouze v nich bobtná, a tím méně, čím více je zvulkanizován. Hodnota T_g se vulkanizací prakticky nemění (nepatrně vzrůstá). Vulkanizací přírodního a ostatních samovolně krystalizujících kaučuků se zmenšuje sklon k samovolné krystalizaci. Tím se rozšiřuje teplotní oblast použitelnosti pryže (např. u přírodního kaučuku až do teplot kolem -50°C), což je v mnoha aplikacích důležité (pneumatiky v zimě). Fyzikální vlastnosti pryže, tj. vulkanizovaného kaučuku, se však s teplotou mění málo. [9]

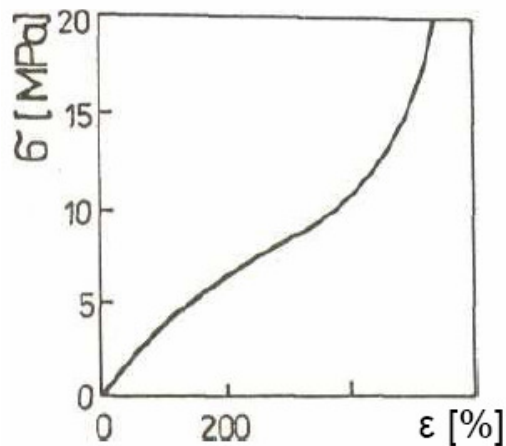
5.2 Základní vlastnosti pryže

Charakteristickými vlastnostmi pryže jsou:

- velká elasticita (pružiny, těsnění...),
- akumulace největší části energie při deformaci (tzv. Jouleův efekt – má povahu převážně entropických změn, podobně jako při objemových změnách ideálního plynu),
- velká odolnost vůči opakovaným deformacím (pneumatiky),
- nepropustnost pro plyny a vodu (vzdušnice, míče, čluny)
- značná chemická odolnost (kyseliny, zásady; tvrdá pryž odolává i látkám oxidační povahy),
- elektroizolační vlastnosti (vodiče, kabely). [9]

Tyto vlastnosti vyplývají jak z chemického složení a struktury kaučuků, tak ze struktury pryže. [9]

Pryž má určitý tvar, který získala vulkanizací. Ten již nelze dodatečně změnit tvářením, pouze opracováním. Pokud se pryži při používání dává v určitých mezích jiný tvar, je to změna pouze přechodná, způsobená účinkem vnější síly, např. tahem, tlakem, ohybem, smykem atd., která má za následek vznik napětí a z něj pak plynoucí tok anebo únavu. Pryž je prakticky nestlačitelná, čehož se při její exploataci také využívá. Pokud se pryž „stlačuje“, děje se tak vždy deformačně, tj. za změny některého rozměru příslušného předmětu (výrobku). [9]



Obr. 13. Typický tahový diagram pryže

Základní vlastností, kterou se pryž liší od všech ostatních běžných materiálů, je zejména její chování při deformaci v tahu. Účinkem takové síly na pryž dochází k jejímu protažení, které je daleko větší než u všech běžných technických materiálů a navíc do značné míry vratné. To je důvodem, proč na tahové chování pryže nelze přímo aplikovat mechanické pojmy. Z grafického záznamu závislosti napětí na protažení pryže lze vidět, že jen při nepatrných zatíženích je tato závislost lineární (sleduje Hookův zákon pružnosti), dále probíhá po křivce více nebo méně vyduté a ke konci strmě stoupá; nastává ztužení pryže, které roste až do přetržení. Průběh křivky je charakteristický pro každou pryž. Lze z ní zjistit konečné napětí – pevnost v tahu a konečné protažení – tažnost. Odečítá se z ní také napětí potřebné k dosažení určitého protažení (100 %, 300 %, 500 % apod.) tzv. modul (E_{100} , E_{300} , E_{500} atd.), používaný často jako jedno z kritérií při hodnocení pryže. [9]

5.3 Složky kaučukové směsi

Základní složkou kaučukové směsi je kaučuk. Kaučuková směs vzniká přidáním těch přísad do kaučuku, které umožňují jeho vulkanizaci a dávají výrobku (vulkanizátu – pryži) žádané vlastnosti. [9]

Pokud jsou v míchány do kaučuku jen některé přísady a vynechány některé ze složek kaučukové směsi (např. některou ze složek vulkanizačního systému nebo celý vulkanizační systém), připraví se předsměs, neboli béc (z angl. batch). Nejběžnější jsou předsměsi složené z kaučuku, změkčovadla a plniva. Scházející složky se do předsměsi přidávají až před definitivním zpracováním kaučukové směsi a její vulkanizací. Předsměsi je možno velmi dlouho skladovat bez nebezpečí samovolného znehodnocení. Naproti tomu při dlouhodobém skladování kompletních kaučukových směsí by mohlo dojít k jejich navulkanizování. Vulkanizační systém totiž reaguje (i když pomalu) i při běžné teplotě (kolem 20°C) a proto úplné kaučukové směsi mají omezenou dobu skladování. [9]

5.3.1 Kaučuk

Kaučuk je elastomer schopný vulkanizace, tj. polymer, převeditelný chemickou reakcí z lineárního do rovnoměrného zesíťovaného stavu. (Síťovací reakci v kaučucích je nazývána vulkanizace). [9]

Elastomer je každý lineární polymer, který je při běžné teplotě malou silou značně deformovatelný bez porušení (vykazuje tzv. kaučukovou elasticitu). Kromě všech kaučuků

patří mezi elastomery např. polyizobutylen, měkčený polyvinylchlorid a měkčený polyvinylbutyral. [9]

Vzhledem k prudkému rozvoji nových síťovacích systémů v poslední době je stále více lineárních polymerů převeditelných do zesíťovaného stavu. Proto se rozdíl mezi pojmy kaučuk a elastomer zmenšuje. [9]

5.3.2 Vulkanizační přísady

Jednu nebo častěji několik složek, přidávaných do kaučuku v poměrně malé koncentraci (několik dsk), které po vhodném zahřátí kaučukové směsi způsobí chemickou reakcí s kaučukem jeho vulkanizaci, je nazýván souhrnně vulkanizační systém. Původně to byla samotná síra, později k ní přibyly další látky, které vulkanizaci urychlily anebo zlepšily její účinnost a vlastnosti vulkanizátu. Staly se tak se sírou složkami vulkanizačního systému. [9]

Při vulkanizaci sírou se dnes běžně používají aktivátory a urychlovače, někdy též retardéry a také inhibitory vulkanizace. [9]

Vulkanizační činidlo je základní složkou vulkanizačního systému. Nejběžnějším a současně nejdůležitějším vulkanizačním činidlem zůstala elementární síra. Používají se také jiná vulkanizační činidla, jako dialkyl a diacylperoxydy, reaktivní pryskyřice, oxidy kovů a další látky. [9]

Urychlovače mají při sírové vulkanizaci tyto účinky:

- zvětšují podstatně rychlost vulkanizace,
- zvětšují významně síťovací účinky síry (v přítomnosti aktivátoru) a tím současně zmenšují modifikaci řetězců kaučukového uhlovodíku, čímž zlepšují i stárnutí pryže,
- umožňují upravovat vulkanizační průběh podle požadavků technologie a současně podle požadavků na vlastnosti pryže,
- zmenšují závislosti vulkanizace na teplotě, tj. snižují její aktivační energii. [9]

Aktivátory vulkanizace také zmenšují závislost rychlosti vulkanizace na teplotě, ale především podstatně zvětšují účinnost vulkanizační (síťovací) reakce. [9]

Retardéry vulkanizace patří dnes již ke starším skupinám přísad. Prodlužují zpracovatelskou bezpečnost kaučukové směsi (dobu, po kterou může být směs zpracována bez nebezpečí předčasného vulkanizování), ale za cenu zpomalení síťovací reakce. [9]

Inhibitory vulkanizace, které naopak tvoří moderní skupinu přísad do kaučukových směsí, naproti tomu prodlužují zpracovatelskou bezpečnost, aniž by prakticky ovlivňovaly rychlost vlastního síťování. Dobu vulkanizace tedy prodlouží pouze o tolik, o kolik prodlouží dobu zpracovatelské bezpečnosti (navulkanizace). [9]

Přísady se do kaučuků dávkuje tak, že se jejich množství přepočítává na určité množství kaučuku. Vžilo se označení *dsk*, které znamená počet hmotnostních dílů přísady, přidávané na sto hmotnostních dílů kaučuku. Např. počet gramů na 100 g kaučuku nebo počet kilogramů na 100 kg kaučuku. Celková hmotnost kaučukové směsi je proto závislá na celkovém obsahu přísad v kaučukové směsi. [9]

5.3.3 Antidegradanty

Kaučuky jsou běžně stabilizovány proti degradaci během skladování a zpracování přísadou chemikálií, které v nich působí jako stabilizátory. Také vulkanizovaný kaučuk (pryž) je třeba chránit proti škodlivému vlivu prostředí, v němž je používán. Proto se do kaučukové směsi přidávají sloučeniny, které jsou schopny chránit výrobek po dlouhou dobu před degradací. Nazýváme je *antidegradanty*. Pro ochranu pryže před účinkem ozonu a kyslíku jsou přidávány do kaučukových směsí *antiozonanty*. Jejich koncentrace se pohybují od 0,1 *dsk* (stabilizátory), do 3 *dsk* (antidegradanty) až 5 *dsk* (ve speciálních případech). Souhrnně také často mluvíme o *antidegradačním systému*. [9]

5.3.4 Plniva

Ve většině kaučukových směsí jsou obsažena plniva. Upravují vlastnosti pryže. Jsou to látky tuhé konzistence, většinou práškové. Přidávají se ke kaučuku ve velkých koncentracích, řádově 50*dsk* až 100*dsk*, v některých případech i více, např. až 200*dsk*. Plniva vždy významně mění téměř všechny vlastnosti pryže. Podstatně zvětšují její tvrdost a modul, často zvyšují pevnost. Tzv. aktivní plniva velmi významně zvětšují odolnost pryže vůči oděru. [9]

5.3.5 Změkčovadla

Jsou to nízkomolekulární látky, většinou tekuté konzistence (oleje). Zlepšují zpracovatelnost kaučukových směsí. Snižují tvrdost vulkanizátů a jejich modul. Současně významně snižují teplotu zesklnění použitého kaučuku. Většinou zlevňují kaučukovou směs a tím i výrobek, neboť to bývají nejlevnější složky kaučukové směsi. Nejpoužívanějšími změkčovadly jsou olejovité produkty odpadající při zpracování ropy nebo dehtů jako destilační zbytky. [9]

5.3.6 Zvláštní přísady

Přidávají se jen do některých kaučukových směsí pro dosažení určitých speciálních vlastností pryže nebo směsi. Patří k nim zejména: nadouvadla, pigmenty, faktisy, desodoranty, prostředky pro spojování pryže s kovy a vlákny, retardéry hoření (zhášedla), antistatické prostředky, brusný materiál, trhaviny apod. [9]

5.4 Vulkanizace kaučukové směsi

Zahříváním kaučukové směsi na vhodnou teplotu (např. 150 °C) dojde za určitou dobu (např. 30 min) k její vulkanizaci. Probíhají při ní chemické reakce mezi kaučukem a ostatními složkami směsi za vzniku chemických příčných vazeb. Koncentrace vulkanizačního činidla (např. síry, dialkylperoxidu aj.) přitom postupně klesá, téměř až na nulovou hodnotu. Probíhající chemická reakce se řídí týmiž zákonitostmi jako v oblasti nízkomolekulárních sloučenin a jejich roztoků. [9]

Kaučukové směsi se vulkanizují většinou za tlaku. Ten zde není důležitý z hlediska chemických reakcí, ale zabraňuje vzniku nežádoucích pórů ve výrobku v důsledku vývoje plynných látek, zejména vypařování vody. Proto se volí vždy tlak na směs větší než je odpovídající tenze par při vulkanizační teplotě. Například při 145 °C je tenze vodní páry 0,42 MPa, proto se používají tlaky, převyšující 0,5 MPa. Při vulkanizaci v kotli je teplota vulkanizace limitována pracovním tlakem kotle (např. 0,3 MPa.) [9]

Vulkanizace je klíčovým procesem v celé gumárenské technologii, protože je energeticky a časově nejnáročnější a vzniká při ní výsledný produkt – vulkanizát nebo-li pryž. Ta má své charakteristické vlastnosti, které ji předurčují pro nejrůznější aplikace prakticky ve všech oborech lidské činnosti. [9]

Základní schopností pryže je její schopnost být bez poškození a prakticky vratně vysoce deformována (na řádově stovky procent) při poměrně nízké hodnotě modulu pružnosti. Tato vlastnost, kterou nemá v podobném rozsahu žádná jiná dosud známá hmota, souvisí především se síťovou strukturou pryže, vznikající právě vulkanizací. [9]

Reakcí vulkanizačního činidla s kaučukovým uhlovodíkem se totiž podle současných představ vytváří prostorová síť, v níž jsou původní makromolekuly lineárního kaučukového uhlovodíku spojeny chemickými vazbami, které nazýváme příčné vazby. [9]

5.5 Chemické změny při exploataci a stárnutí pryže

Vulkanizovaný kaučuk (pryž) během dlouhodobého uskladnění (např. 10 let) a exploatace stárne, tj. mění poněkud své vlastnosti. Hlavní příčinou těchto změn bývají chemické reakce vyvolané účinkem vzdušného kyslíku, ozonu nebo zvýšené teploty. Nejvíce jsou vůči nim odolné kaučuky neobsahující dvojně vazby. Většina pryže je však právě z kaučuků nenasycených, tj. obsahujících dvojně vazby. Ty je nutno ochránit vůči stárnutí přísadou antidegradantů. [9]

5.5.1 Účinek ozonu

Největší účinek na pryž má ozon, obsažený ve vzduchu, byť jen ve velmi malé koncentraci. Ozon nechráněnou pryž napadá tím, že velmi snadno reaguje s dvojnými vazbami kaučukového uhlovodíku na křehký ozonid. Proto, je-li pryž napadena ozonem, vznikají na jejím povrchu charakteristické praskliny (kolmé na směr napětí). Vznikem prasklin dochází k obnažování dosud nenapadené pryže a původně malé prasklinky rostou opakováním cyklu vytvoření ozonidu – vznik praskliny. Tímto způsobem prohlubující se praskliny nakonec vedou k mechanické destrukci pryžového výrobku. [9]

5.5.2 Účinek kyslíku

Vzdušný kyslík způsobuje tzv. oxidační stárnutí pryže. Při běžné teplotě se toto stárnutí projeví až za velmi dlouhou dobu (např. po deseti i více letech). Zvýšenou teplotou se oxidační stárnutí pryže velmi urychluje. Podléhají mu nejvíce kaučuky s velkou koncentrací dvojných vazeb, neboť kyslík napadá nejreaktivnější místo v řetězci kaučukového uhlovodíku a to je v případě nenasycených kaučuků umístěno v alfa-poloze dvojně vazbě (na uhlíkovém atomu sousedícím s uhlíkovým atomem, z něhož vychází

dvojná vazba). Vznikají tak hydroperoxydy, které se účinkem zvýšené teploty katalyticky rozpadají na volné radikály. Ty pak dále reagují s kaučukovým uhlovodíkem řetězovými reakcemi. Dochází tak k vázání kyslíku na kaučuk, doprovázenému štěpením a síťováním řetězců makromolekul kaučuku. V polyizoprenech převládá štěpení makromolekul kaučuku, kdežto v homopolymerech a kopolymerech butadienu dochází především k oxidačnímu síťování. [9]

Ochrana pryže proti stárnutí spočívá hlavně v zabránění řetězového průběhu radikálových oxidačních reakcí, které mají v nechráněné pryži autokatalytický průběh. Proto již např. při navázání 1% kyslíku na pryž z přírodního kaučuku klesá její pevnost o 50%. [9]

5.5.3 Anaerobní stárnutí

Sírné vulkanizáty i v nepřítomnosti ozonu a kyslíku prodělávají při stárnutí změny, které jsou tím větší, čím více polysulfidických vazeb pryž obsahuje. Mluvíme o tzv. anaerobním stárnutí pryže. Polysulfidické vazby přecházejí z části na di- a monosulfidické a z uvolněné síry vznikají nové příčné vazby. Stoupá tím modul pryže a současně se mění i její ostatní fyzikálně-mechanické vlastnosti, především klesá tažnost a odolnost dynamickému namáhání. [9]

6 COMPUTER AIDED ENGINEERING (CAE)

Computer Aided Engineering (CAE) lze přeložit jako: „počítačem podporované inženýrství“. Podpora informačních technologií se využívá při práci na úkolech jako jsou simulační analýzy, projektování, výroba, plánování, diagnostiky a opravy. Softwarové nástroje, které byly vyvinuty na podporu těchto aktivit, zahrnují simulace, ověřování a optimalizace produktů a pomoc při výrobě nářadí. CAE systémy jsou z velké míry hlavními poskytovateli informací, které pomohou podpořit konstruktérské a designérské týmy v návrhu a výrobě různých druhů produktů [10, 12]

6.1 Cadmould Rubber

Simulační analýzy se v dnešní době již poměrně běžně používají při výrobě dílů z termoplastu. Velkou výhodou tohoto produktu je analýza vstřikování kaučukových směsí, které je využito již v konstrukční fázi přípravy výroby tak, aby byly dosaženy pozitivní přínosy dosud vztahované pouze termoplastovým dílům. [10]

Cadmould Rubber je software obecně označovaný Computer Aided Engineering (CAE). Počítá v závislosti na použitém materiálu a technologických parametrech dobu plnění, rychlost a dobu vulkanizace ve formě a následnou dobu dovulkanizování. K nejdůležitějším výstupům patří vedle zobrazení průběhu plnění (studené spoje, místa s nebezpečím uzavření vzduchu), zobrazení tlakových a napěťových poměrů v dílci a stanovení optimální technologie. A právě technologické parametry při zpracování kaučukových směsí mají podstatný vliv na výslednou kvalitu výrobku, zároveň lze na základě výpočtu navrhnout vhodnou dobu plnění výrobního cyklu, což může v řadě případů vést k nemalým finančním úsporám. [10]

II. STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tato diplomová práce má tři hlavní cíle. První je praktický, kde se hodnotí v programu Cadmould již reálný proces pro firmu Rubena a.s. Analýza zahrnuje reálnou elastomerní směs, vstupní parametry jsou zadané tak, aby se co nejvěrohodněji přibližovali realitě. Je popsán vstříkovací proces a případné chyby které mohou během vstříkování nastat.

V druhé části je hodnocen vliv technologických parametrů a drsnosti povrchu na plnění dutiny formy při vstříkování elastomerů. Pro daný typ elastomerní směsi bude sledován vliv vstříkovacího tlaku a drsnosti povrchu na délku zatečení směsi.

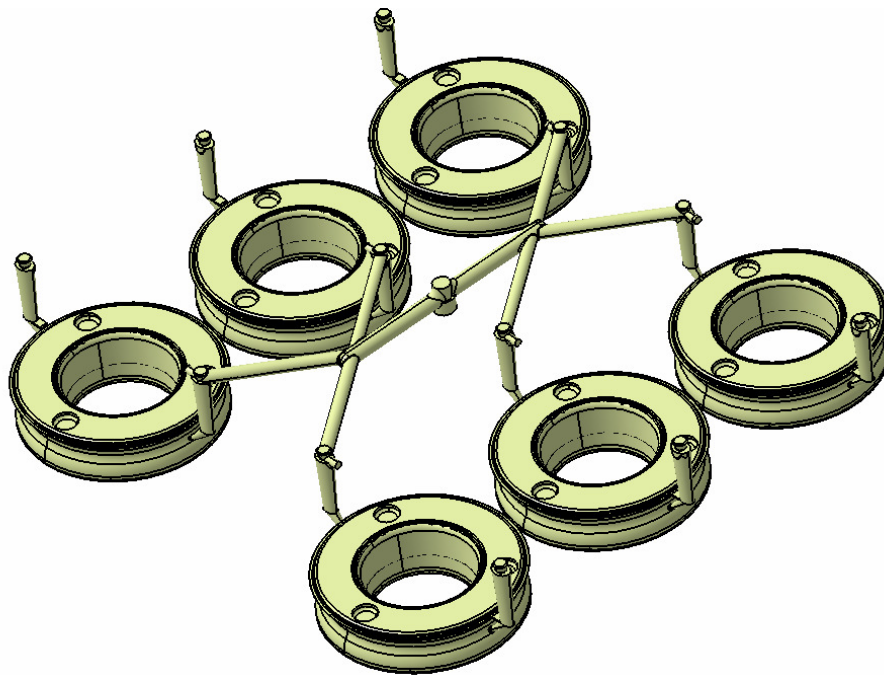
Dále v poslední části budou navrženy různé trajektorie tokových cest a je zkoumán vliv na zatékavost taveniny pro každou z nich při stejných vstupních parametrech pro dva různé materiály. V závěru je vyhodnocen vliv změny průřezu, délky a tvaru rozvodových kanálů u jednotlivých trajektorií a také jsou porovnány výsledky trajektorií mezi sebou pro materiál EPDM i NBR.

III. PRAKTICKÁ ČÁST

7 ANALÝZA VSTŘIKOVACÍHO PROCESU

Provedená analýza byla vytvořena pro firmu Rubena a.s. Tento výrobek je součástí uložení tlumičů osobních automobilů.

Byl zaslán 3D model výrobku, vzorky materiálu a také procesní parametry. Nejprve byla změřena materiálová data na univerzálním přístroji RPA 2000. Změřená materiálová data byla uložena do programu Cadmould a následně se získanými daty byla provedena analýza podle zadaných procesních parametrů.



Obr. 14. 3D model výrobku

7.1 Získání materiálových dat pro simulaci v programu Cadmould

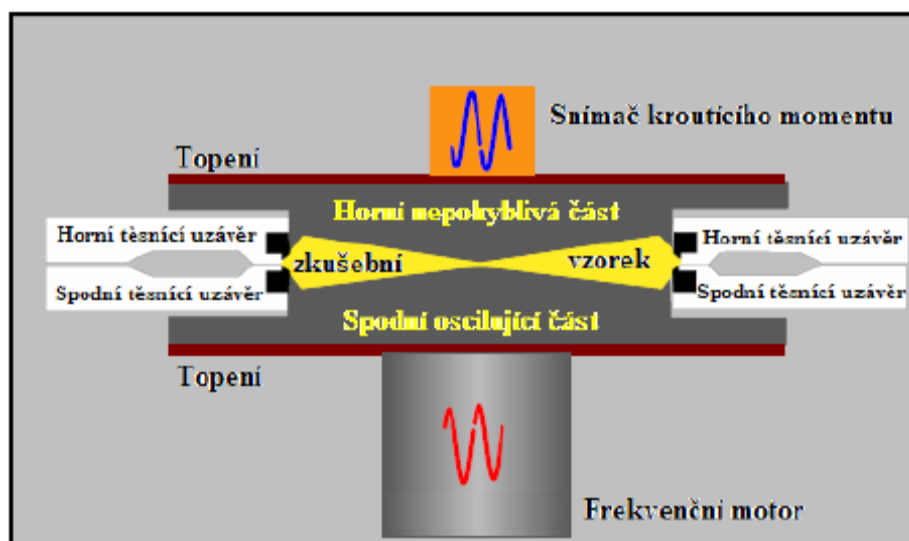
Vstupní materiálová data pro program Cadmould byla měřena na univerzálním přístroji RPA 2000. Lze zde měřit dynamické a viskoelastické vlastnosti vstupních polymerů, surových směsí, ale i výsledné vulkanizáty. Jedná se o bezrotorový typ reometru v uspořádání „kužel – kužel“, kde je zkušební vzorek namáhán smykovou deformací a měřenou veličinou je komplexní kroutící moment S^* . [15]



Obr. 15. Měřicí přístroj RPA 2000 [15]

Pro samotné měření jsou zapotřebí gumárenské směsi jak s vulkanizačním systémem tak i bez něj v množství cca 100g. Směs s vulkanizačním systémem slouží pro měření vulkanizačních charakteristik. Směs bez vulkanizačního systému slouží pro měření komplexní dynamické viskozity. [15]

Připravený vzorek elastomerní směsi o hmotnosti okolo 5g je umístěn do měřicího zařízení, kde je uzavřen silou 15kN. Horní i spodní část formy jsou vyhřívány s přesností $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. [15]

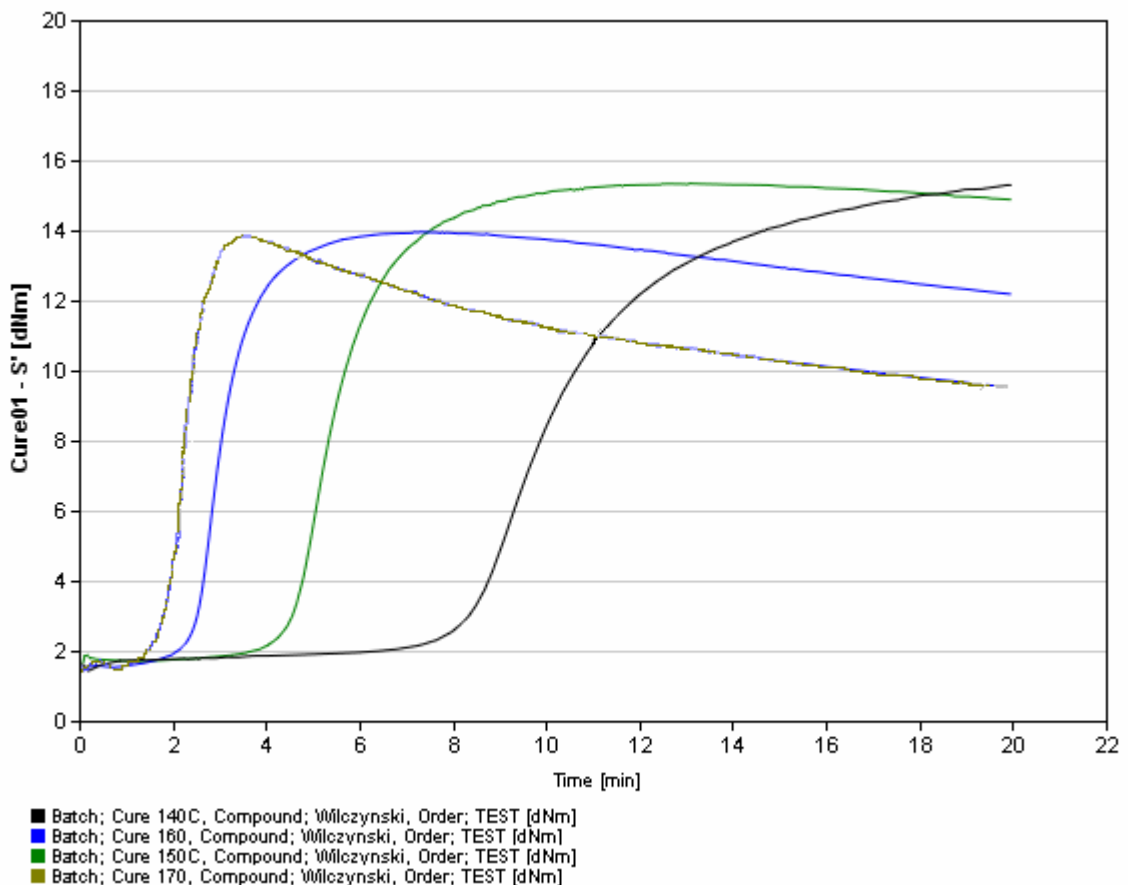


Obr. 16. Detailní pohled na měřicí část [15]

Kroutící moment je přenášen přes vzorek ze spodní oscilující části do horní, která je opatřena senzorem zaznamenávajícím změnu kroutícího momentu. Zároveň software, jež je součástí zařízení RPA 2000, vyhodnocuje měřené veličiny. [15]

7.1.1 Rychlost vulkanizace

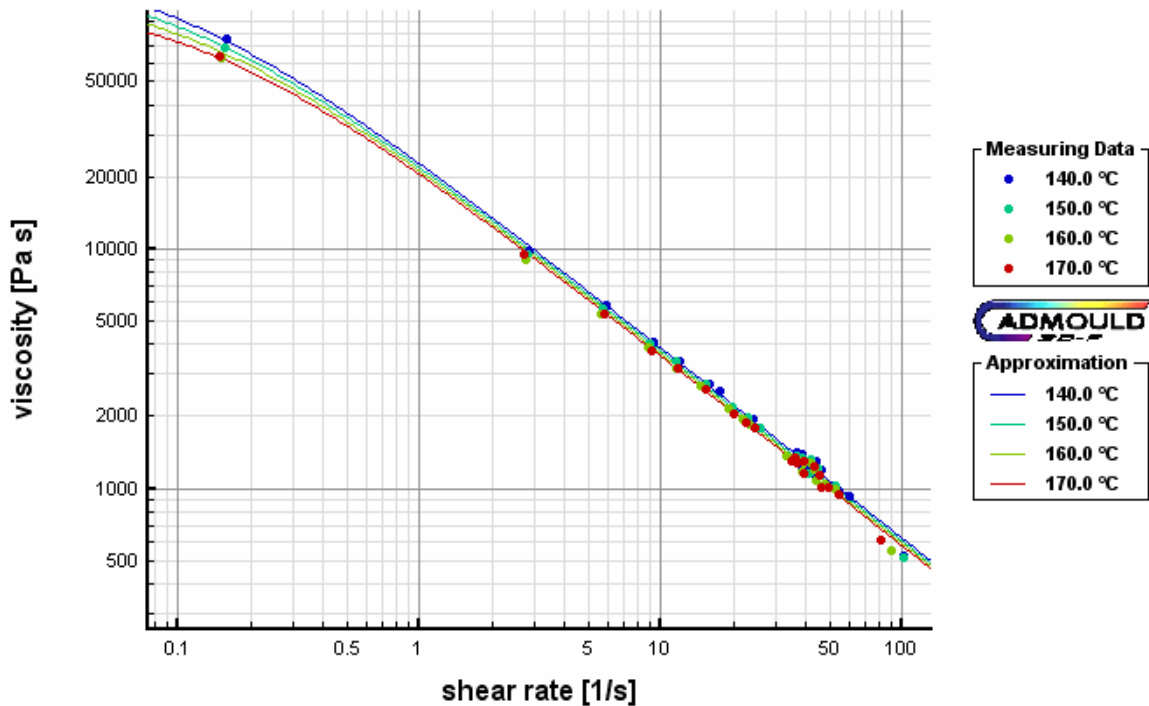
Měření bylo provedeno při čtyřech teplotách (140°C, 150°C, 160°C, 170°C), frekvenci oscilace 1,667 Hz a úhlu oscilace 6,975%. Naměřená data jsou z programu Eclipse Enterprice, který je běžnou součástí RPA2000, převedena do programu Microsoft Excel, kde mohou být případně upravena, a odtud je lze lehce vložit programu SIMFIT, který je během velmi krátké doby přepočítá na konstanty, se kterými pracuje program Cadmould. Naměřená data jsou zobrazena pomocí vulkanizačních křivek na obrázku 17. Tento obrázek byl vykreslen v programu Eclipse Enterprice.



Obr. 17. Rychlost vulkanizace pro různé teploty

7.1.2 Komplexní dynamická viskozita

Měření se provádí obdobným způsobem jako měření vulkanizačních charakteristik opět při teplotách v rozmezí (30 – 230)°C pouze za jiné konfigurace testu. Data opět projdou aproximací a jsou vložena do programu Cadmould. [15]



Obr. 18. Zobrazení naměřených dat dynamické viskozity

7.2 Nastavení procesních parametrů

Tab. 2. Procesní parametry

| | | |
|----------------------------|-----|----|
| Čas plnění formy | 30 | s |
| Přepnutí na dotlak | 99 | % |
| Teplota taveniny | 100 | °C |
| Teplota stěny dutiny formy | 160 | °C |
| Doba ohřevu | 600 | s |
| Doba dovulkanizace | 200 | s |

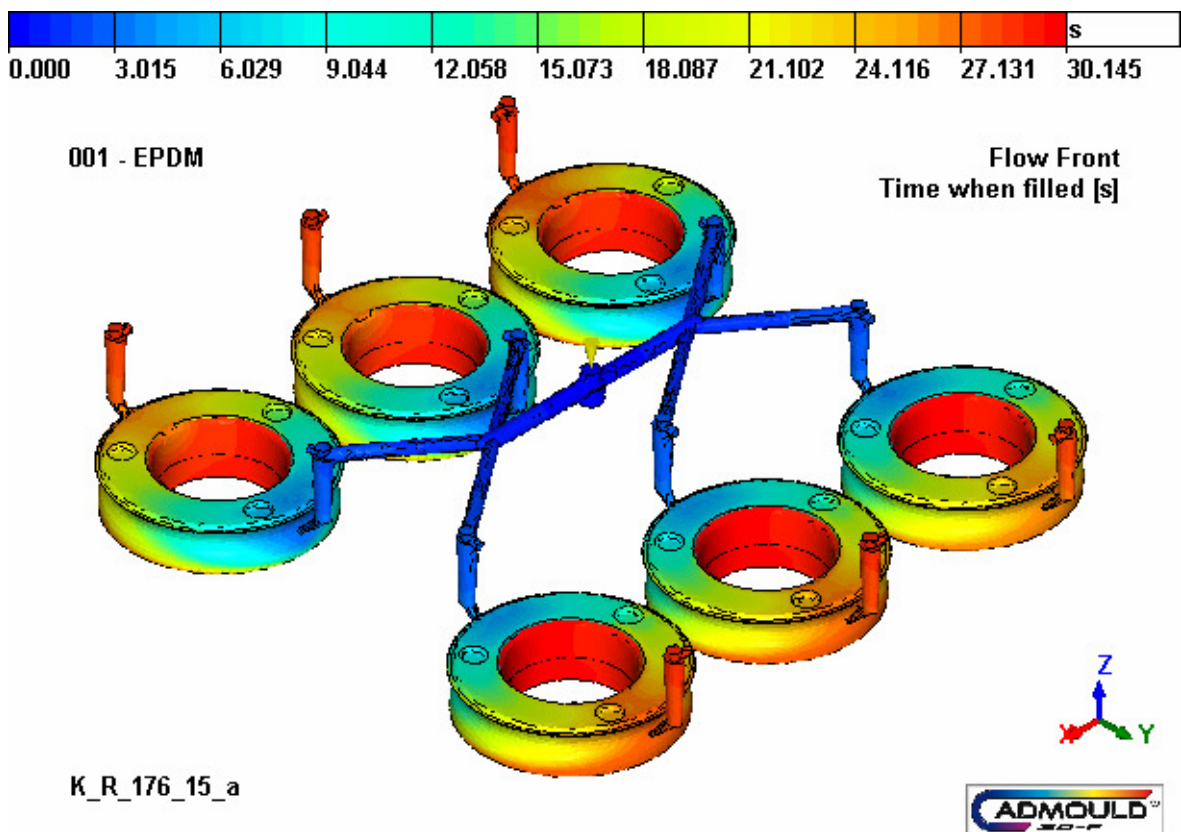
Průběh vstřikovací rychlosti je uveden v Příloze I.

7.3 Výsledky analýz

Pro správné nastavení vstřikovacího procesu u elastomerů je velice důležité znát rozložení a průběh teplot u daného dílce. Od znalosti průběhu teplot v daném místě lze dále určit bezpečnost vulkanizace, rychlost vulkanizace, potřebnou dobu ohřevu atd. pro danou směs.

7.3.1 Plnění dutiny

Analýza zobrazuje dobu plnění dutiny formy kaučukovou směsí. Průběh doby plnění znázorňuje barevné spektrum. Podle nastavení procesních parametrů je doba zaplnění dutiny 30 s.

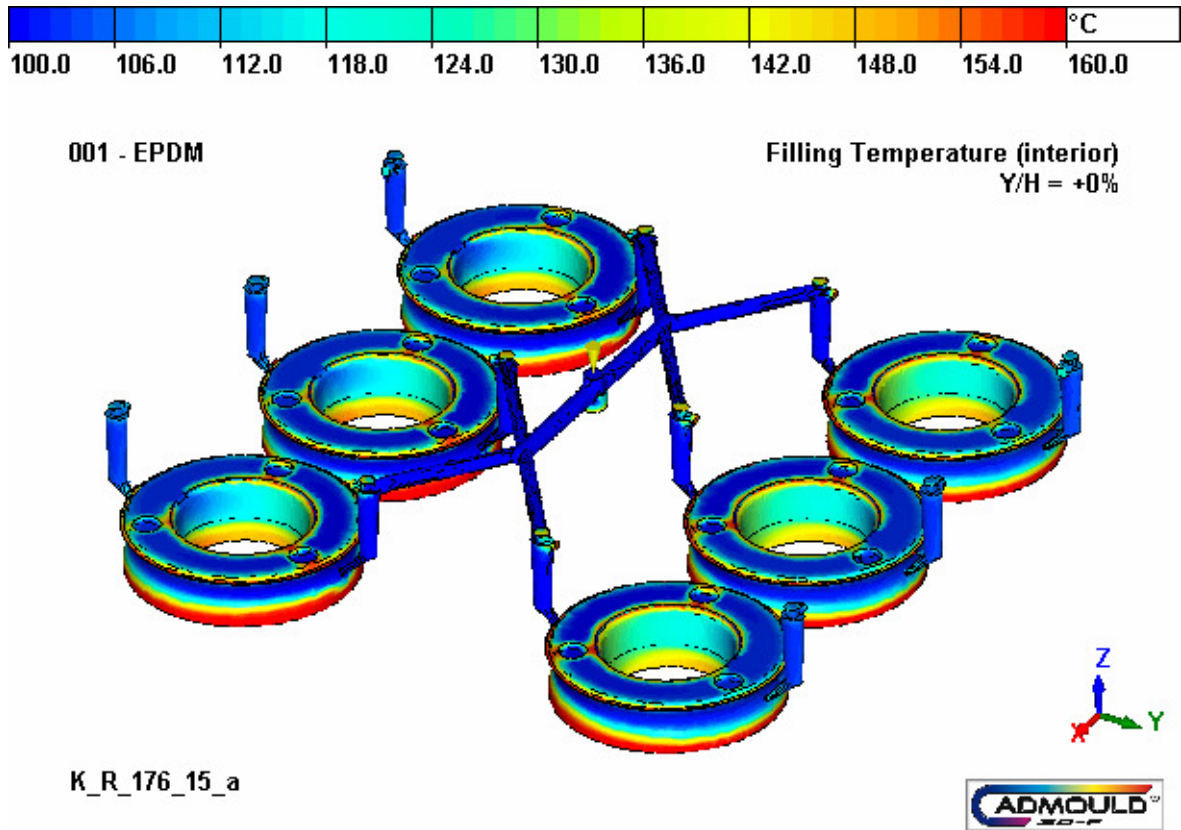


Obr. 19. Čas plnění

7.3.2 Průběh teplotního pole

Jak už bylo zmíněno, u vstřikování elastomerů je velice důležité znát průběh teplotního pole v dílci. Na Obr. 20. je zobrazena teplota v čase 30 sekund, je to doba, kdy je ukončeno vstřikování a nastává ohřev, kdy je materiál vulkanizován. Během nastavení analýzy v programu Cadmould byl výrobek rozdělen do 21 vrstev (jedna vrstva je střednicová a

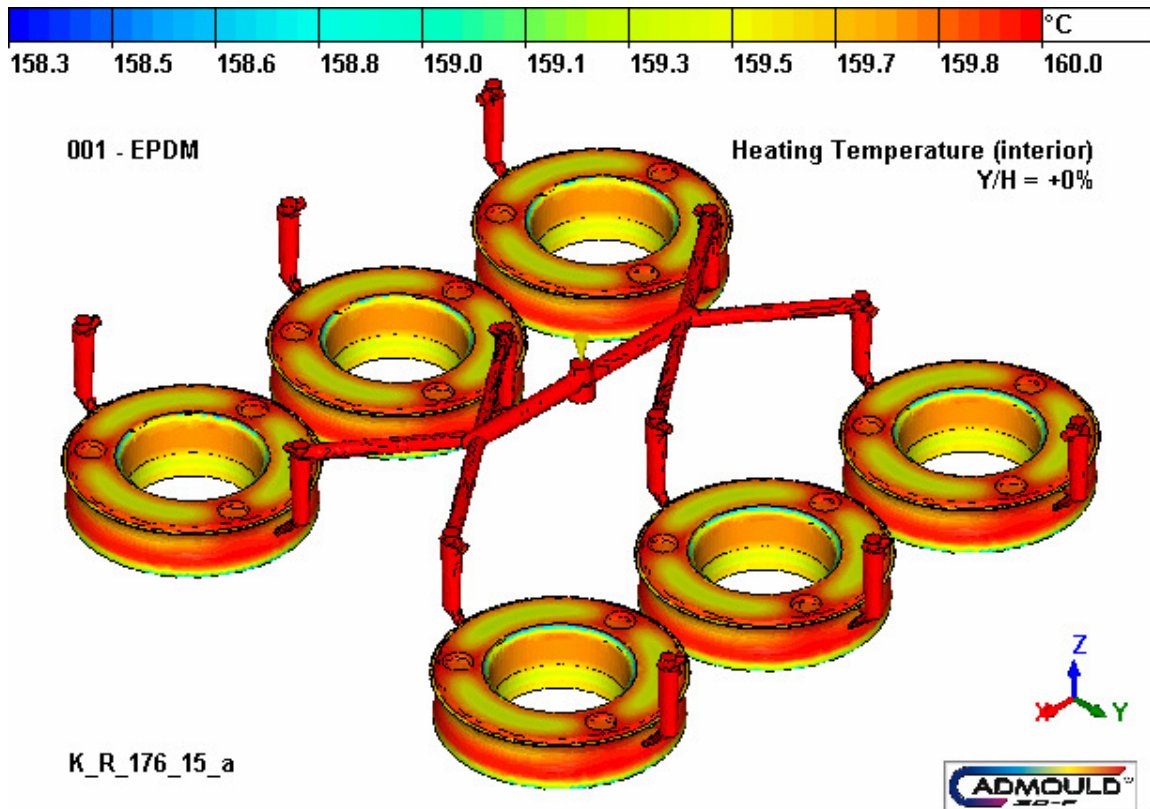
rozděleno 10 na každou stranu). Vrstva, která je označena „Y/H= +0%“ zobrazuje výsledek uprostřed výrobku a naopak krajní vrstva je označena „Y/H= +50%“, zde je výsledek zobrazen na povrchu výrobku.



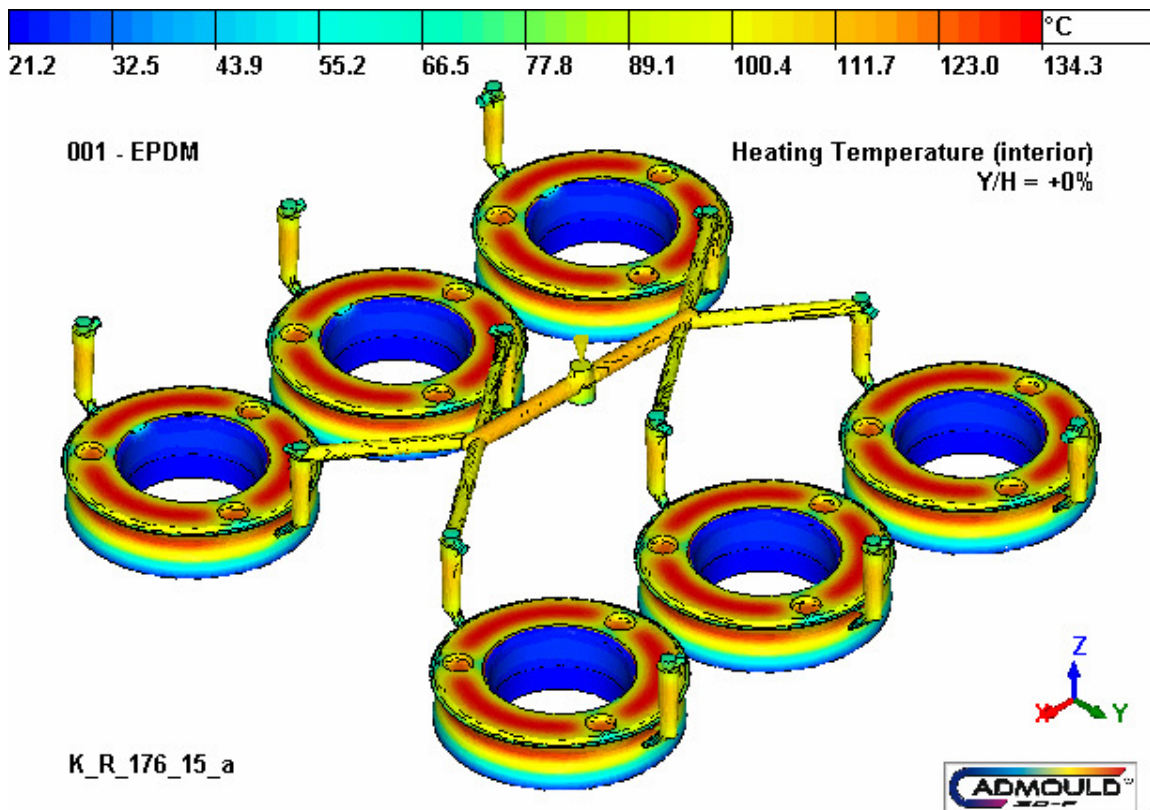
Obr. 20. Teplotního pole ve střední vrstvě v čase 30s

Na obrázku 21 je zobrazeno teplotní pole v době, kdy je výrobek vyhazován z formy, to znamená v čase 630 s (30 s – doba vstřikování, 600 s – doba ohřevu ve formě).

Na následujícím obrázku je zobrazeno teplotní pole na konci analýzy. Konec analýzy byl určen v čase, kdy už u materiálu neprobíhá dovulkanizace. Tento čas byl určen předběžnými analýzami.



Obr. 21. Teplotní pole ve střední vrstvě v čase 630s

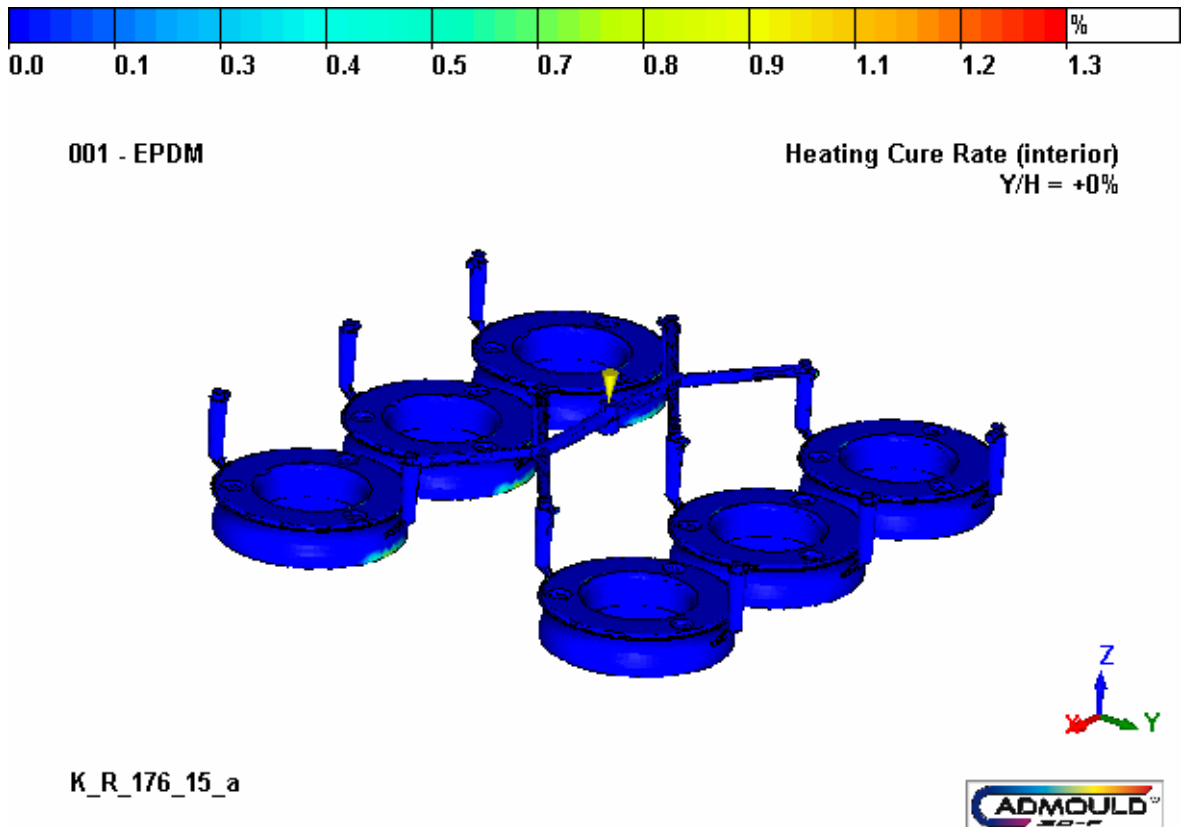


Obr. 22. Teplotní pole ve střední vrstvě v čase 830s

Materiál v čase 630 s byl téměř v každém místě prohřán na teplotu 160°C jak lze vidět na barevném spektru v horní části obrázku. Poté byl výrobek vyhozen a samovolně chladnul při teplotě okolí 20°C.

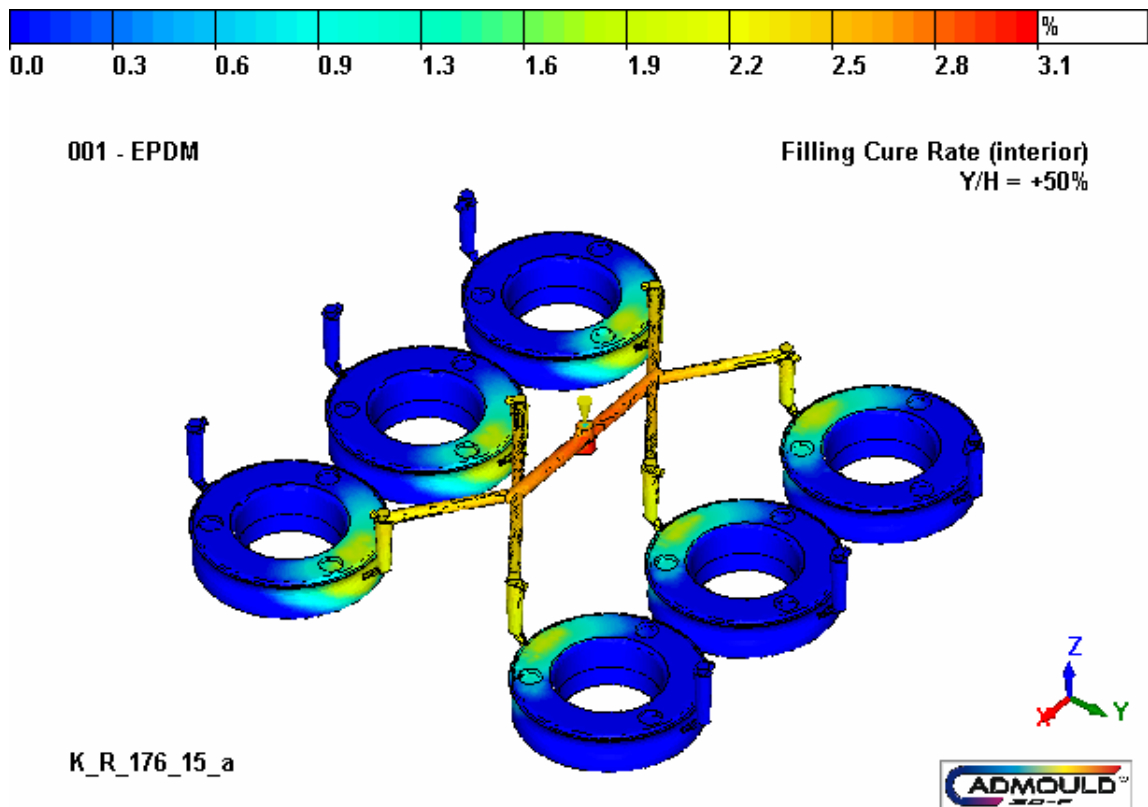
7.3.3 Průběh stupně vulkanizace

Následující výsledky ukazují procento vulkanizace v jednotlivých vrstvách za určitý čas.

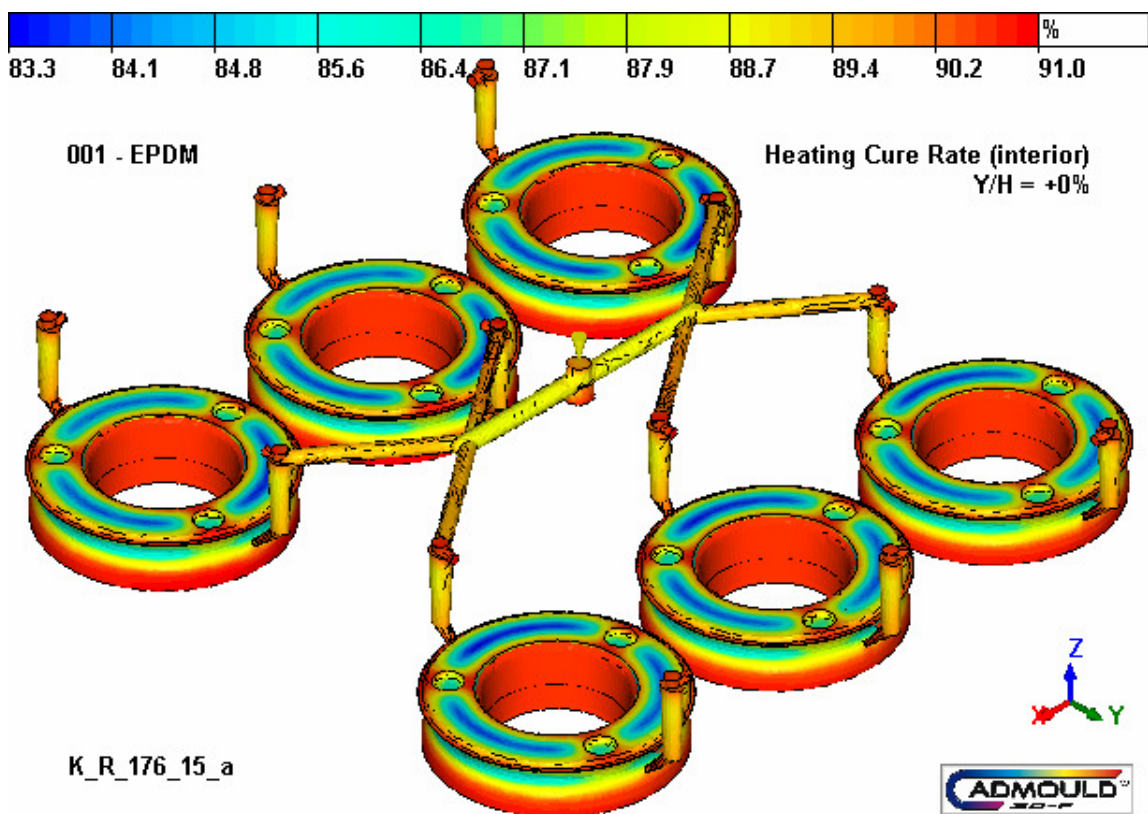


Obr. 23. Průběh vulkanizace ve střední vrstvě v čase 30s

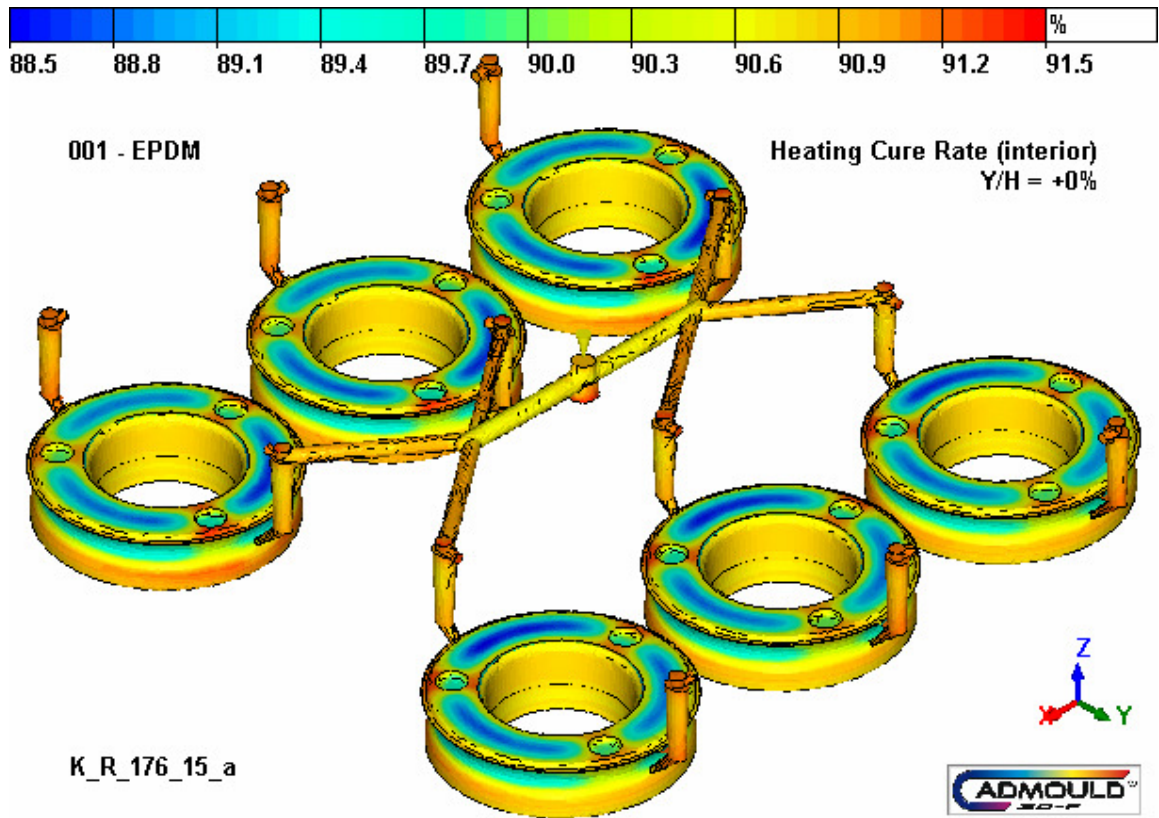
První obrázek zobrazuje procento vulkanizace ve střední vrstvě výrobku v době 30 s. Na obrázku 24 lze vidět průběh vulkanizace na povrchu, v místě kde se výrobek dotýká se stěnou formy ve stejném čase. V čase 30 s lze vidět, že ve směsi už začíná vulkanizace, zejména v rozvodných kanálcích, ale také na části výrobku blízko místa vtoku. Toto procento z vulkanizovaného materiálu je dosti nízké, aby zabránilo správnému zatečení materiálu do dutiny formy.



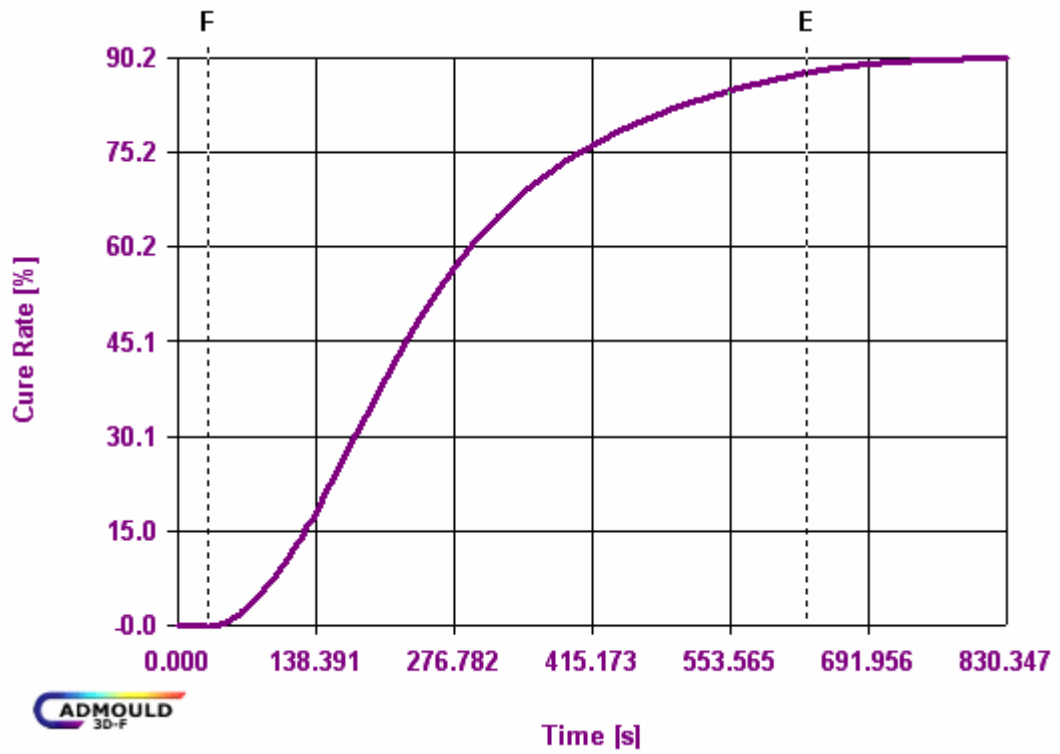
Obr. 24. Průběh vulkanizace na povrchu výrobku v čase 30s



Obr. 25. Průběh vulkanizace ve střední vrstvě v čase 630s



Obr. 26. Průběh vulkanizace ve střední vrstvě v čase 830s



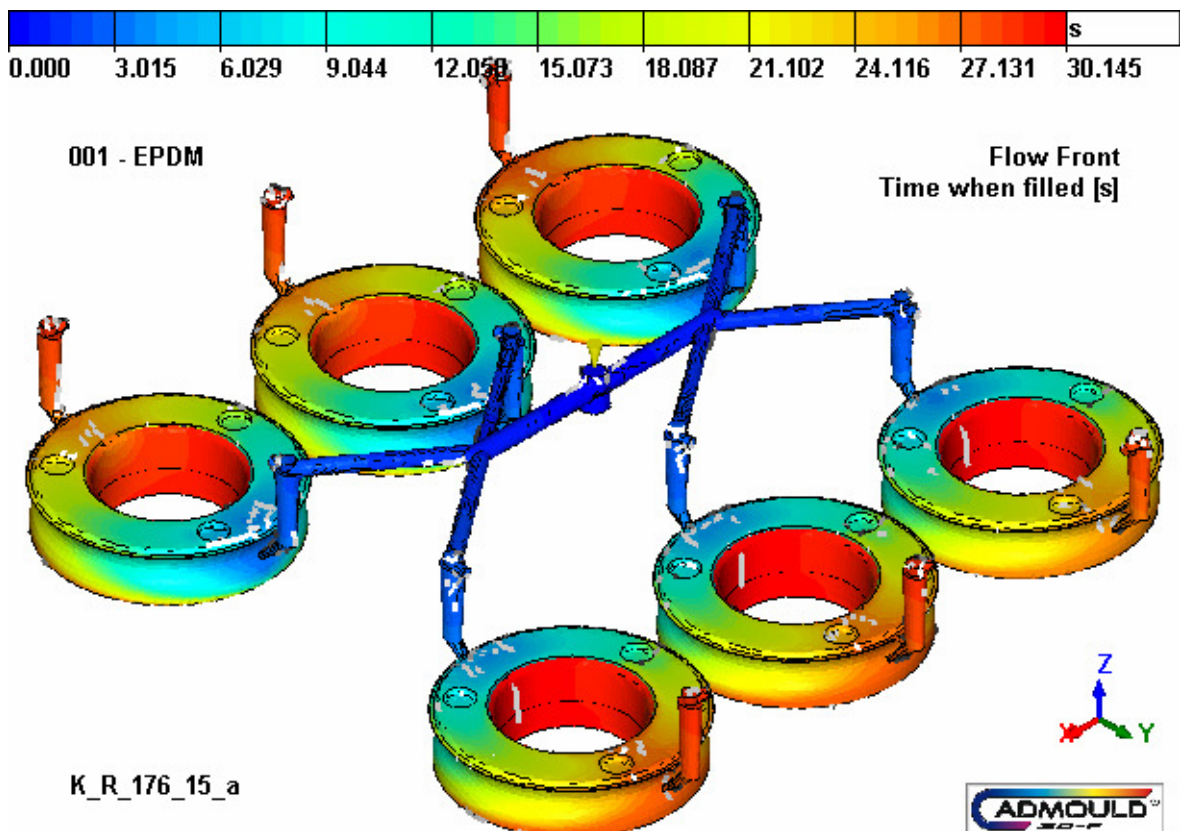
Obr. 27. Grafické zobrazení průběhu vulkanizace v 630s

V době vyhození výrobku z formy (čase 630) je materiál z vulkanizován v intervalu (83,3 – 91) %, jak lze vyčíst z barevného spektra viz Obr. 25. Tento rozptyl se jeví jako dostatečný a neměl by mít negativní vliv na funkčnost výrobku.

V čase 830s, kdy už je rychlost vulkanizace ustálena, dosahuje ve střední vrstvě výrobku (88,5 – 91,5) % dle Obr. 26. a na povrchu 90,2%, jak lze vidět z grafického zobrazení průběhu vulkanizace na Obr. 27.

7.3.4 Studené spoje

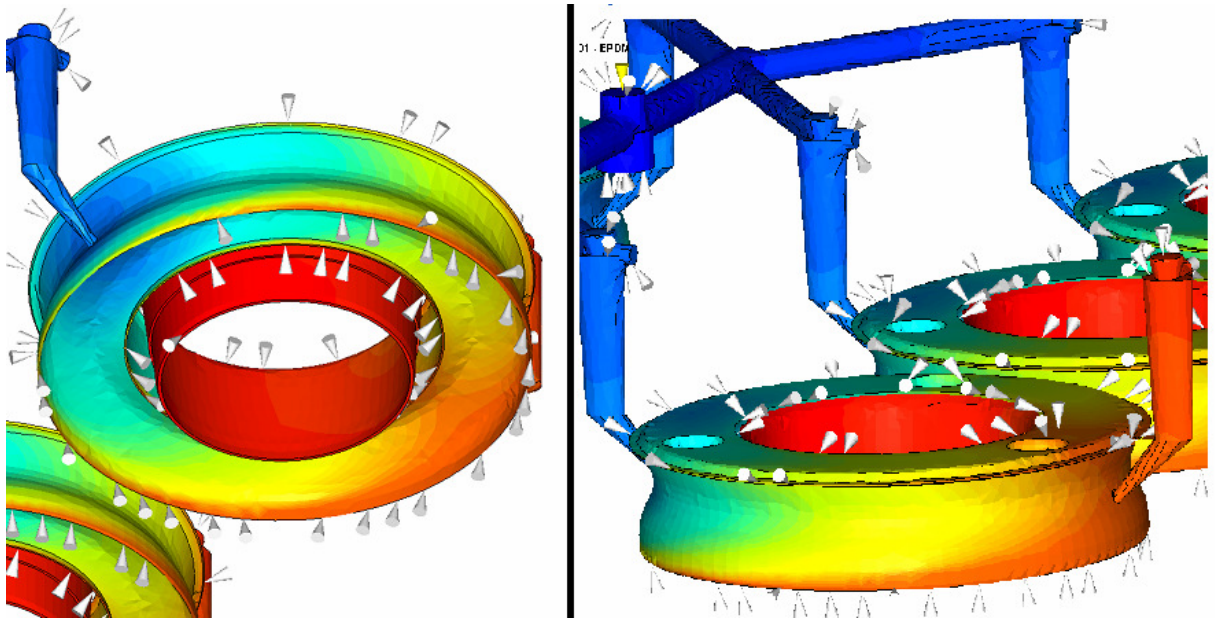
Výsledek analýzy studených spojů zobrazuje, kde se na výrobku tato chyba projeví. Studeným spojem je myšleno místo, kde se setkají dvě čela taveniny s vyšším stupněm vulkanizace. Studený spoj je chybou pohledovou i mechanickou. Studené spoje a jejich kvalitu lze eliminovat vhodným umístěním vtoku, konstrukcí výrobku nebo změnou technologických podmínek.



Obr. 28. Studené spoje

7.3.5 Vzduchové kapsy

Analýza ukazuje, kde se v dutině formy bude pravděpodobně uzavírat vzduch. Kritická místa jsou znázorněna bílými kužely. Vzduch se uzavírá v místech setkání dvou čel taveniny nebo tam, kde taveniny končí svůj tok. V tomto případě je to převážně na obvodu pryžového dílce, kde má výrobek téměř nulovou tloušťku. Tyto výsledky dopomáhají řešit odvzdušnění formy, které je podrobněji popsáno v teoretické části této diplomové práce.



Obr. 29. Odhad výskytu vzduchových kapes

V první části byly prezentovány výsledky, které byly prioritní pro firmu Rubena a.s. Provedené Analýzy naznačují podobnou tendenci jako u reálného procesu, ukazují na konkrétní problémy vzniklé během vstřikování. Dle výsledku firma Rubena a.s. již nebude provádět úpravu nástroje, bude měnit jen některé procesní parametry k zlepšení výsledných vlastností výrobku.

8 VLIV TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ A DRSNOSTI POVRCHU NA PLNĚNÍ DUTINY FORMY

Příprava zkušebních vzorků bylo použito stroje V27/Y125 od francouzské firmy Rep. Po vstříknutí a následném otevření formy byl vzorek díky přidržovači vtoku vytržen z pevné části formy. Následné odformování výrobku a vtokového zbytku z pohyblivé části formy bylo provedeno ručně pomocí kleští.

8.1 Vstřikovací stroj

Rep V27/Y125 je vertikální vstřikovací stroj, který slouží ke zpracování elastomerních směsí. Materiál vstupuje do šnekové plastikační jednotky ve formě pásku. Zde je zplastikován a dopraven do pístové vstřikovací jednotky. Odtud je materiál vstříknut do dutiny formy.



Obr. 30. Vstřikovací stroj REP [13]

8.2 Vstřikovací forma

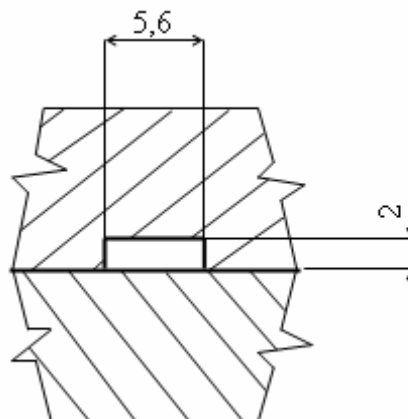
Vstřikovací forma byla vyrobena přímo pro účely vyhodnocení vlivu technologických parametrů a drsnosti povrchu na plnění dutiny formy. Skládá se ze dvou hlavních částí, pohyblivé a pevné. Stroj ani forma není vybavena vyhazovacím systémem. Obě části jsou opatřeny teplotními čidly pro snímání teploty ve formě, ty jsou napojeny na vstřikovací stroj, který elektricky vyhřívá formu.

8.2.1 Spodní část formy

Spodní část formy tvoří deska s dutinou formy ve tvaru spirály. Uvnitř jsou vyraženy značky s číslicemi pro snazší měření dráhy zatečení. Vzdálenost mezi značkami je 50 mm. Celková délka spirály je 2000 mm. Výška spirály $h = 2$ mm. Šířka spirály $t = 5,6$ mm.



Obr. 31. Spodní část formy [14]



Obr. 32. Řez dutinou formy [14]

8.2.2 Horní díl formy



Obr. 33. Zkušební desky [14]

Horní díl formy je tvořen vyměnitelnými deskami o různé drsnosti povrchu Obr. 33. Pro měření zatékavosti bylo použito pět desek z různými typy povrchů, zleva - povrch leštěný, broušený, vyjiskřovaný (s označením jemný dezén), frézovaný a vyjiskřovaný (s označením hrubý dezén). U desek již byla známa drsnost povrchu, hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3. Lze vidět, že drsnost povrchu desek roste od leštěné desky až po desku s hrubým dezénem.

Tab. 3. Drsnost jednotlivých desek

| Typ desky | Ra [μm] |
|-------------|----------------------|
| Leštěná | 0,029 |
| Broušená | 0,37 |
| Jemný dezén | 3,52 |
| Frézovaná | 9,37 |
| Hrubý dezén | 17,39 |

8.3 Procesní podmínky

Tab. 4. Procesní podmínky

| | | |
|----------------------------|-----|----|
| Čas plnění | 30 | s |
| Čas vulkanizace | 200 | s |
| Teplota horní části formy | 170 | °C |
| Teplota dolní části formy | 170 | °C |
| Teplota pracovního válce | 80 | °C |
| Teplota vstřikovací komory | 85 | °C |

Pro vstřikování elastomerní směsi byly nastaveny procesní podmínky podle Tab.4. Dále během testu byl měněn vstřikovací tlak a jednotlivé zkušební desky. Velikost tlaku byla volena podle možnosti vstřikovaného stroje. Minimální hodnota vstřikovacího tlaku byla omezena tokovými vlastnostmi dané směsi. Při nižších hodnotách ne vždy docházelo k zatečení směsi do dutiny formy. Hodnoty jednotlivých parametrů jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5. Nastavení procesu

| Parametr | Hodnoty |
|------------------|---|
| Vstřikovací tlak | 12 MPa, 16 MPa, 20 MPa, 24 MPa |
| Zkušební deska | leštěná, broušená, s jemným dezénem, frézovaná, s hrubým dezénem |

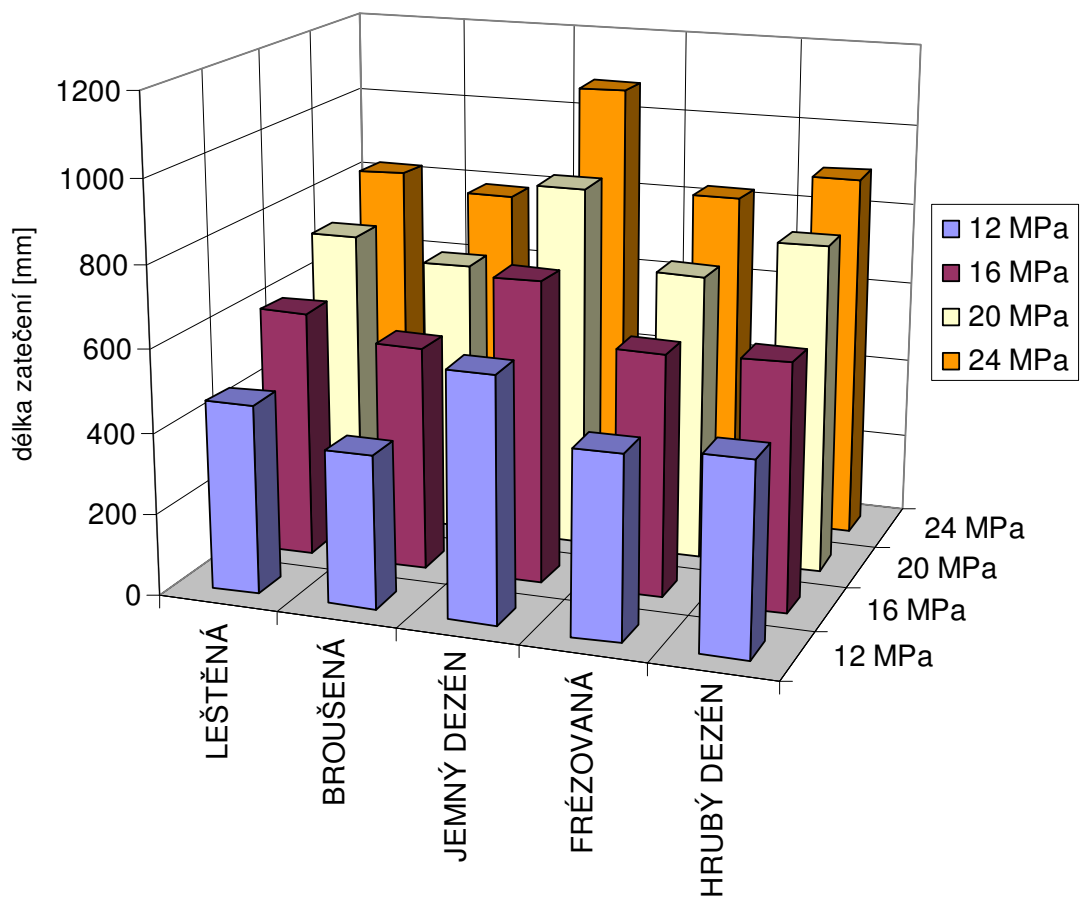
8.4 Zkušební vzorek

Výsledkem vstřikovacího procesu byl zkušební vzorek ve tvaru spirály. Po vyjmutí z formy byla změřena délka vzorku, na jejímž základě se vyhodnocovala zatékavost elastomerní taveniny. Pro vstřikování byla použita reálná běhounová kaučuková směs.



Obr. 34. Zkušební vzorek [13]

8.5 Výsledky měření



Obr. 35. Porovnání vlivu typu desky na zatečení při daných tlacích

S rostoucím vstřikovacím tlakem roste délka zatečení u každé desky. Z naměřených hodnot vyplývá, že výrazná změna povrchu nemá prokazatelný vliv na délku zatečení taveniny. Výše uvedené zjištění může mít velký význam pro výrobce vstřikovacích forem. Je patrné,

že u vstřikování dílců, kde není kladen důraz na výsledný vzhled povrchu by dutina vstřikovací formy nemusela být leštěna, ani broušena. Zejména by mohlo být výsledků využito na konstrukci rozvodných kanálů, které slouží jen pro dopravu taveniny do dutiny formy. Tyto kanály jsou odpadem, nebo se recyklují, nemusí být tedy u nich kladen takový důraz na vzhled (drsnost povrchu). Samozřejmě musí být umožněno bezproblémové odformování výrobků a tokových zbytků. Důležité je vyvarovat se špinění formy na což má velká drsnost povrchu negativní vliv.

Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v Příloze II.

9 VLIV TVARU TRAJEKTORIE NA PLNĚNÍ DUTINY FORMY

Cílem třetí části bylo pozorovat závislosti teploty taveniny na druhu trajektorie tokových kanálů. Snahou bylo najít takovou trajektorii, která pomůže zvýšit teplotu taveniny před vtokem do dutiny formy. Poté zjistit, jakým způsobem zvýšení teploty ovlivní ostatní parametry vstřikovacího procesu.

9.1 Nastavení analýzy

Tato Analýza byla provedena v programu Cadmould Rubber. Pro simulaci byly použity dva materiály a šest různých trajektorií, u kterých se měnil velikost průřezu. Elastomerní směsi byly vybrány z databáze Cadmouldu, jedna byla na bázi EPDM a druhá na bázi NBR. Procesní parametry byly nastaveny podle Tab. 6. Vstřikované tělísko byla krychle o rozměrech (30 x 30 x 30) mm.

Tab. 6. Nastavení analýzy

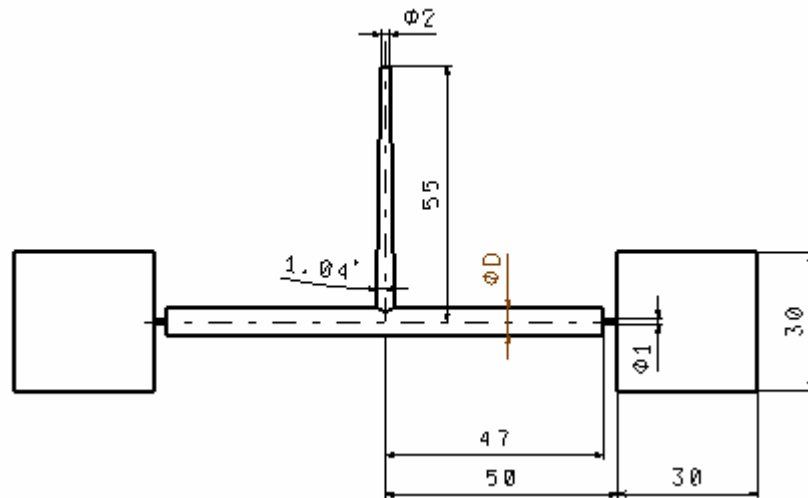
| | | |
|----------------------------|-----|----|
| Čas plnění formy | 30 | s |
| Přepnutí na dotlak | 99 | % |
| Teplota taveniny | 100 | °C |
| Teplota stěny dutiny formy | 160 | °C |
| Doba ohřevu | 600 | s |
| Doba dovulkanizace | 200 | s |

9.2 Analýza jednotlivých trajektorií

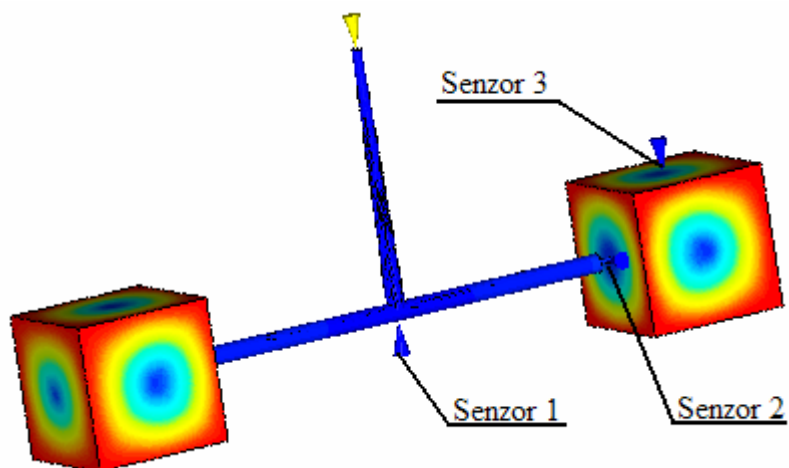
Pro přesnější popsání výsledků byly umístěny na každou geometrii tři senzory. První byl umístěn pod vtokový kužel, druhý do vtokového ústí a třetí doprostřed zkušební vzorku, jak je zobrazeno u jednotlivých trajektorií.

9.2.1 Trajektorie 1

Jedná se o kruhový průřez kanálu o délce 47 mm, analýza byla počítána pro průměry (6,4,2) mm. Vtokové ústí bylo vytvořeno zúžením průměru na 1 mm o délce 3 mm.

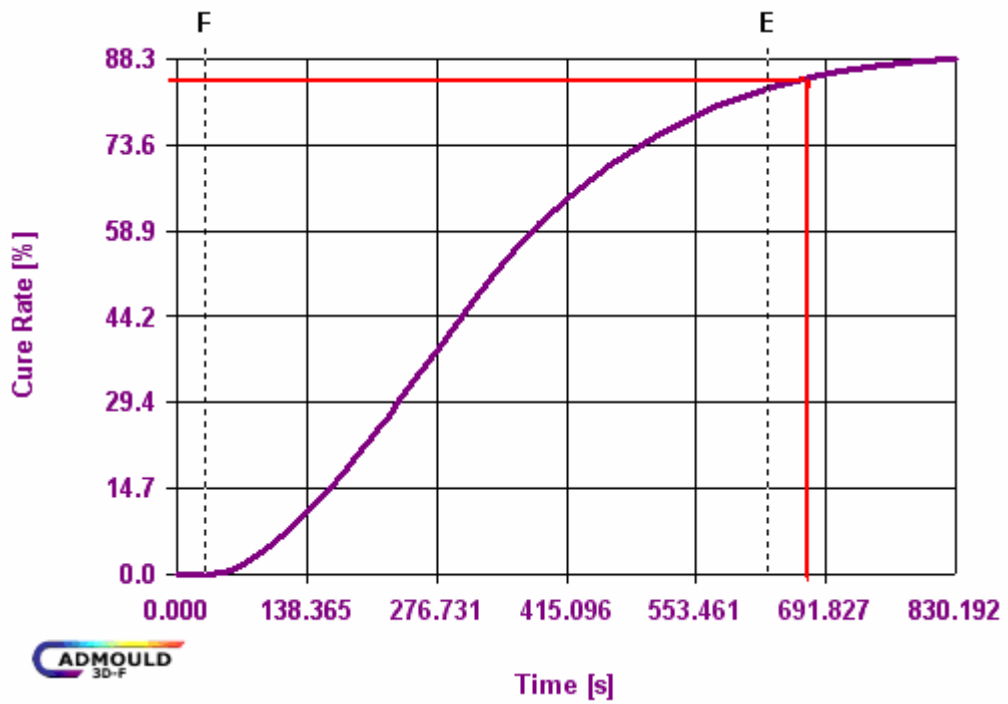


Obr. 36. Krátký, kruhový kanál

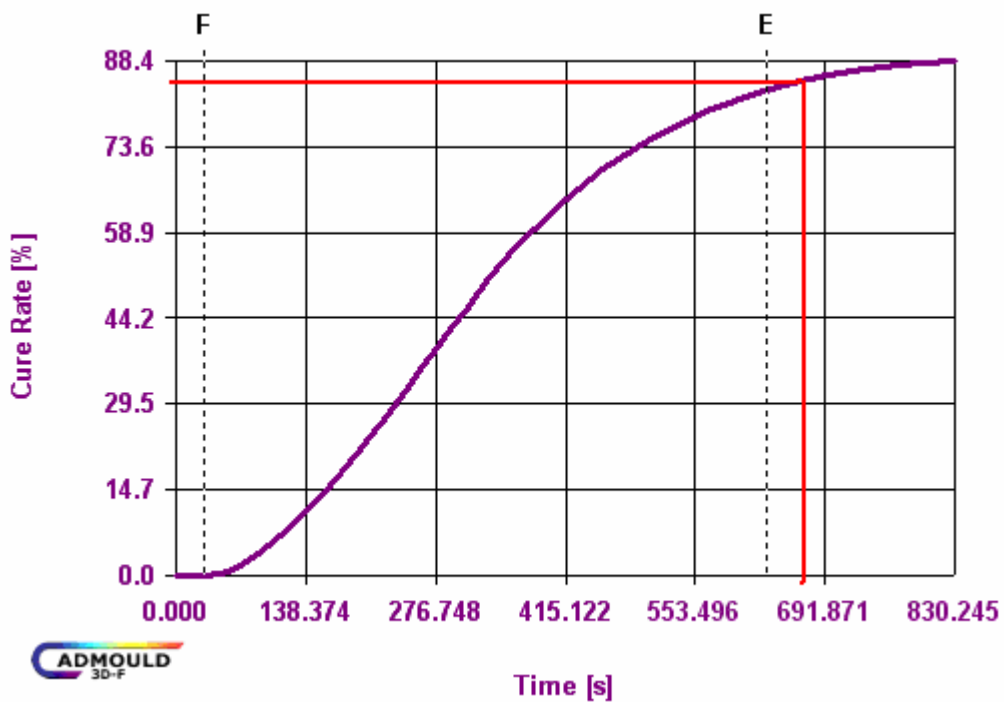


Obr. 37. Umístění senzorů u trajektorie 1

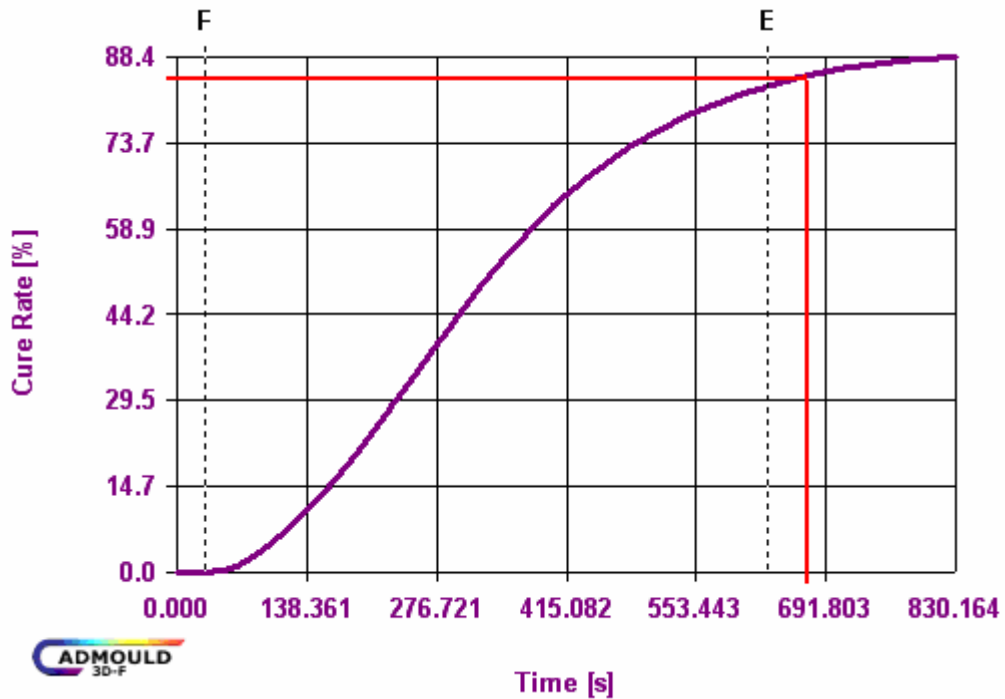
Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (EPDM) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto výsledky jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 38. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\varnothing D = 6 \text{ mm}$, materiál EPDM



Obr. 39. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\varnothing D = 4 \text{ mm}$, materiál EPDM



Obr. 40. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\varnothing D = 2$ mm, materiál EPDM

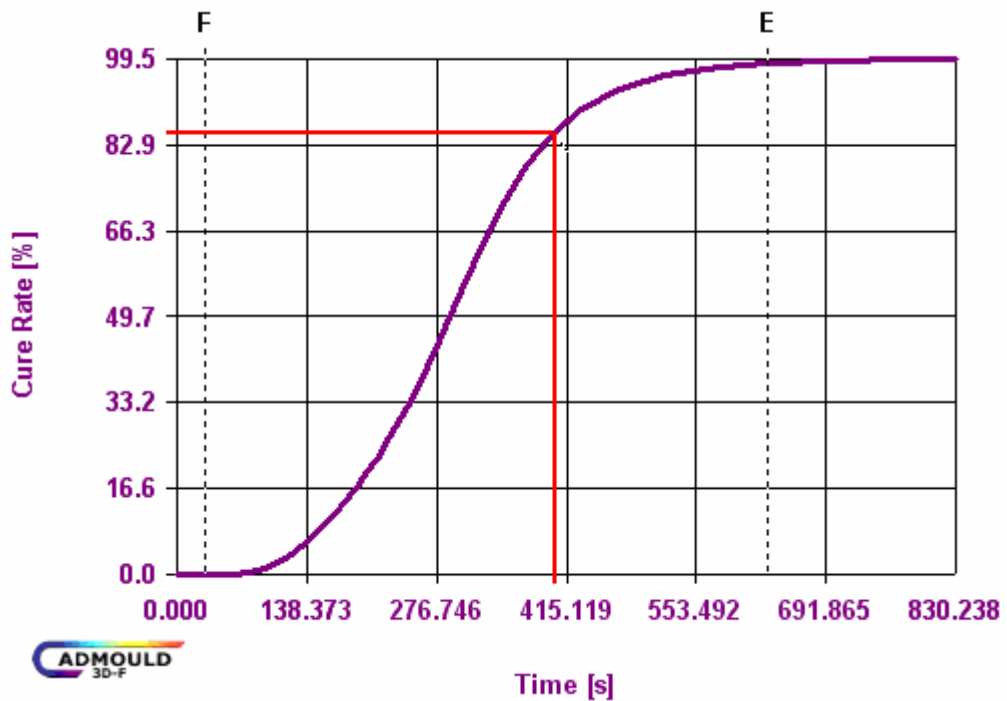
Tabulka 7 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

Tab. 7. Výsledky analýzy trajektorie 1, materiál EPDM

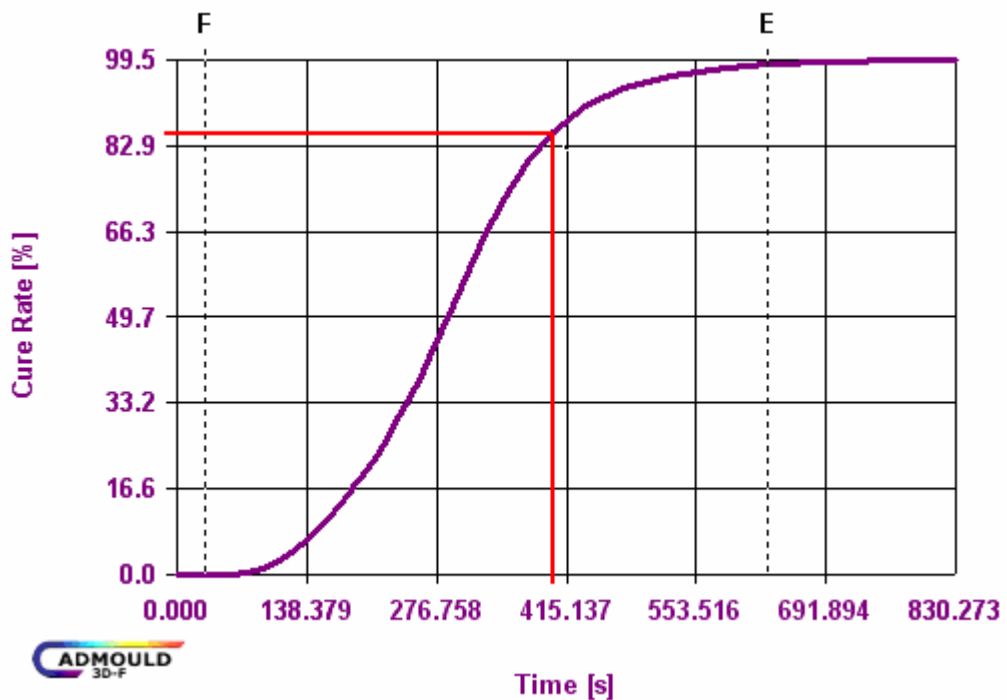
| $\varnothing D$ [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 6 | 118,2 | 116,9 | 116,6 | 73,6 | 672 |
| 4 | 118 | 118,1 | 118,2 | 22 | 670 |
| 2 | 117,9 | 118,5 | 118,5 | 28,9 | 668 |

Trajektorie 1 zobrazuje jeden z nejjednodušších rozvodných kanálů, které mohou být použity. Snížením průměru z 6 mm na 2 mm bylo dosaženo zvětšení teploty taveniny na konci rozvodného kanálu pouze o 1,6°C pro materiál EPDM. Díky nárůstu této teploty byl snížen čas na zvulkanizování 85% materiálu o 4 s.

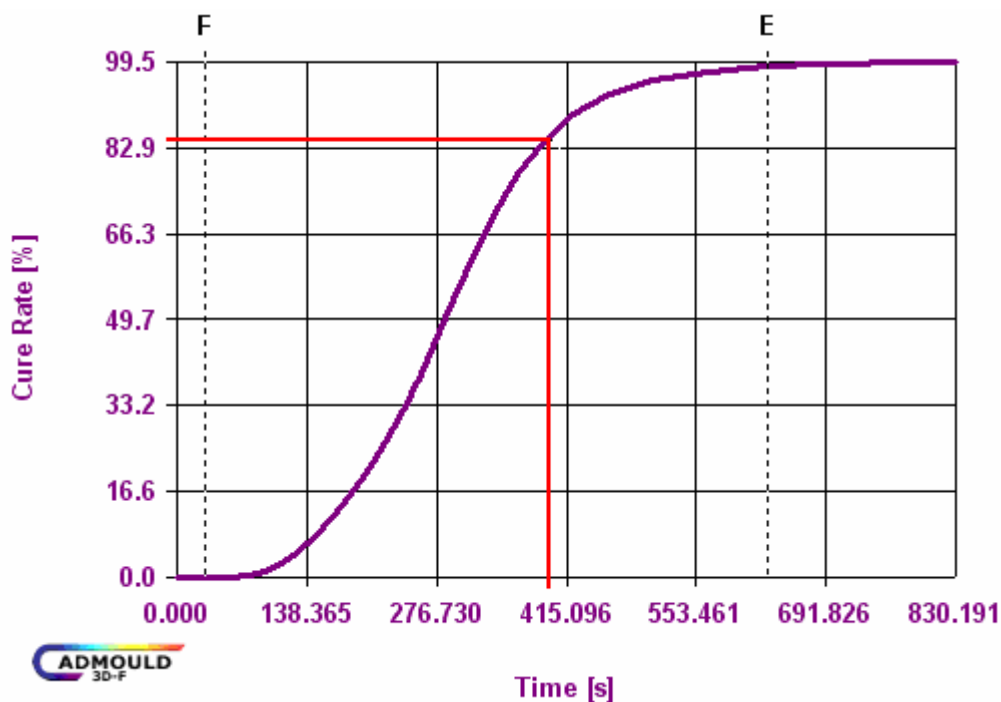
Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (NBR) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 41. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\varnothing D = 6$ mm, materiál NBR



Obr. 42. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\varnothing D = 4$ mm, materiál NBR



Obr. 43. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\varnothing D = 2$ mm, materiál NBR

Tabulka 8 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

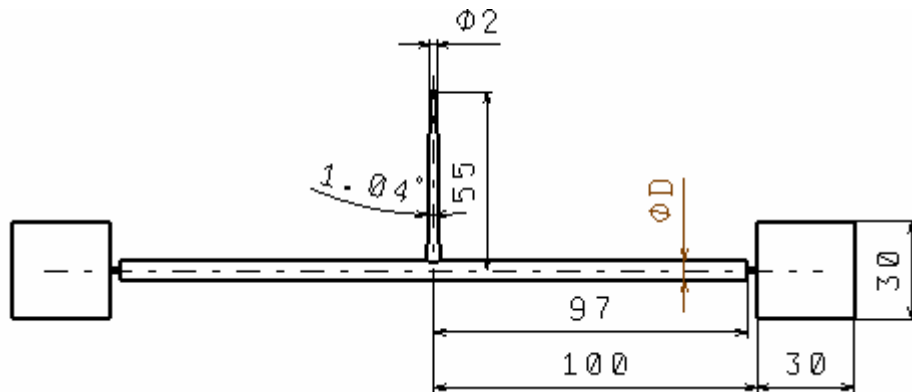
Tab. 8. Výsledky analýzy trajektorie 1, materiál NBR

| $\varnothing D$ [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 6 | 112,7 | 117,5 | 117,5 | 94,2 | 400 |
| 4 | 113,9 | 118,6 | 118,8 | 41 | 398 |
| 2 | 113,9 | 120,6 | 120,5 | 42,2 | 395 |

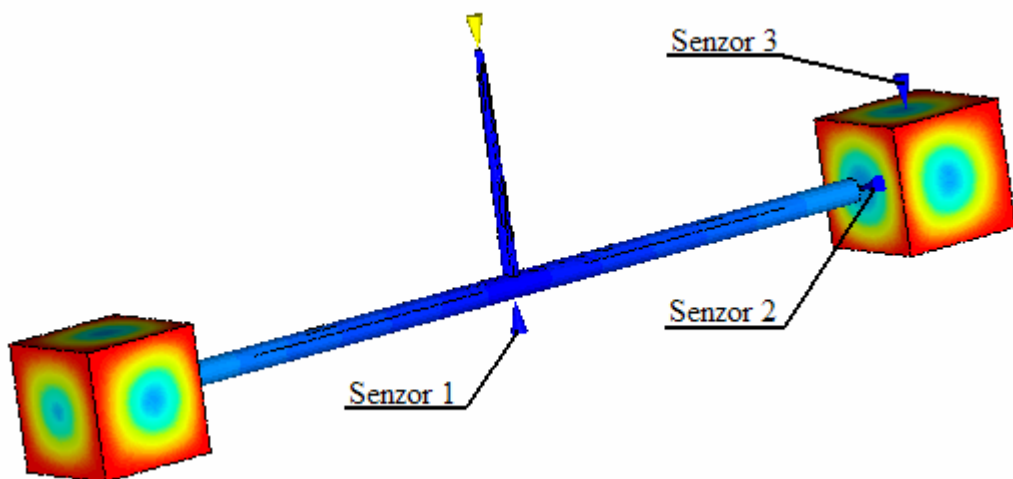
Změnou průměru z 6 mm na 2 mm bylo dosaženo zvětšení teploty taveniny na konci rozvodného kanálu o 3,1°C pro materiál NBR. Díky nárůstu této teploty byl snížen čas na zvulkanizování 85% materiálu o 5 s. Materiál NBR u první trajektorie má lepší výsledky než materiál EPDM. V rozvodných kanálech prochází elastomerní směs relativně tenkou štěrbinou a je výrazněji ohříván od stěny formy než v dutině formy, kde rozměr dutiny je (30 x 30 x 30) mm, a proto mezi senzorem 1 a 2 je zřejmý nárůst teploty, mezi senzorem 2 a 3 se teplota téměř nemění.

9.2.2 Trajektorie 2

Jedná se o kruhový průřez kanálu o délce 97 mm, analýza byla počítána pro průměry (6,4,2) mm. Vtokové ústí bylo vytvořeno zúžením průměru na 1 mm o délce 3 mm.

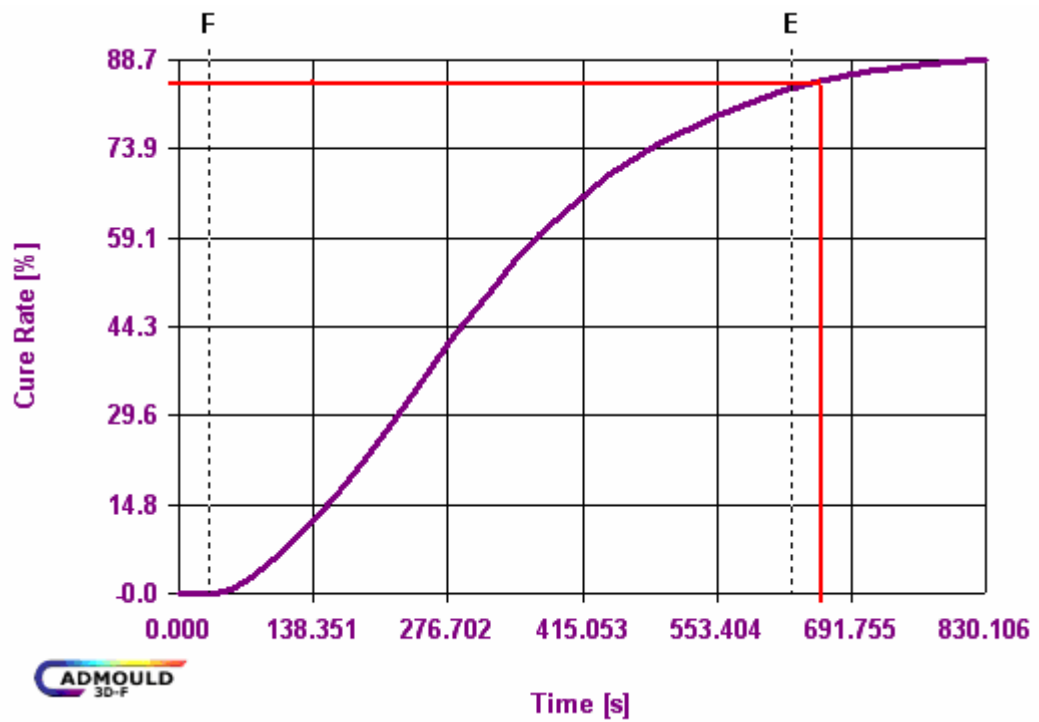


Obr. 44. Dlouhý, kruhový kanál

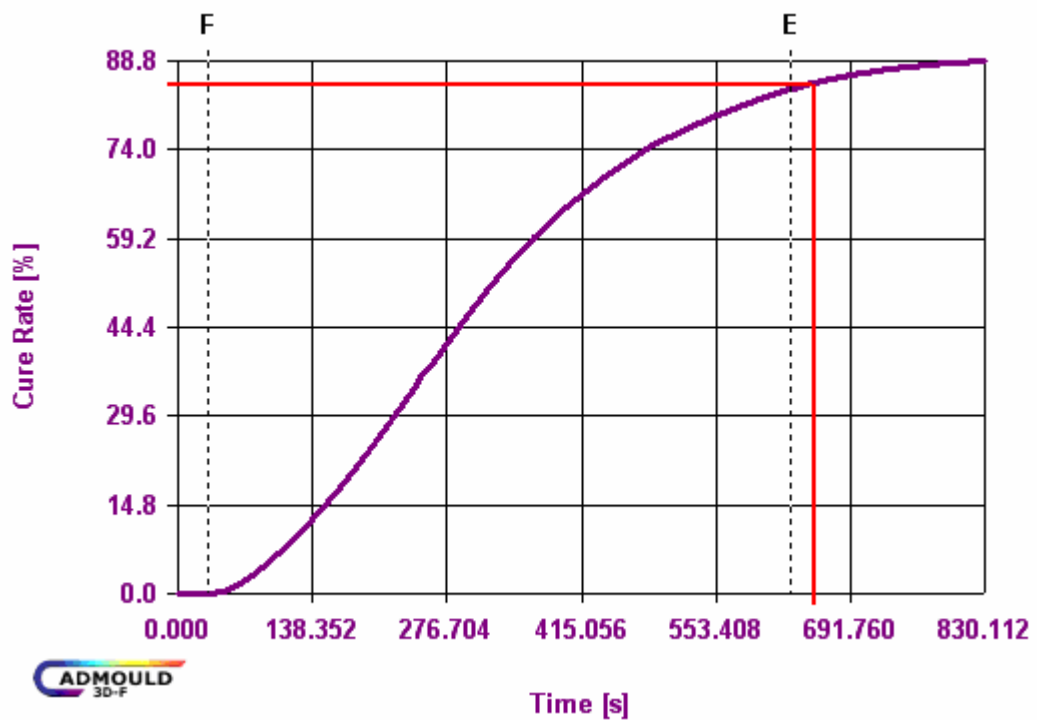


Obr. 45. Umístění senzorů u trajektorie 2

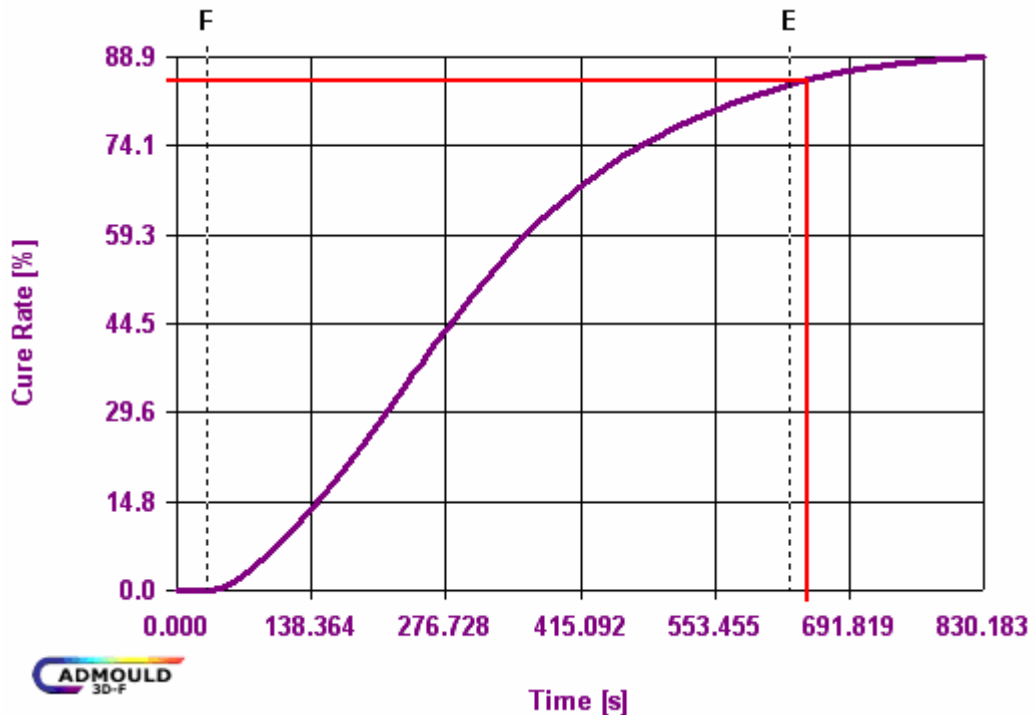
Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (EPDM) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 46. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\varnothing D = 6$ mm, materiál EPDM



Obr. 47. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\varnothing D = 4$ mm, materiál EPDM



Obr. 48. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\varnothing D = 2$ mm, materiál EPDM

Tabulka 9 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci je zapsán čas, který ukazuje dobu 85% vulkanizace.

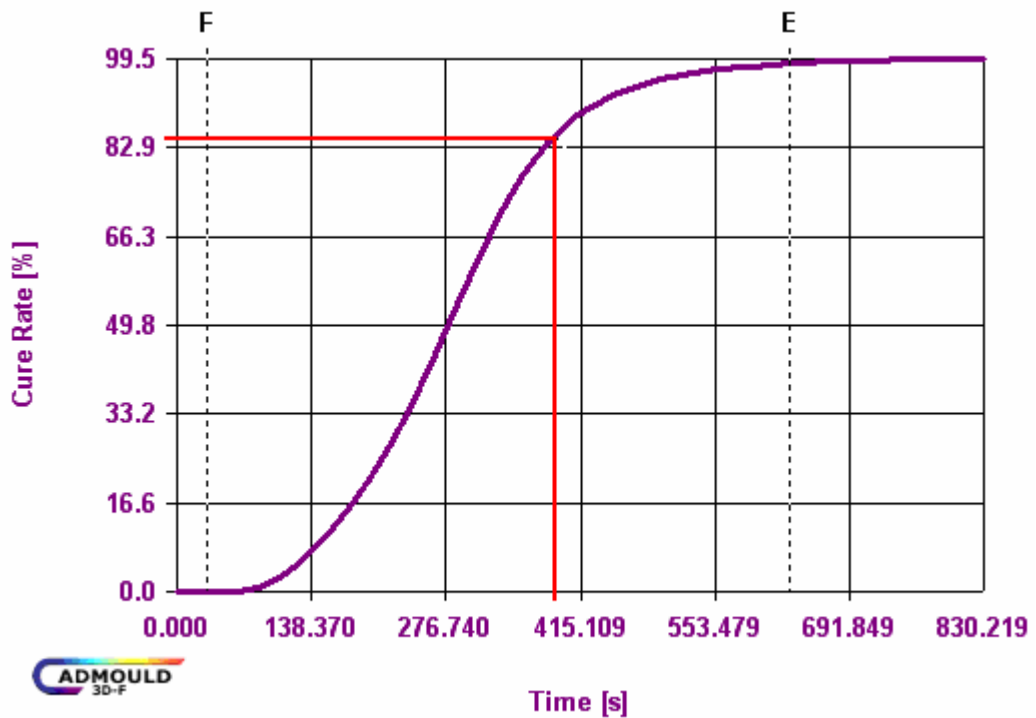
Tab. 9. Výsledky analýzy trajektorie 2, materiál EPDM

| $\varnothing D$ [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 6 | 116 | 120,9 | 121 | 38,4 | 658 |
| 4 | 115,7 | 120 | 120 | 41,2 | 655 |
| 2 | 117,1 | 124,6 | 124,7 | 37 | 646 |

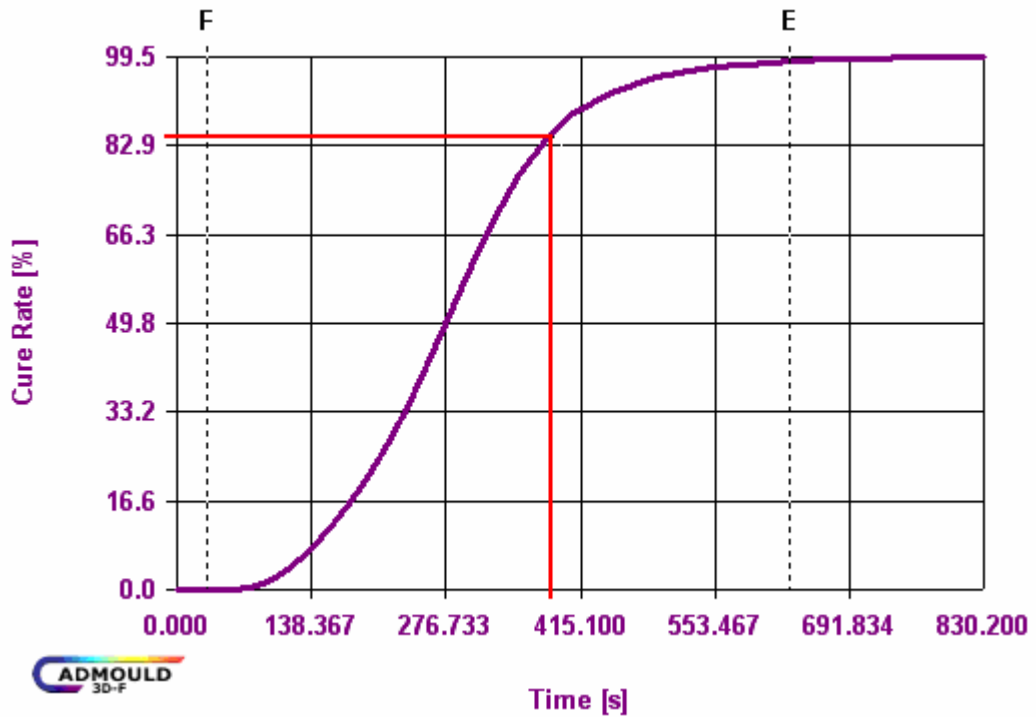
Snížením průměru z 6 mm na 2 mm teplota taveniny na konci rozvodného kanálu vzrostla o 3,7°C pro materiál EPDM. Tento nárůst je vyšší než u trajektorie 1. Teplota taveniny roste, poněvadž získává teplo od stěny formy, která je vyhřátá na 160°C a částečně disipací. Tato trajektorie je delší o 50 mm, tudíž tavenina je ohřívána na větší délce, proto je rozdíl o tolik větší. Čas potřebný na 85% klesl o 12 s. Pokud je porovnán střední průměr ($\varnothing D = 4$) pro trajektorii 1 a trajektorii 2 pro materiál EPDM, lze vidět z výsledků, že teplota taveniny u trajektorie 2 je větší o 1,9°C a čas potřebný k 85% vulkanizace klesl dokonce o 15 s. A

pokud je srovnán nejhorší výsledek u trajektorie 1 ($\varnothing D= 6$) a nejlepší výsledek z trajektorie 2 ($\varnothing D= 2$) nárůst teploty dosáhl $7,7^{\circ}\text{C}$ a to způsobilo úbytek času o 26s.

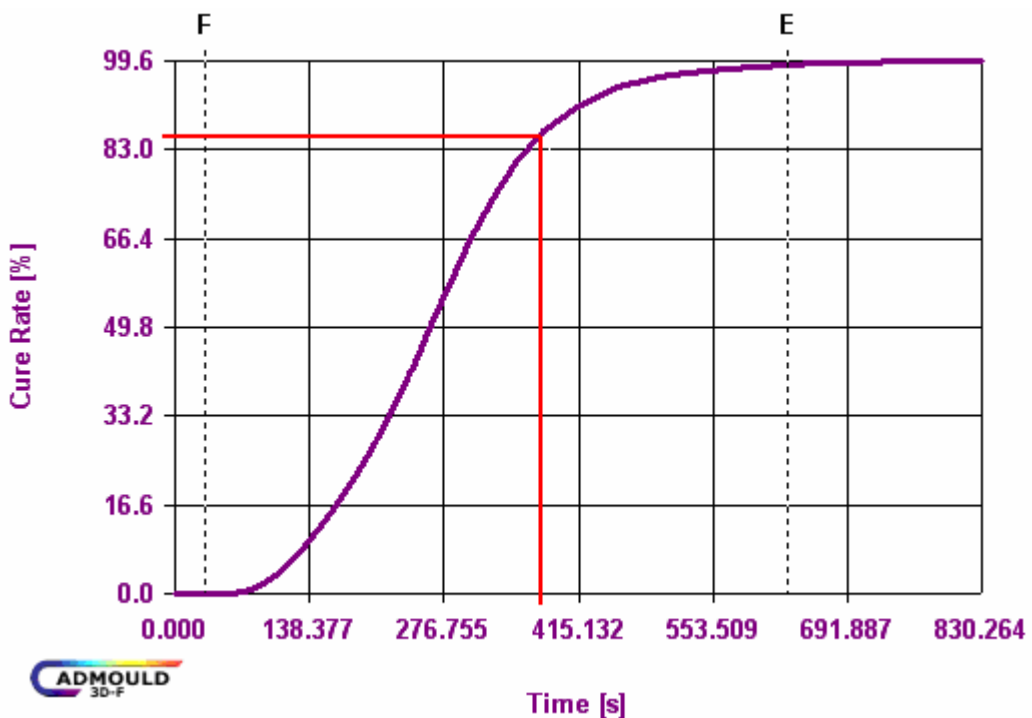
Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (NBR) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 49. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\varnothing D = 6$ mm, materiál NBR



Obr. 50. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\varnothing D = 4$ mm, materiál NBR



Obr. 51. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\varnothing D = 2$ mm, materiál NBR

Tabulka 10 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje čas 85% vulkanizace.

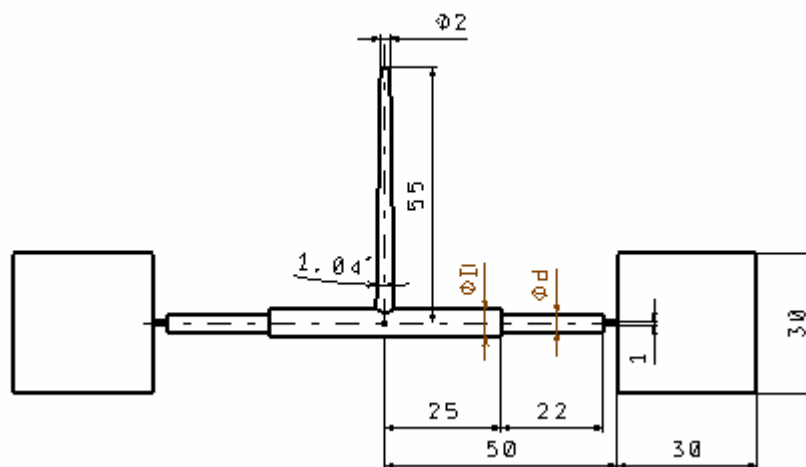
Tab. 10. Výsledky analýzy trajektorie 2, materiál NBR

| Ø D [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|----------|----------------|----------------|----------------|------------|------------------------|
| 6 | 113,4 | 121 | 121,1 | 120,9 | 387 |
| 4 | 114,4 | 122,5 | 122,1 | 47,2 | 385 |
| 2 | 116,1 | 127,8 | 127,6 | 38,3 | 372 |

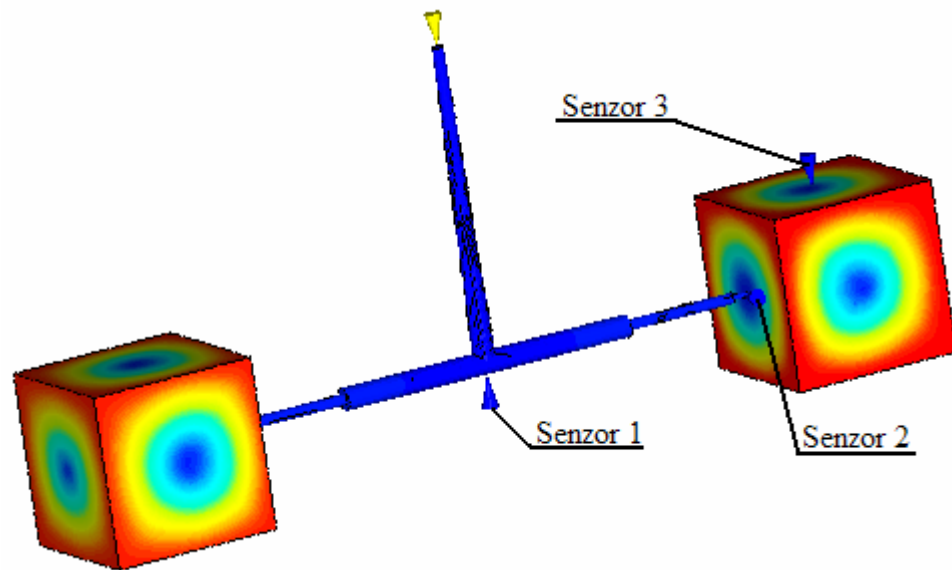
Jako u materiálu EPDM i u materiálu NBR je nárůst teploty u druhé trajektorie vyšší než u první. Snížením průměru z 6 mm na 2 mm u trajektorie 2 pro materiál NBR bylo dosaženo nárůstu teploty o 6,8°C. Čas vulkanizace klesl o 15 s. Pokud je opět porovnán nejhorší výsledek u trajektorie 1 (Ø D= 6) a nejlepší výsledek u trajektorie 2 (Ø D= 2), jako tomu bylo pro materiál EPDM, je rozdíl teplot u NBR 10,3°C a čas potřebný k 85% vulkanizace je 28s. Pro EPDM byl rozdíl teplot 7,7°C (o 2,6°C nižší než pro NBR) a čas 85% vulkanizace byl 26 s (o 2 s nižší než pro NBR). Výsledek rozdílů teplot a doby vulkanizace ukazuje lepší výsledky pro materiál NBR pro nastavené parametry.

9.2.3 Trajektorie 3

Jedná se o odstupňovaný kruhový průřez kanálu o celkové délce 47 mm. Analýza byla počítána pro Ø D = (8,6,4) mm o délce 25 mm a Ø d byl zmenšen o dva milimetry na Ø d = (6,4,2) mm o délce 22 mm. Vtokové ústí bylo vytvořeno zúžením průměru na 1 mm o délce 3 mm.

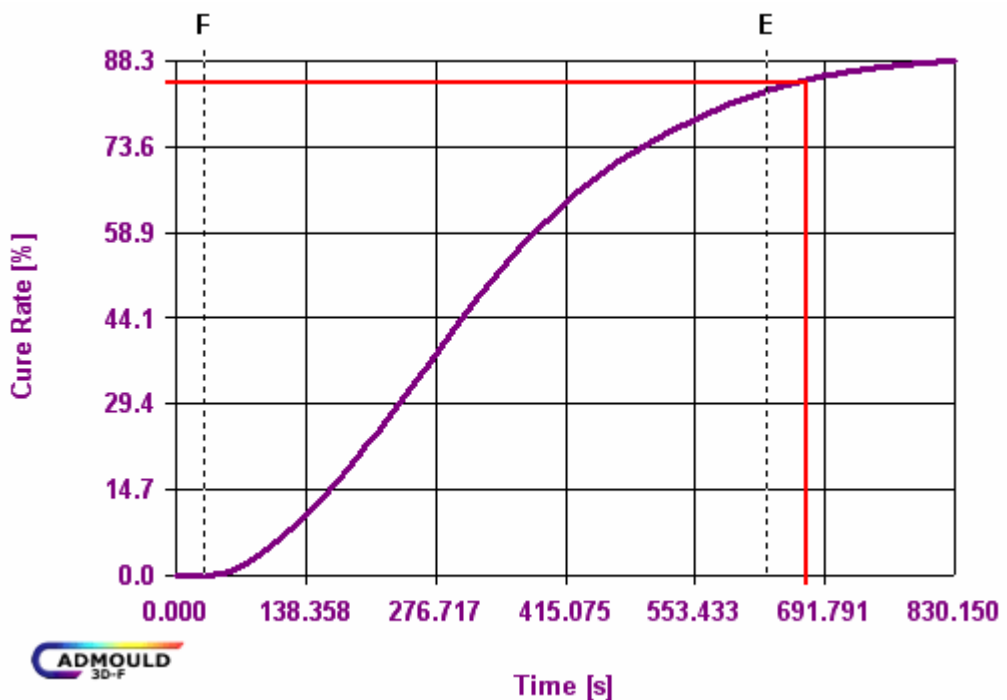


Obr. 52. Krátký, odstupňovaný, kruhový kanál

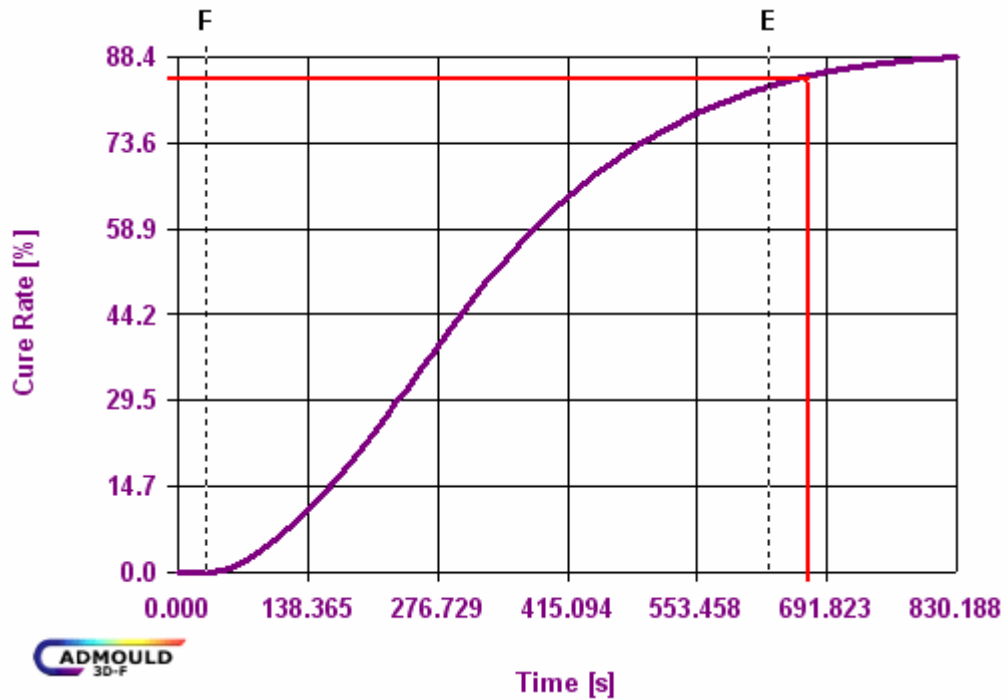


Obr. 53. Umístění senzorů u trajektorie 3

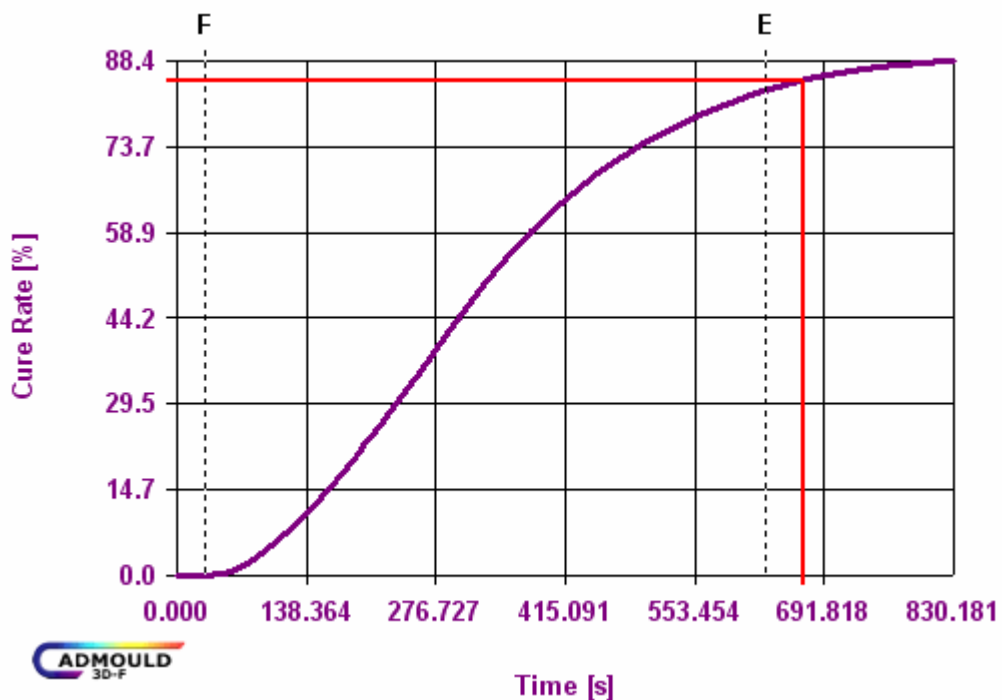
Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (EPDM) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 54. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\varnothing D = 8 \text{ mm}$, $\varnothing d = 6 \text{ mm}$, materiál EPDM



Obr. 55. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\varnothing D = 6 \text{ mm}$, $\varnothing d = 4 \text{ mm}$, materiál EPDM



Obr. 56. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\varnothing D = 4 \text{ mm}$, $\varnothing d = 2 \text{ mm}$, materiál EPDM

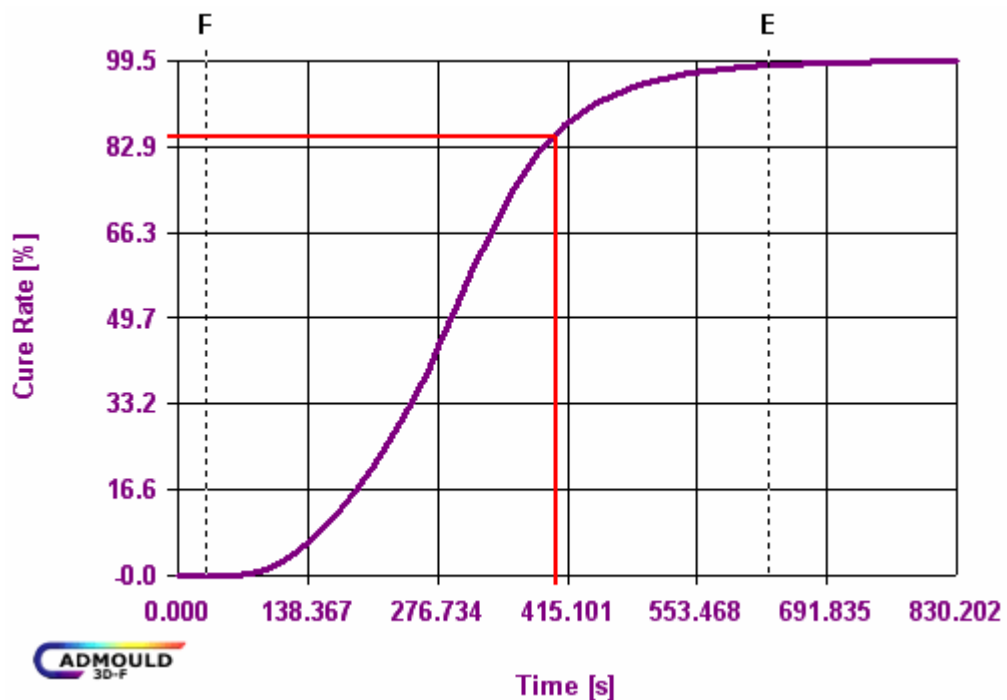
Tabulka 11 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

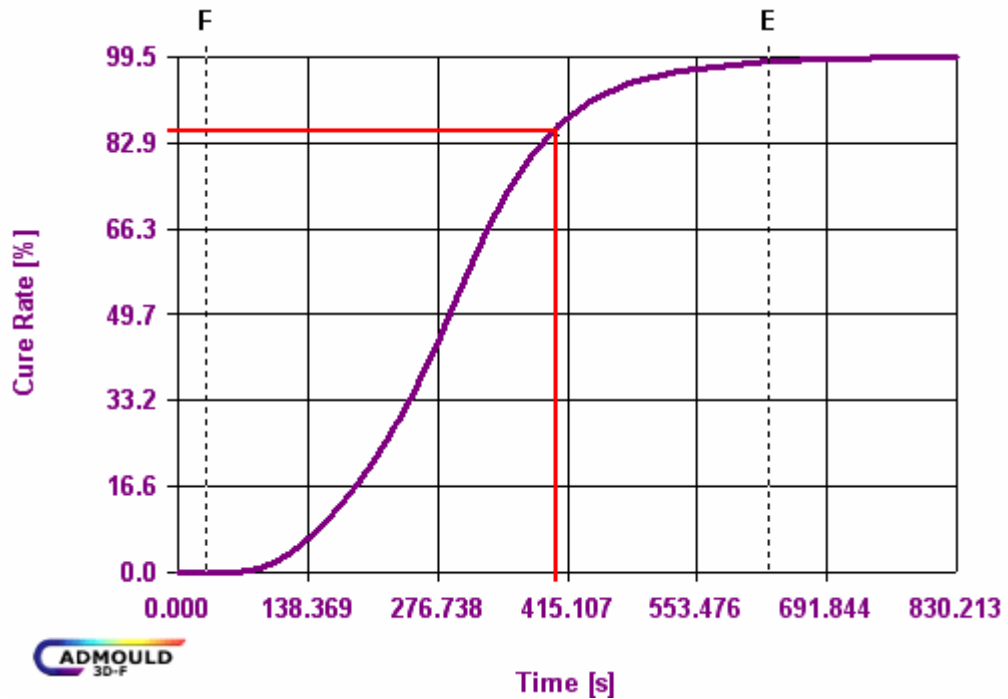
Tab. 11. Výsledky analýzy trajektorie 3, materiál EPDM

| ØD , Ød [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|--------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------------------|
| 8, 6 | 119 | 117 | 116,8 | 30 | 672 |
| 6, 4 | 118,3 | 117 | 117,1 | 28 | 671 |
| 4, 2 | 117,2 | 118,7 | 118,9 | 29,9 | 670 |

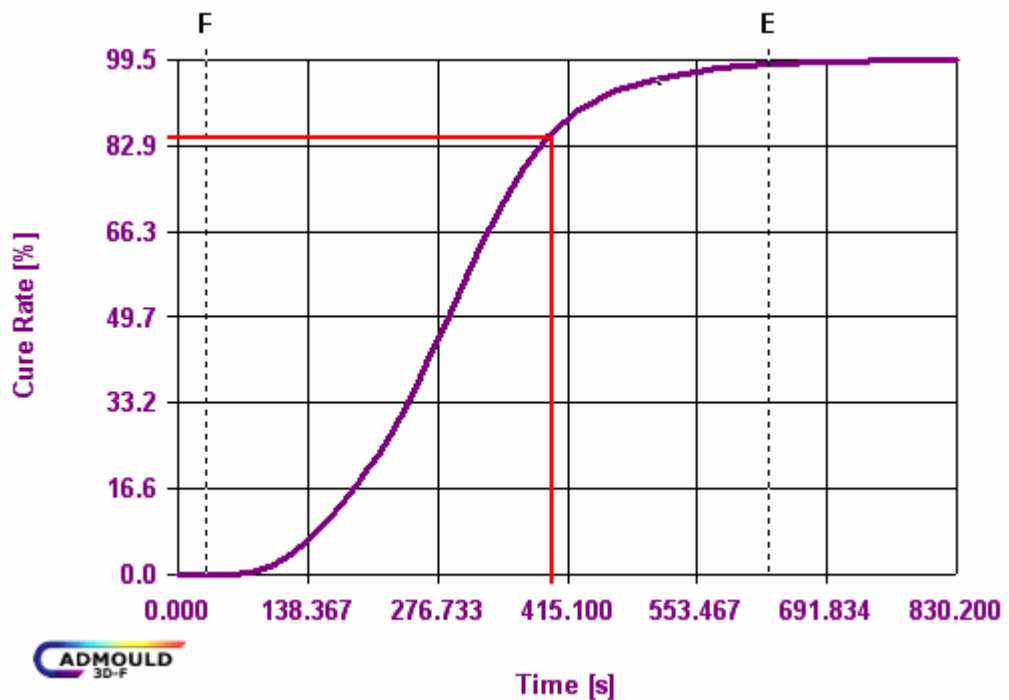
Zúžením průměrů má teplota opět tendenci růst, stejně jako u trajektorií s rovným, kruhovým kanálem. Pokud je srovnávána trajektorie 1 a trajektorie 3 pro materiál EPDM u stejných hodnot $\varnothing D$, tak rozdíl teplot není tak patrný (pouze desetiny stupně), zmenšení průměru o 2 mm na délce 22 mm má zanedbatelný význam. U trajektorie 3 pro materiál EPDM je nárůst teploty pouze o 1,7°C a rozdíl času 85% vulkanizace je jen 2 s.

Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (NBR) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.

Obr. 57. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\varnothing D = 8 \text{ mm}$, $\varnothing d = 6 \text{ mm}$, materiál NBR



Obr. 58. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 4 \text{ mm}$, materiál NBR



Obr. 59. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 4 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 2 \text{ mm}$, materiál NBR

Tabulka 12 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

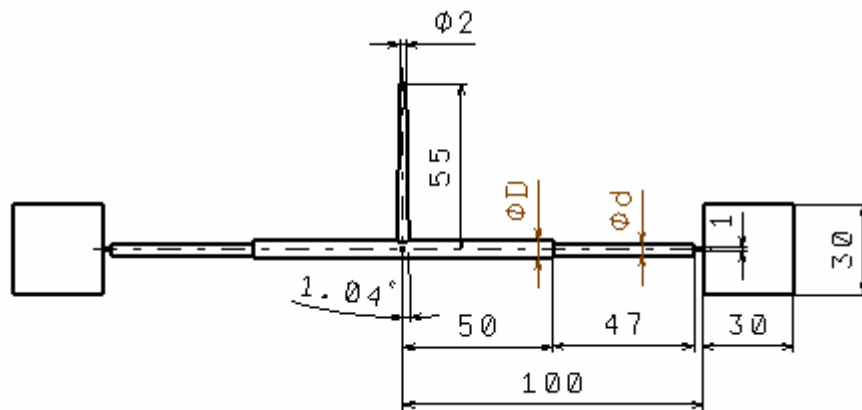
Tab. 12. Výsledky analýzy trajektorie 3, materiál NBR

| ØD , Ød [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|--------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------------------|
| 8,6 | 113,2 | 118 | 118 | 44 | 402 |
| 6,4 | 112,6 | 117,8 | 117,8 | 41,4 | 399 |
| 4,2 | 113,9 | 120,3 | 120,4 | 44 | 397 |

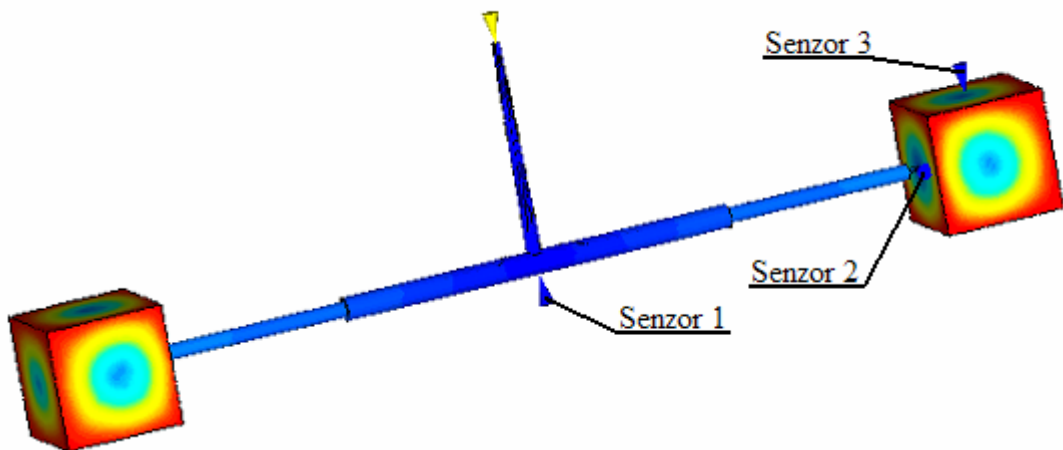
Jako pro každou předchozí trajektorii i pro tuto materiál NBR ukazuje lepší výsledky než materiál EPDM pro zadané parametry. Zvýšením teploty u senzoru 2 o 2,3°C klesl čas potřebný na 85% vulkanizace z 402 s na 397 s, tedy o 5s. Jak lze vidět i z těchto výsledků, krátká geometrie má vždy horší vliv na nárůst teploty oproti delším geometriím.

9.2.4 Trajektorie 4

Jedná se o odstupňovaný kruhový průřez kanálu o celkové délce 97 mm. Analýza byla počítána pro $\text{Ø D} = (8,6,4)$ mm o délce 50 mm a Ø d byl zmenšen o dva milimetry na $\text{Ø d} = (6,4,2)$ mm o délce 47 mm. Vtokové ústí bylo vytvořeno zúžením průměru na 1 mm o délce 3 mm.

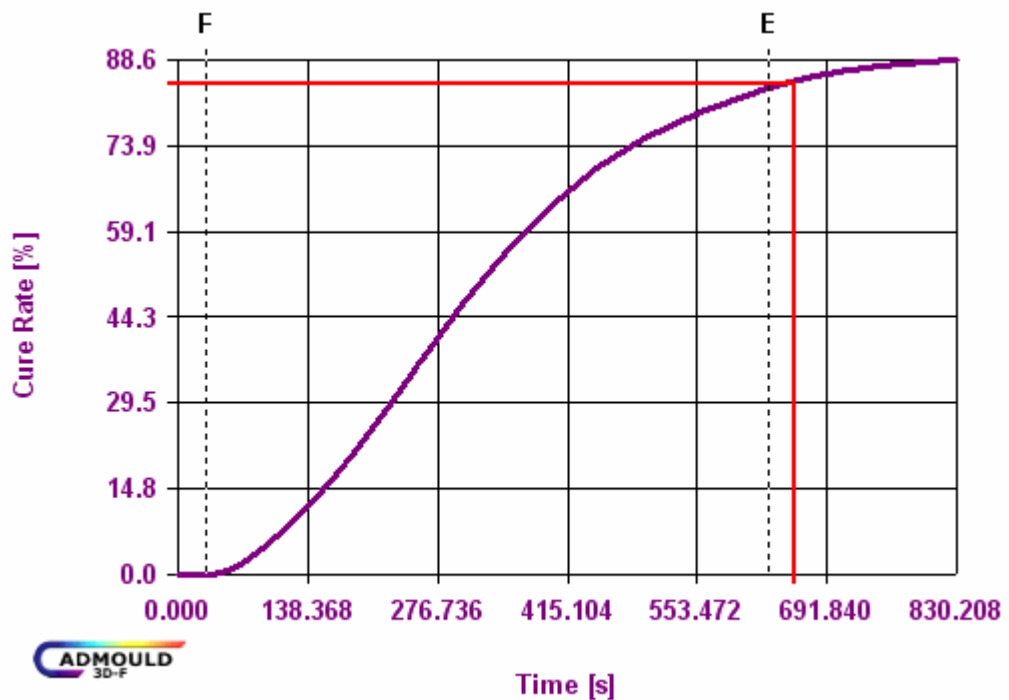


Obr. 60. Dlouhý, odstupňovaný, kruhový kanál

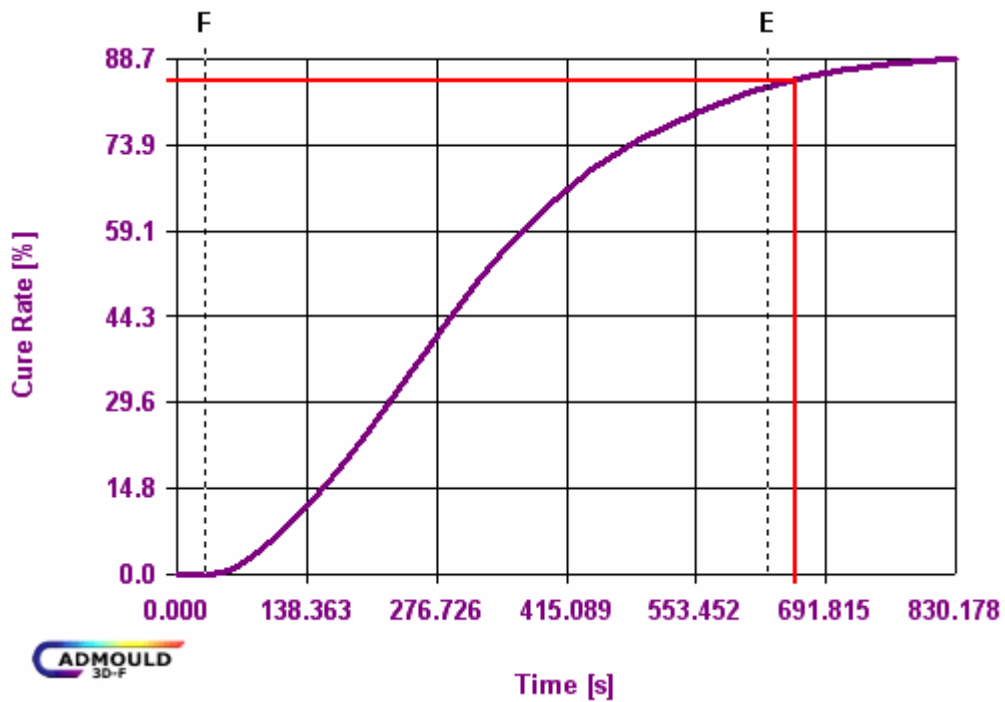


Obr. 61. Umístění senzorů u trajektorie 4

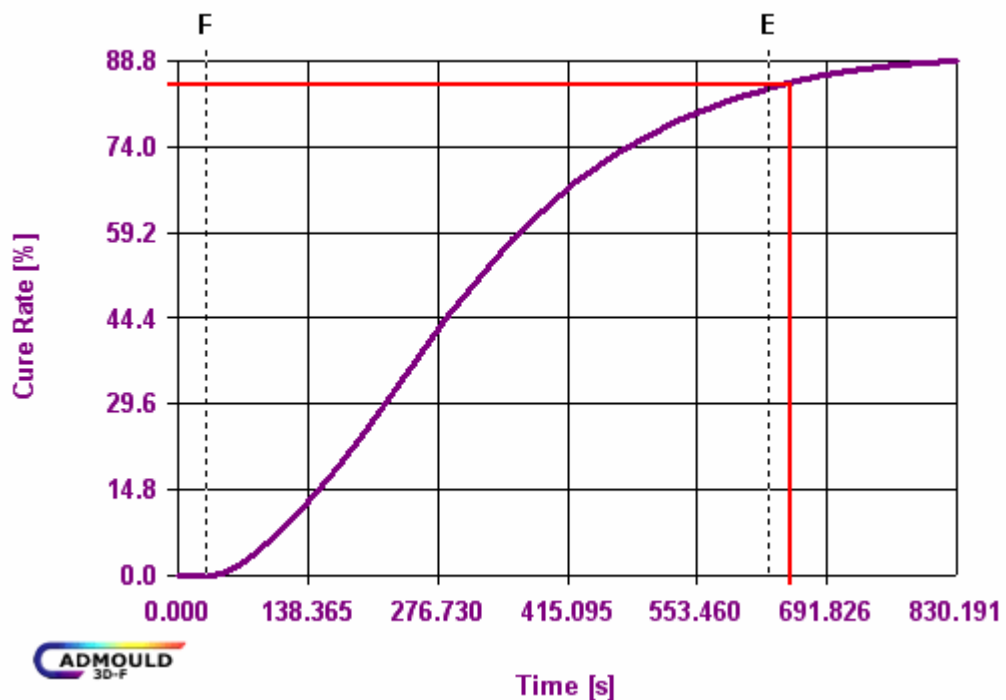
Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (EPDM) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 62. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\varnothing D = 8 \text{ mm}$, $\varnothing d = 6 \text{ mm}$ materiál EPDM



Obr. 63. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\varnothing D=6\text{ mm}$, $\varnothing d=4\text{ mm}$, materiál EPDM



Obr. 64. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\varnothing D=4\text{ mm}$, $\varnothing d=2\text{ mm}$, materiál EPDM

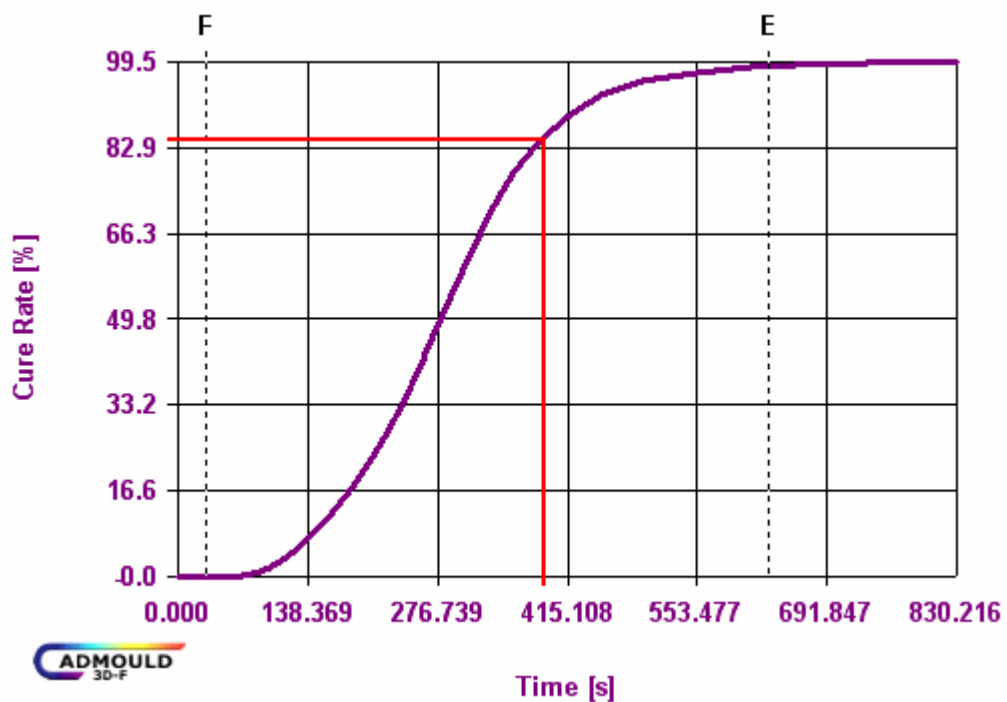
Tabulka 13 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

Tab. 13. Výsledky analýzy trajektorie 4, materiál EPDM

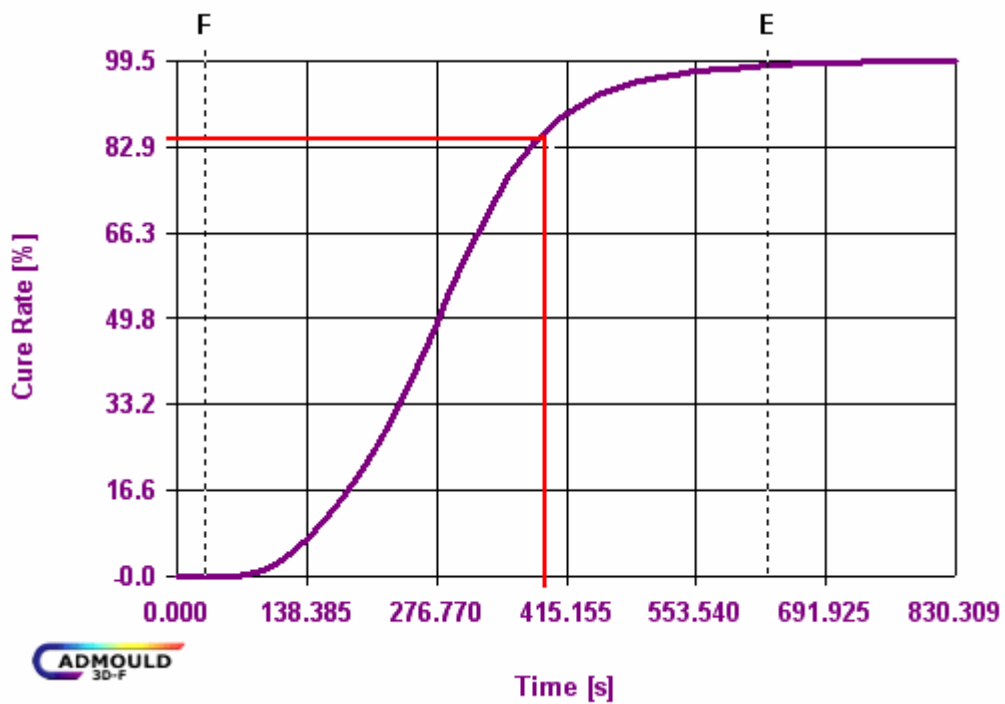
| ØD , Ød [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|--------------|----------------|----------------|----------------|------------|------------------------|
| 8, 6 | 116,4 | 120 | 119,6 | 38,4 | 657 |
| 6, 4 | 115,1 | 121,3 | 120,7 | 36,8 | 656 |
| 4, 2 | 118,3 | 123,6 | 123,7 | 31,2 | 648 |

Trajektorie 4 je delší oproti trajektorii 3 o 50 mm a proto zobrazuje i lepší výsledky. Pro srovnání je brán nejhorší výsledek z trajektorie 3 a nejlepší výsledek z trajektorie 4. Teplota vzrostla ze 117°C na 123,6°C, rozdíl je tedy 6,6 °C a čas 86% vulkanizace klesl ze 672 s na 648 s, zde je rozdíl 24 s pro materiál EPDM. Tento rozdíl hodnot je menší než mezi trajektoriami 1 a 2.

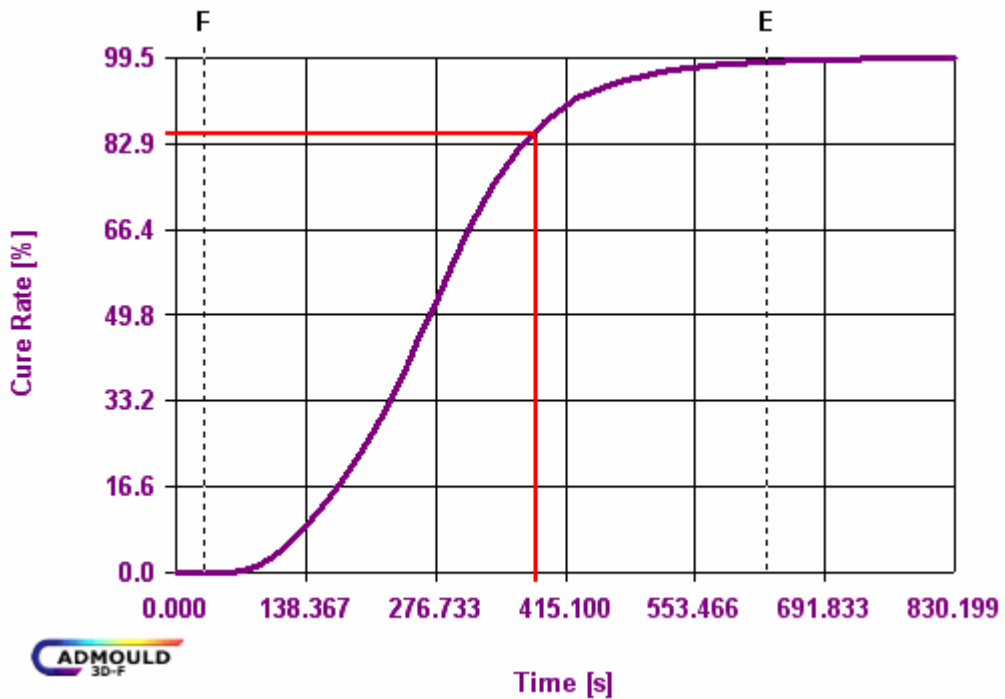
Nanásledujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (NBR) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 65. Průběh vulkanizace trajektorie 4, ØD= 8 mm, Ød= 6 mm, materiál NBR



Obr. 66. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\text{ØD}=6\text{ mm}$, $\text{Ød}=4\text{ mm}$, materiál NBR



Obr. 67. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\text{ØD}=4\text{ mm}$, $\text{Ød}=2\text{ mm}$, materiál NBR

Tabulka 14 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2.

V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

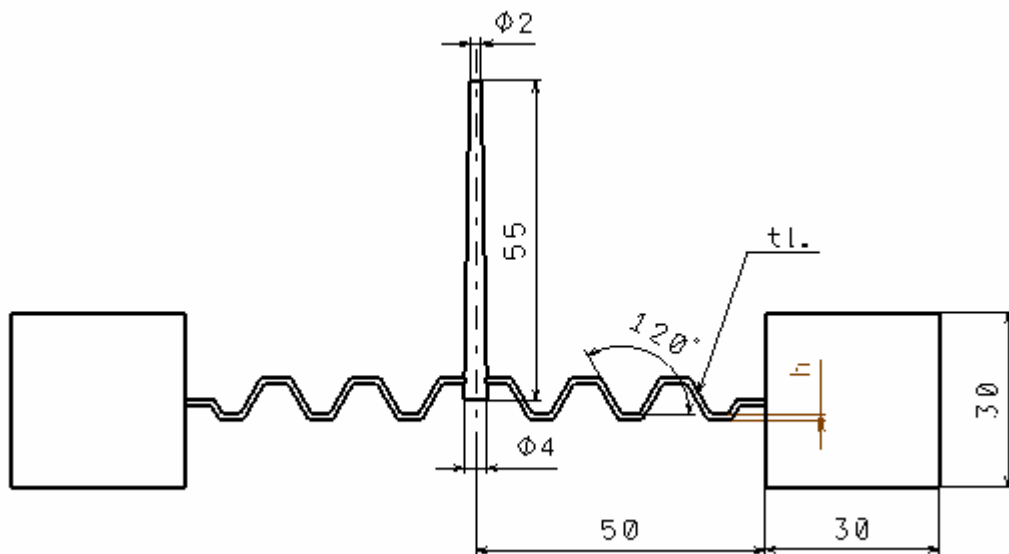
Tab. 14. Výsledky analýzy trajektorie 4, materiál NBR

| ØD , Ød [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 8, 6 | 112,7 | 121,1 | 120,3 | 46,9 | 388 |
| 6, 4 | 113,5 | 121,7 | 121,1 | 40,3 | 387 |
| 4, 2 | 114,8 | 126 | 125,6 | 49,5 | 379 |

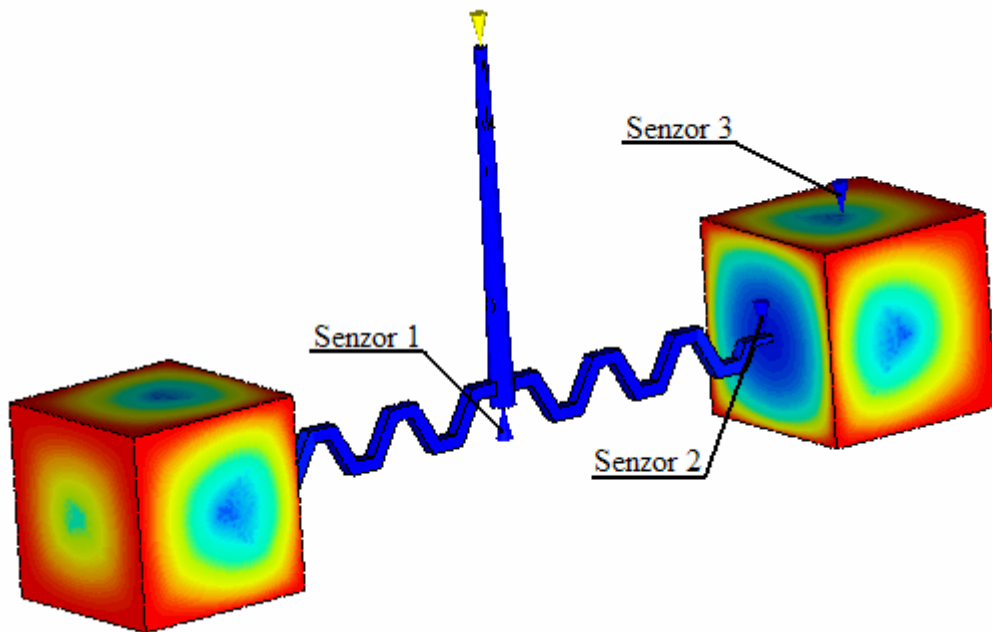
U tohoto případu průběh teplot má rostoucí tendenci a čas vulkanizace opět klesající, stejně jako tomu bylo u předešlých trajektorií. Materiál se ohřál v nejlepším případě ($\varnothing D = 4$ mm a $\varnothing d = 2$ mm) ze vstřikovací teploty 100°C na 126°C , čas potřebný na 85% vulkanizace je pro tuto trajektorii 379 s.

9.2.5 Trajektorie 5

Jedná se o čtvercový průřez kanálu o celkové délce 50 mm. Analýza byla počítána pro tloušťku (4,2,1) mm a výšky $h = (4,2,1)$ mm. Vtokové ústí bylo vytvořeno pouze zúžením výšky h vždy na 1 mm.

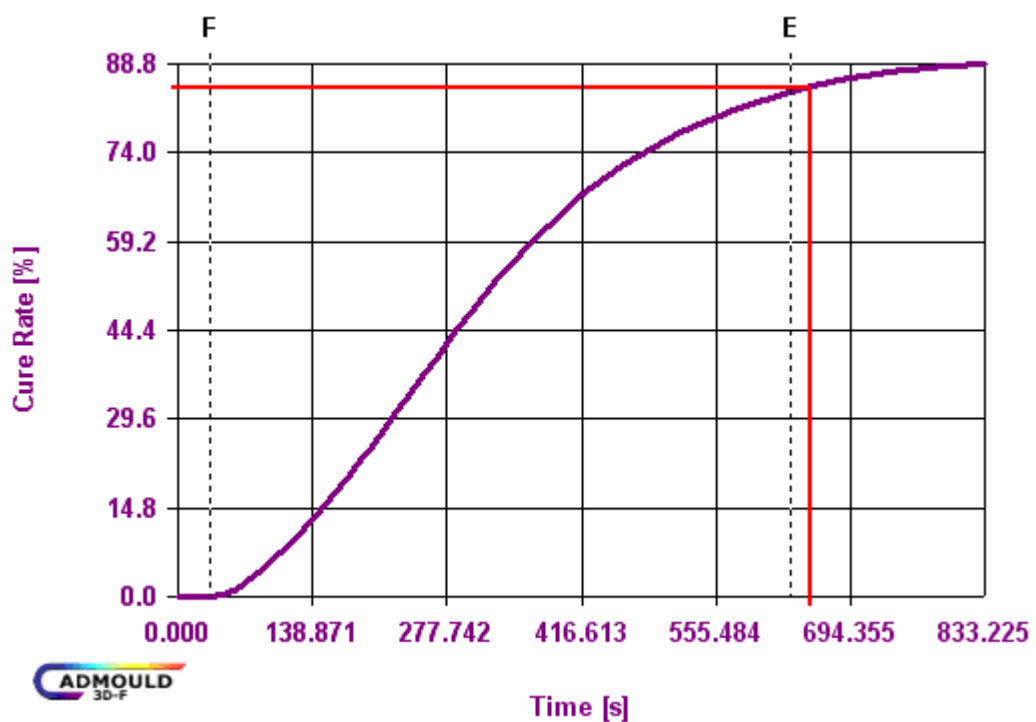


Obr. 68. Krátký, čtvercový kanál

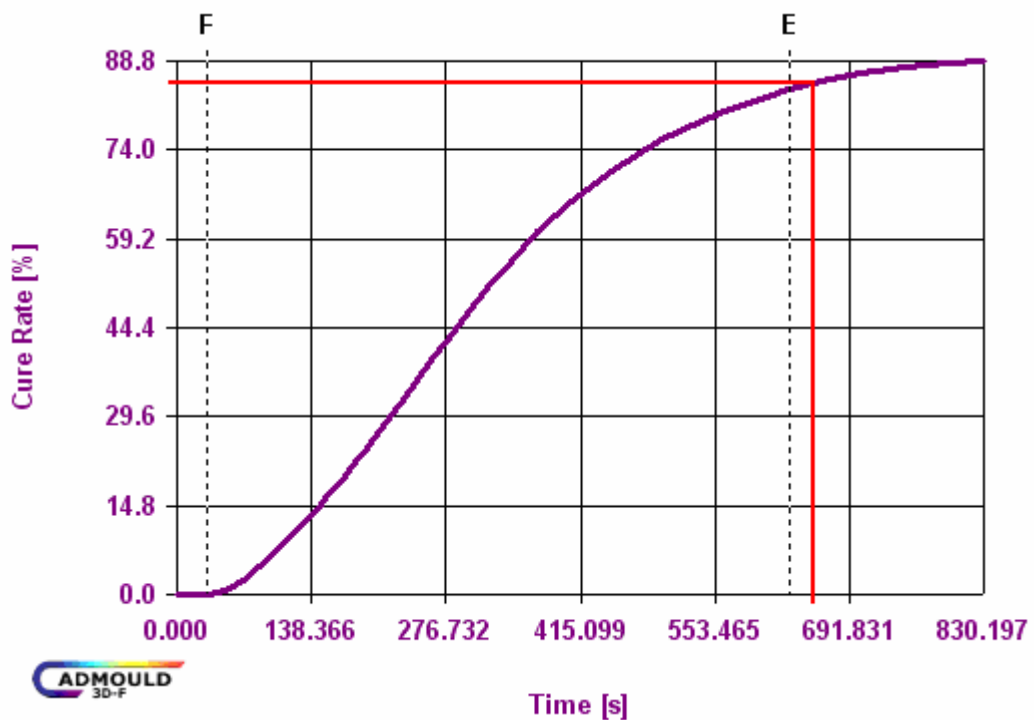


Obr. 69. Umístění senzorů u trajektorie 5

Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (EPDM) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 70. Průběh vulkanizace trajektorie 5, $tl. = 4 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, materiál EPDM



Obr. 71. Průběh vulkanizace trajektorie 5, tl. = 2 mm, h = 2 mm, materiál EPDM

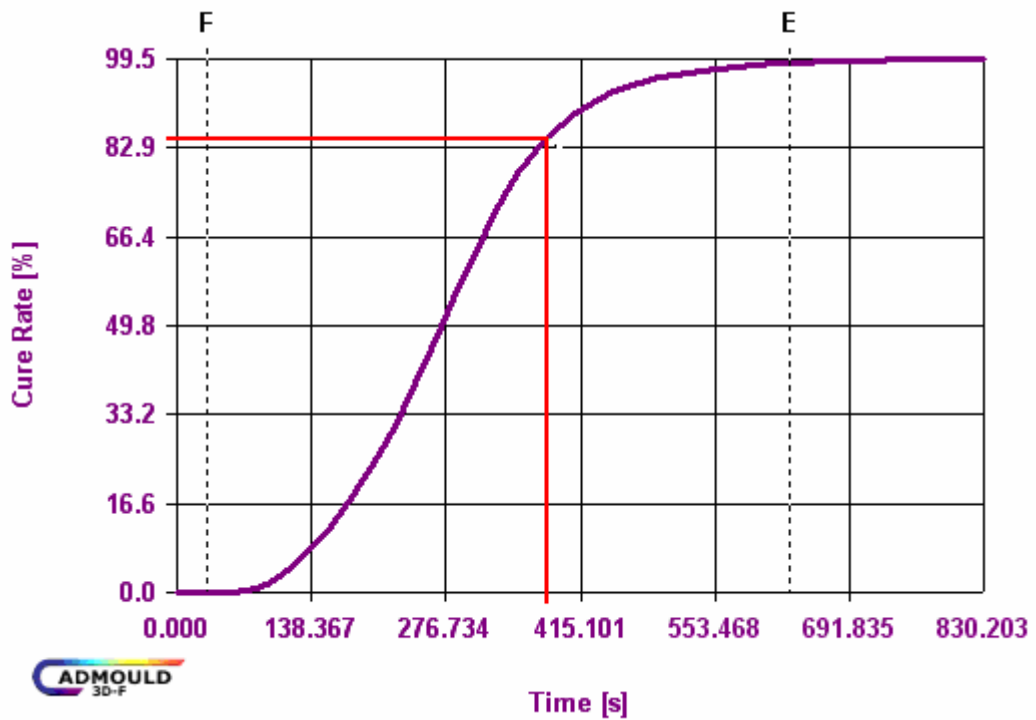
Tabulka 15 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

Tab. 15. Výsledky analýzy trajektorie 5, materiál EPDM

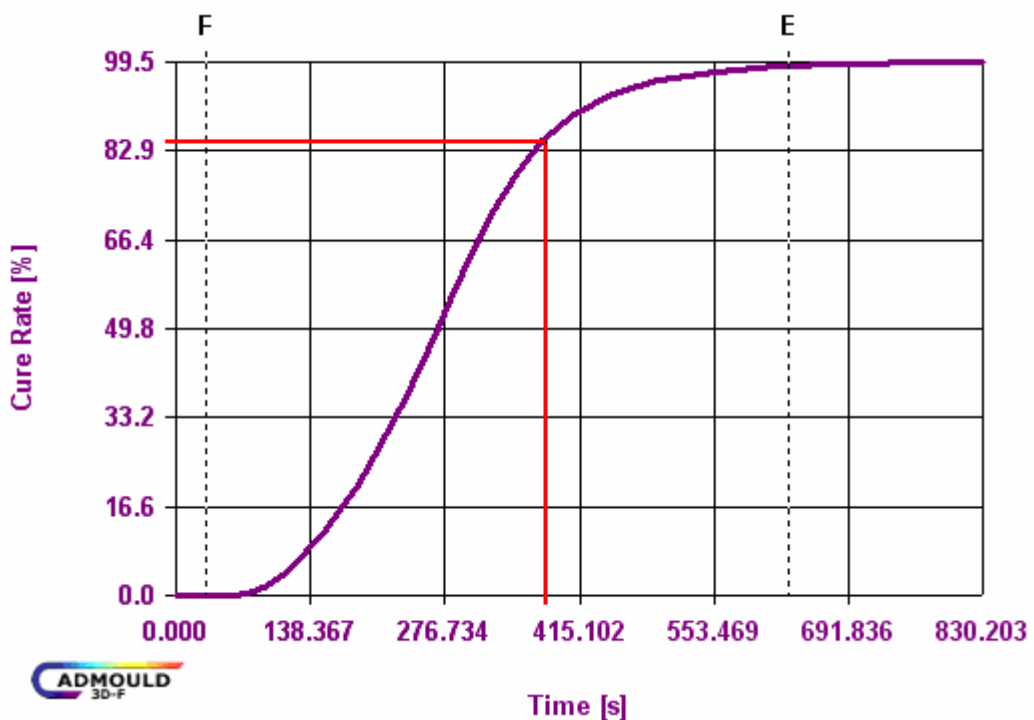
| tl., h [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 4x4 | 142 | 124,1 | 123,4 | 89,9 | 651 |
| 2x2 | 152,7 | 123,9 | 123,9 | 23 | 652 |

Trajektorie 5 a 6 se od ostatních zásadně liší. Jedná se o čtvercový průřez a navíc tento kanál není přímý, jako tomu bylo doposud. Tím může být způsobena nepřesnost výsledků. Teplota u trajektorie 5 pro materiál EPDM klesla o 0°C a čas vulkanizace vzrostl o 1 s. Tyto výsledky se nejeví být tak pozitivní, proto u návrhu vstříkovací formy pro tento materiál by bylo lepší vybrat jinou z předešlých trajektorií.

Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (NBR) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 72. Průběh vulkanizace trajektorie 5, tl.= 4 mm, h= 4 mm, materiál NBR



Obr. 73. Průběh vulkanizace trajektorie 5, tl.= 2 mm, h= 2 mm, materiál NBR

Tabulka 16 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2.

V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

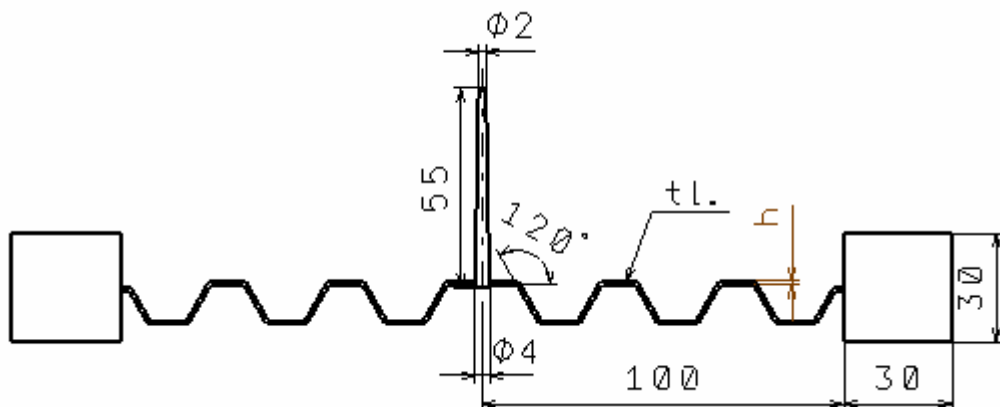
Tab. 16. Výsledky analýzy trajektorie 5, materiál NBR

| tl., h [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 4x4 | 122,7 | 123,1 | 122,7 | 26,9 | 381 |
| 2x2 | 117,1 | 125,1 | 125,4 | 35,9 | 378 |

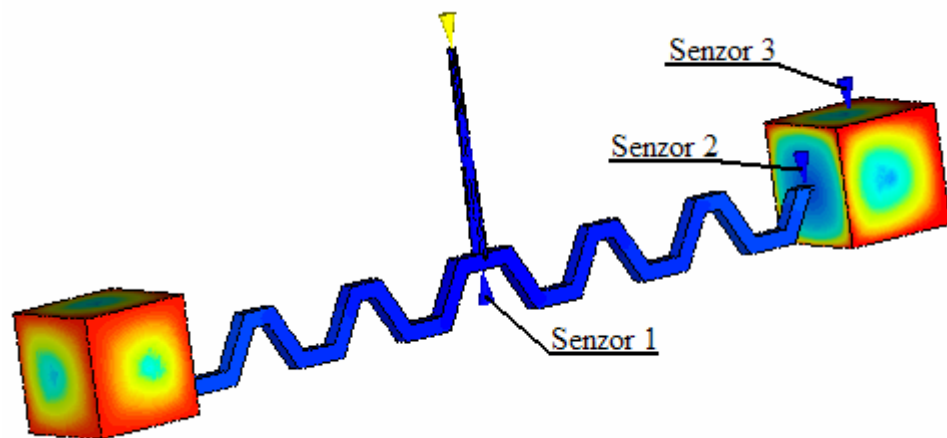
Jak pro materiál EPDM, tak i pro materiál NBR nejsou výsledky u trajektorie 5 nijak významné, teplota sice vzroste o 2°C a čas 85% vulkanizace klesne z 381s na 378s, tedy o 3 s, ale takových výsledků může být dosaženo u kruhových průřezů. U výběru typu trajektorie rozvodových kanálů a u návrhu vstřikovací formy bude dále rozhodovat nákladnost jejich výroby a také snadnost vyhození výstřiku.

9.2.6 Trajektorie 6

Jedná se o čtvercový průřez kanálu o celkové délce 100 mm. Analýza byla počítána pro tloušťky (4,2,1) mm a výšky $h = (4,2,1)$ mm. Vtokové ústí bylo vytvořeno pouze zúžením výšky h vždy na 1 mm.

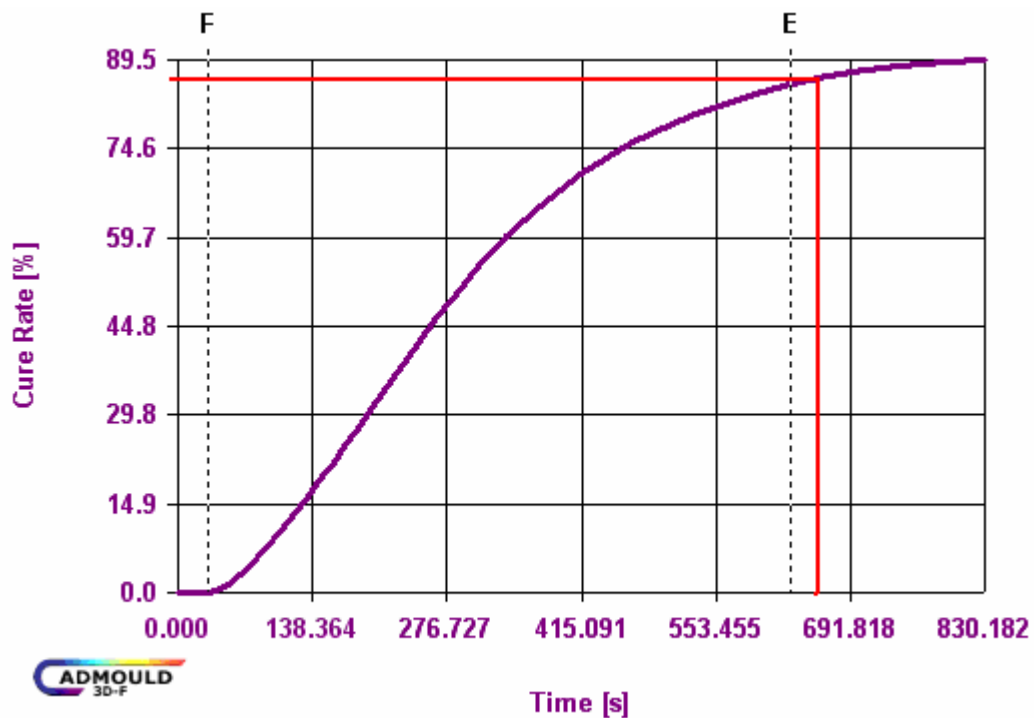


Obr. 74. Dlouhý, čtvercový kanál

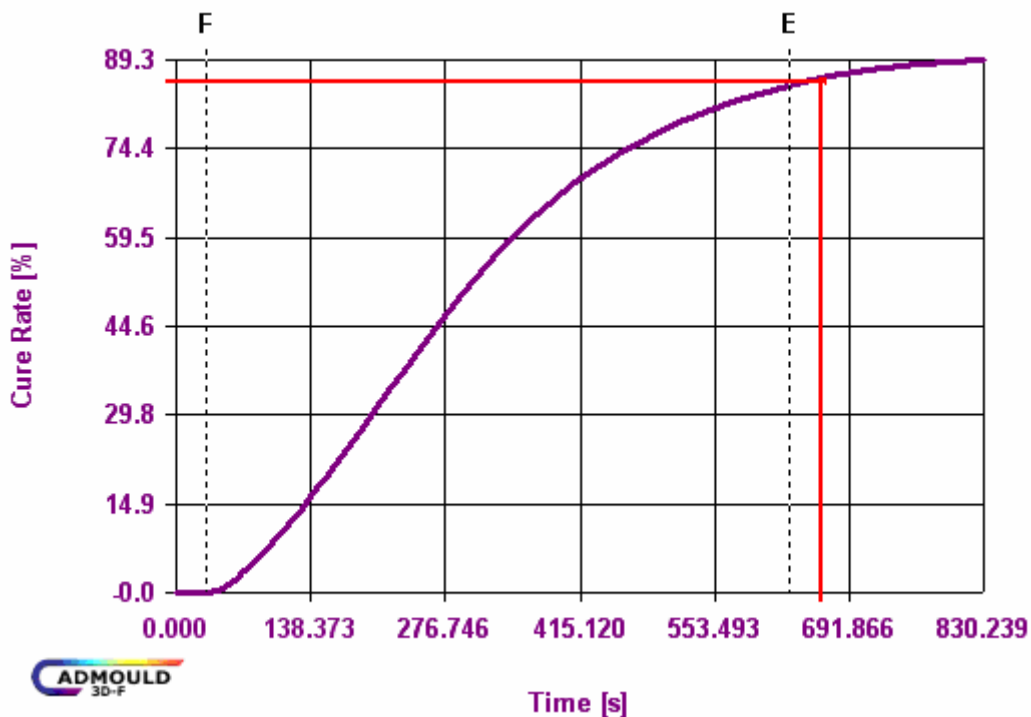


Obr. 75. Umístění senzorů u trajektorie 6

Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (EPDM) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 76. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl.= 4 mm, h= 4 mm, materiál EPDM



Obr. 77. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl. = 2 mm, h = 2 mm, materiál EPDM

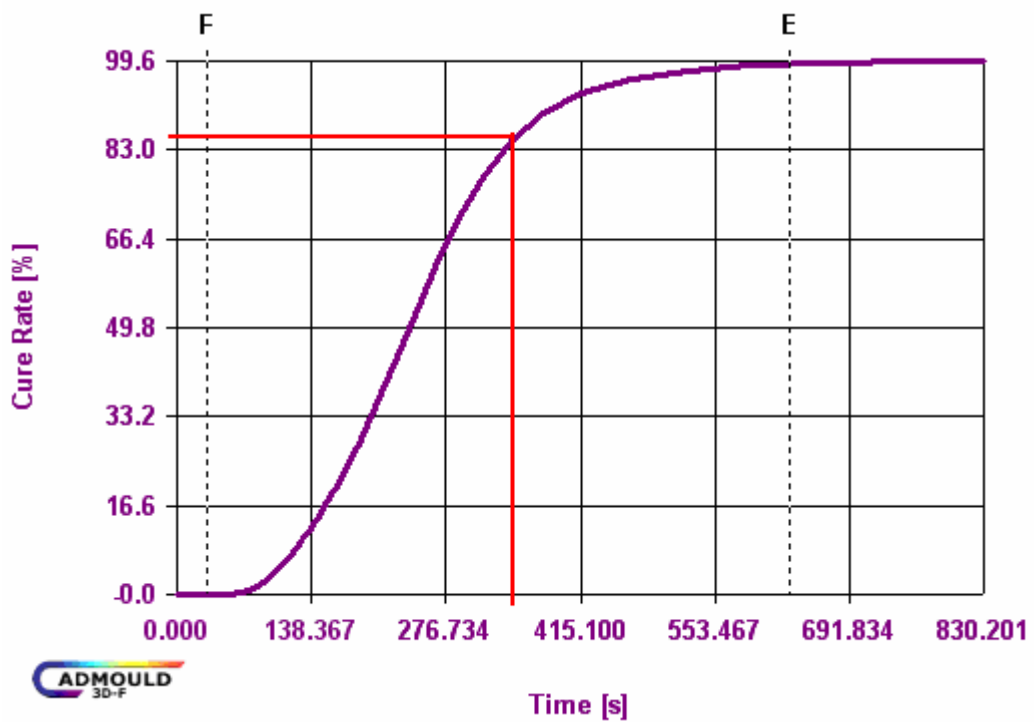
Tabulka 17 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2. V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

Tab. 17. Výsledky analýzy trajektorie 6, materiál EPDM

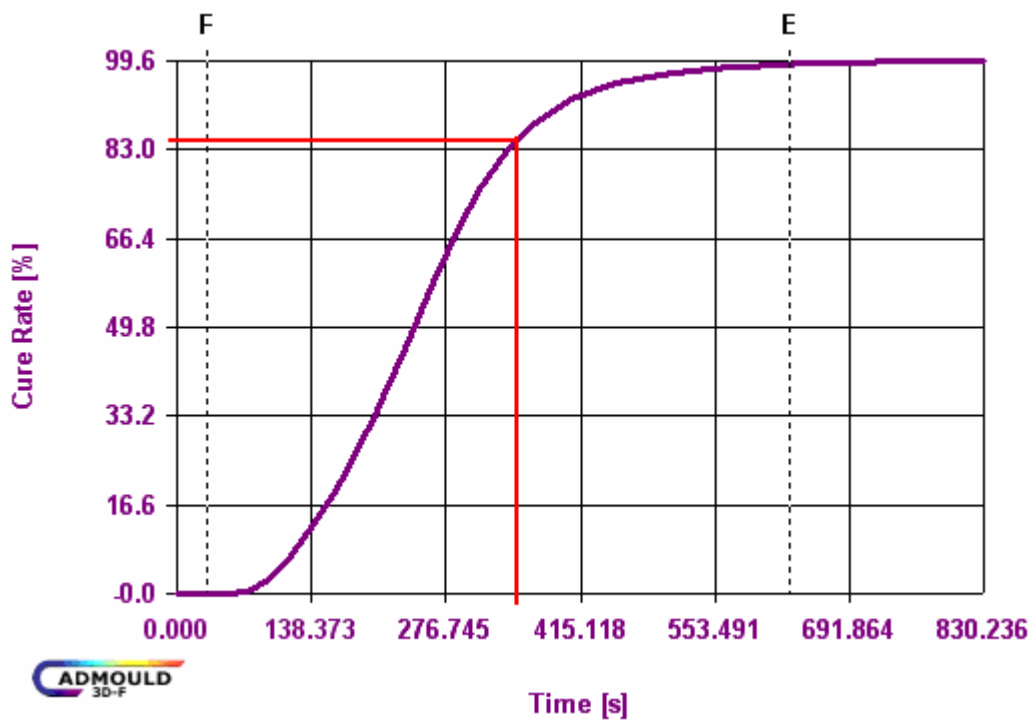
| tl., h [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 4x4 | 114,6 | 131,8 | 131,9 | 19,4 | 622 |
| 2x2 | 113,5 | 129,6 | 129,6 | 32,5 | 630 |

Trajektorie 6 je velice extrémním případem. Nárůst teploty je zde vyšší než u minulých případů a doba vulkanizace zde výrazně klesla, ale také zde vzrostl o tlak.

Na následujících obrázcích je zobrazena rychlost vulkanizace v závislosti na čase pro danou úlohu. Červenou linkou je zvýrazněn čas, kdy v materiálu (NBR) bylo dosaženo 85% vulkanizace. Tyto grafické závislosti jsou získány ze senzoru 3.



Obr. 78. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl.= 4 mm, h= 4 mm, materiál NBR



Obr. 79. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl.= 2 mm, h= 2 mm, materiál NBR

Tabulka 18 obsahuje naměřená data z jednotlivých senzorů. Teplota 1 až 3 ukazuje změnu teploty při průchodu taveniny přes jednotlivé senzory. Tlak je zaznamenán ze senzoru 2.

V posledním sloupci tabulky je zapsán čas, který ukazuje dobu, kdy materiál dosáhne v dané úloze 85% vulkanizace.

Tab. 18. Výsledky analýzy trajektorie 6, materiál NBR

| tl., h [mm] | Teplota 1 [°C] | Teplota 2 [°C] | Teplota 3 [°C] | Tlak [MPa] | Čas 85%vulkanizace [s] |
|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------------------|
| 4x4 | 114,4 | 132,8 | 132,7 | 35,1 | 346 |
| 2x2 | 113,1 | 132,6 | 132,5 | 29,6 | 353 |

U posledního měření (trajektorie 6, materiál NBR) úloha vykazuje nepřesné výsledky (teplota klesá, čas vulkanizace roste). Trajektorie 6 by měla být přepočítána s jemnější sítí. Při tvorbě analýzy byla síť tvořena pro všechny trajektorie stejně.

DISKUZE VÝSLEDKU

První část praktické části diplomové práce sloužila k získání informací o zaběhlém procesu pro firmu Rubena a.s. Vstřikovací forma musela být několikrát upravována, měnilo se umístění vtoků a kanály pro odvodu vzduchu. Proto byla spočítána analýza a byl popsán proces vstřikování pro daný produkt. Z výsledků je zřejmé, že materiál zaplní celou dutinu formy, během plnění materiál nezačíná vulkanizovat, dokud není dutina zaplněna. Poté nastává fáze ohřevu, kdy se plastické vlastnosti materiálu postupně mění na elastické, nastává proces vulkanizace. Pro materiál změřený na RPA 2000 se doba i teplota ohřevu jeví jako dostačující. Během vulkanizace a následné dovulkanizace materiál zvulkanizuje (88,5 – 90,2) %. Procesní parametry se jeví být nastaveny v pořádku.

Provedená měření v druhé části ukázala, že kvalita povrchu dutiny vstřikovací formy nemá významný vliv na délku zatečení. Z dosud naměřených výsledků lze usoudit, že zaplnění dutiny vstřikovací formy nezáleží na její kvalitě povrchu pro danou směs. Není tedy nutné povrch leštit, popřípadě brousit, pokud to není žádáno zadavatelem. Mohly by tak odpadnout velmi drahé dokončovací operace.

Jak bylo zmíněno, u třetí části diplomové práce byly analýzy počítány pro dva materiály. Nastavení procesních parametrů i velikosti výpočetní sítě bylo pro oba materiály stejné. Úkolem bylo zjistit, jestli změna trajektorie a zároveň i druh materiálu mají vliv na změnu teploty a s tím spojenou vulkanizaci materiálu, popřípadě změnu tlaku.

U první trajektorie, kde se jednalo o krátký tokový kanál s kruhovým průřezem, se zmenšením průměru vzrostla teplota taveniny pro materiál EPDM o 1,6°C, která se později projevila i na čase potřebném ohřívání taveniny, aby dosáhla 85% vulkanizace. Tento čas klesl o 4 s při zúžení průměru z 6 mm na 2 mm. U materiálu NBR vzrostla teplota o 3,1°C a rozdíl času 85% vulkanizace byl 5°C.

Trajektorie 2 byla konstruovaná stejně jako trajektorie 1 jen s tím rozdílem, že délka kanálu byla dvakrát delší než u trajektorie 1. Nárůst teploty u EPDM i NBR byl zjevnější než u trajektorie 1. Rozdíl teplot mezi průměrem 6 mm a 2 mm je 3,7°C a u NBR dokonce 6,8°C. Jak bylo zmíněno, tato trajektorie má délku rozvodného kanálu 100 mm. Na této

délce je materiál více ohříván od stěny formy než u trajektorie 1. Z toho důvodu je pokles potřebného času na z vulkanizování 85% materiálu větší a to z 658 s na 646 s u EPDM a z 387 s na 372 s u NBR. Pokud je srovnán nejlepší a nejhorší výsledek u trajektorie 1 a 2, tak čas 85% vulkanizace klesne z 672 s na 646 s u materiálu EPDM a z 400 s na 372 s.

Rozdíl časů zobrazuje půl minutové rozdíly potřebné vulkanizace pro oba materiály. Pokud má směs dobrou bezpečnost vulkanizace, což v těchto případech měla, a vlivem ohřátí během průchodu rozvodovými kanály nezačne vulkanizovat, mohlo by se těchto výsledků využít při vstřikování elastomerů. Při vhodném výběru trajektorie a nastavení procesních podmínek by se mohl na každém cyklu ušetřit čas pro ohřev výrobku. Zbytečné ohřívání formy je velice neekonomické, hlavně při velkosériové výrobě.

U odstupňovaných trajektorií 3 a 4 rozdíly teplot nejsou tak velké jako u mezi trajektorií 1 a 2. Naopak u trajektorie 5 a zvláště u trajektorie 6 se rozdíly teplot i následné časy vulkanizace jeví být lepší pro oba materiály. Ale je potřeba zmínit nárůst tlaku, který zvyšuje energetickou náročnost procesu. Navíc poslední dvě trajektorie by byly náročnější na výrobu, výrobek by šel také hůře odformovat z vstřikovací formy. Pro poslední dvě trajektorie je nutné provést úplné technologicko – ekonomické zhodnocení, zda se jejich použití vyplatí.

Z výsledků lze vidět že zúžením kanálu teplota roste a čas vulkanizace klesá. U několika málo trajektorií tuto závislost výsledky nepodporují. Jedná se pouze o Analýzu a výsledky nejsou potvrzeny skutečným vstřikovacím procesem. Anomální výsledky mohly být způsobeny nevhodnou velikostí trojúhelníkové sítě, nebo přímo umístěním senzoru 2, protože byl umístěn v tokovém systému, kde se mění všechny měřené veličiny na malé vzdálenosti velice rychle.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo zhodnotit vliv geometrie a uspořádání tokových cest nástroje na zatékavost taveniny.

Plnění dutiny formy je ovlivňováno různými parametry. Mezi tyto parametry především patří vstřikovací tlak, vstřikovací teplota a vstřikovaný materiál. Podle výsledků této diplomové práce má na zatékavost vliv také tvar a typ trajektorie vtokových kanálů. Aby se dalo těchto zjištění využít v praxi, je potřeba provést ještě mnoho měření, zejména pak pro každou určitou směs najít vhodnou trajektorii a nastavení procesu. Tyto trajektorie mohou mít různý tvar, ale musí být zaručeno bezproblémové vyhození výrobku z formy.

Z hlediska použití velké škály kaučukových směsí v gumárenské praxi by měli být spočítány analýzy i pro jiné druhy směsí a také by měla být zkontrolována analýza na skutečném vstřikovacím procesu. Měla by být navržena a vyrobena vstřikovací forma, pro zkušební tělíska, na kterých by se mohlo měřit následné procento zvučkanizování materiálu. Tato forma by měla mít několik druhů rozvodných kanálů pro srovnání výsledků.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů I.díl – Vstřikování termoplastů*, 2. vyd. Brno : UNIPLAST, 1999. 134 s.
- [2] BOBČÍK, L. a kol. *Formy pro zpracování plastů II.díl – Vstřikování termoplastů*, 2. vyd. Brno : UNIPLAST, 1999. 212 s.
- [3] TOMIS, F., HELŠTÝN, J. *Formy a přípravky*. 2. vyd. Praha : SNTL, 1985. 374 s. ISBN 414-33580.
- [4] TOMIS, F. *Základy gumárenské a plastikářské technologie*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1975. 278 s. ISBN 414-33543.
- [5] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J., PAŇÁK, P. *Strojírenská technologie 2 – Polotovary a jejich technologičnost I.díl* Praha : SCIENTIA spol. s.r.o., 1999, 316s, ISBN 80-7183-117-4.
- [6] *Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. 2005 , 16.1.2007 [cit. 2007-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.ksp.vslib.cz/cz/kpt/obsah/info.htm>>.
- [7] *Advanced Plastics, s.r.o.* [online]. 2004 [cit. 207-01-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.advplast.cz/cze/plasty.html>>.
- [8] JOHNSON, Peter S. *Rubber Processing : An Introduction*. [s.l.] : [s.n.], 2001. 145 s.
- [9] DUCHÁČEK, Vratislav. *Gumárenské suroviny a jejich zpracování*. 2. přeprac. vyd. Praha : [s.n.], 1990. 154 s. ISBN 80-7080-077-1.
- [10] STANĚK, Michal, GABRIEL, Jiří. Vstřikování plasů - simulace procesu a vstupní data pro simulaci s využitím softwaru Cadmould Rubber. *Mezinárodní Gumárenské Sympozium*. 2007, č. 11, 9 s..
- [11] TOMIS, F., RULÍK, F. *Gumárenské a plastikářské stroje II*. vyd. Brno : VUT 1961
- [12] B. Raphael and I.F.C. Smith (2003). *Fundamentals of computer aided engineering*. John Wiley. ISBN 978-0-471-48715-9

- [13] DRGA, Zdeněk. *Vliv drsnosti povrchu nástroje na zatékavost elastomerů*. [s.l.], 2006. 76 s. , 7 Diplomová práce.
- [14] ZEHNAL, Martin. *Vliv procesních parametrů na zatékavost polymerní taveniny*. [s.l.], 2008. 106 s. Diplomová práce.
- [15] WILCZYNSKI, Ondřej, POSPÍŠIL, Richard, STANĚK, Michal. *Využití RPA2000 pro měření vstupních dat software CADMOULD. Mezinárodní Nástrojařská Konference ITC 2009*. [s.l.], 2009. 6 s. UTB Zlín, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství, TGM 275,76272 Zlín, Česká Republika.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------|-------------------------------------|
| Cu | Měď |
| Al | Hliník |
| IT | Třída přesnosti |
| 3D | Trojrozměrný prostor |
| R | Rádus |
| Ra | Drsnost |
| EPDM | Ethylen-propylen-dienový terpolymer |
| NBR | Akrilonitril-butadienový kaučuk |
| \bar{X} | Aritmetický průměr |
| s | Směrodatná odchylka |
| E | Modul pružnosti v tahu [MPa] |
| Tg | Teplota skelného přechodu [°C] |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 1. Základní rozdělení polymeru.....</i> | 11 |
| <i>Obr. 2. Vstřikovací cyklus elastomerů.....</i> | 12 |
| <i>Obr. 3. Popis vstřikovacího stroje.....</i> | 14 |
| <i>Obr. 4. Pístová vstřikovací jednotka [8].....</i> | 15 |
| <i>Obr. 5. Šneková vstřikovací jednotka [8].....</i> | 16 |
| <i>Obr. 6. Pístová vstřikovací jednotka se šnekovou plastikací [8].....</i> | 17 |
| <i>Obr. 7. Schéma uzavírací jednotky [4].....</i> | 17 |
| <i>Obr. 8. Zobrazení dopravení taveniny z vstřikovacího stroje do dutiny [1].....</i> | 22 |
| <i>Obr. 9. Tvary rozváděcích kanálů [1].....</i> | 23 |
| <i>Obr. 10. Odstupňované vtokové kanály [1].....</i> | 24 |
| <i>Obr. 11. Hevea brasiliensis – zdroj přírodního kaučuku.....</i> | 31 |
| <i>Obr. 12. Závislost viskozity Mooney typických kaučuků na teplotě [9].....</i> | 34 |
| <i>Obr. 13. Typický tahový diagram pryže.....</i> | 35 |
| <i>Obr. 14. 3D model výrobku.....</i> | 46 |
| <i>Obr. 15. Měřicí přístroj RPA 2000 [15].....</i> | 47 |
| <i>Obr. 16. Detailní pohled na měřící část [15].....</i> | 47 |
| <i>Obr. 17. Rychlost vulkanizace pro různé teploty.....</i> | 48 |
| <i>Obr. 18. Zobrazení naměřených dat dynamické viskozity.....</i> | 49 |
| <i>Obr. 19. Čas plnění.....</i> | 50 |
| <i>Obr. 20. Teplotního pole ve střední vrstvě v čase 30s.....</i> | 51 |
| <i>Obr. 21. Teplotní pole ve střední vrstvě v čase 630s.....</i> | 52 |
| <i>Obr. 22. Teplotní pole ve střední vrstvě v čase 830s.....</i> | 52 |
| <i>Obr. 23. Průběh vulkanizace ve střední vrstvě v čase 30s.....</i> | 53 |
| <i>Obr. 24. Průběh vulkanizace na povrchu výrobku v čase 30s.....</i> | 54 |
| <i>Obr. 25. Průběh vulkanizace ve střední vrstvě v čase 630s.....</i> | 54 |
| <i>Obr. 26. Průběh vulkanizace ve střední vrstvě v čase 830s.....</i> | 55 |
| <i>Obr. 27. Grafické zobrazení průběhu vulkanizace v 630s.....</i> | 55 |
| <i>Obr. 28. Studené spoje.....</i> | 56 |
| <i>Obr. 29. Odhad výskytu vzduchových kapes.....</i> | 57 |
| <i>Obr. 30. Vstřikovací stroj REP [13].....</i> | 58 |
| <i>Obr. 31. Spodní část formy [14].....</i> | 59 |

| | |
|--|----|
| Obr. 32. Řez dutinou formy [14] | 59 |
| Obr. 33. Zkušební desky [14] | 60 |
| Obr. 34. Zkušební vzorek [13] | 62 |
| Obr. 35. Porovnání vlivu typu desky na zatečení při daných tlacích | 62 |
| Obr. 36. Krátký, kruhový kanál | 65 |
| Obr. 37. Umístění senzorů u trajektorie 1 | 65 |
| Obr. 38. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, materiál EPDM | 66 |
| Obr. 39. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\text{ØD} = 4 \text{ mm}$, materiál EPDM | 66 |
| Obr. 40. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\text{ØD} = 2 \text{ mm}$, materiál EPDM | 67 |
| Obr. 41. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 68 |
| Obr. 42. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\text{ØD} = 4 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 68 |
| Obr. 43. Průběh vulkanizace trajektorie 1, $\text{ØD} = 2 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 69 |
| Obr. 44. Dlouhý, kruhový kanál..... | 70 |
| Obr. 45. Umístění senzorů u trajektorie 2 | 70 |
| Obr. 46. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, materiál EPDM | 71 |
| Obr. 47. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\text{ØD} = 4 \text{ mm}$, materiál EPDM | 71 |
| Obr. 48. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\text{ØD} = 2 \text{ mm}$, materiál EPDM | 72 |
| Obr. 49. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 73 |
| Obr. 50. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\text{ØD} = 4 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 74 |
| Obr. 51. Průběh vulkanizace trajektorie 2, $\text{ØD} = 2 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 74 |
| Obr. 52. Krátký, odstupňovaný, kruhový kanál | 75 |
| Obr. 53. Umístění senzorů u trajektorie 3 | 76 |
| Obr. 54. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 8 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 6 \text{ mm}$, materiál EPDM | 76 |
| Obr. 55. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 4 \text{ mm}$, materiál EPDM | 77 |
| Obr. 56. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 4 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 2 \text{ mm}$, materiál EPDM | 77 |
| Obr. 57. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 8 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 6 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 78 |
| Obr. 58. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 4 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 79 |
| Obr. 59. Průběh vulkanizace trajektorie 3, $\text{ØD} = 4 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 2 \text{ mm}$, materiál NBR..... | 79 |
| Obr. 60. Dlouhý, odstupňovaný, kruhový kanál | 80 |
| Obr. 61. Umístění senzorů u trajektorie 4 | 81 |
| Obr. 62. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\text{ØD} = 8 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 6 \text{ mm}$ materiál EPDM | 81 |
| Obr. 63. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\text{ØD} = 6 \text{ mm}$, $\text{Ød} = 4 \text{ mm}$, materiál EPDM | 82 |

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 64. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\varnothing D= 4\text{ mm}$, $\varnothing d= 2\text{ mm}$, materiál EPDM</i> | 82 |
| <i>Obr. 65. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\varnothing D= 8\text{ mm}$, $\varnothing d= 6\text{ mm}$, materiál NBR.....</i> | 83 |
| <i>Obr. 66. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\varnothing D= 6\text{ mm}$, $\varnothing d= 4\text{ mm}$, materiál NBR.....</i> | 84 |
| <i>Obr. 67. Průběh vulkanizace trajektorie 4, $\varnothing D= 4\text{ mm}$, $\varnothing d= 2\text{ mm}$, materiál NBR.....</i> | 84 |
| <i>Obr. 68. Krátký, čtvercový kanál</i> | 85 |
| <i>Obr. 69. Umístění senzorů u trajektorie 5</i> | 86 |
| <i>Obr. 70. Průběh vulkanizace trajektorie 5, tl.= 4 mm, h= 4 mm, materiál EPDM.....</i> | 86 |
| <i>Obr. 71. Průběh vulkanizace trajektorie 5, tl.= 2 mm, h= 2 mm, materiál EPDM.....</i> | 87 |
| <i>Obr. 72. Průběh vulkanizace trajektorie 5, tl.= 4 mm, h= 4 mm, materiál NBR</i> | 88 |
| <i>Obr. 73. Průběh vulkanizace trajektorie 5, tl.= 2 mm, h= 2 mm, materiál NBR</i> | 88 |
| <i>Obr. 74. Dlouhý, čtvercový kanál</i> | 89 |
| <i>Obr. 75. Umístění senzorů u trajektorie 6</i> | 90 |
| <i>Obr. 76. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl.= 4 mm, h= 4 mm, materiál EPDM.....</i> | 90 |
| <i>Obr. 77. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl.= 2 mm, h= 2 mm, materiál EPDM.....</i> | 91 |
| <i>Obr. 78. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl.= 4 mm, h= 4 mm, materiál NBR</i> | 92 |
| <i>Obr. 79. Průběh vulkanizace trajektorie 6, tl.= 2 mm, h= 2 mm, materiál NBR</i> | 92 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| <i>Tab. 1. Teploty skelného přechodu běžných kaučuků [9]</i> | 33 |
| <i>Tab. 2. Procesní parametry</i> | 49 |
| <i>Tab. 3. Drsnost jednotlivých desek</i> | 60 |
| <i>Tab. 4. Procesní podmínky</i> | 61 |
| <i>Tab. 5. Nastavení procesu.....</i> | 61 |
| <i>Tab. 6. Nastavení analýzy</i> | 64 |
| <i>Tab. 7. Výsledky analýzy trajektorie 1, materiál EPDM</i> | 67 |
| <i>Tab. 8. Výsledky analýzy trajektorie 1, materiál NBR.....</i> | 69 |
| <i>Tab. 9. Výsledky analýzy trajektorie 2, materiál EPDM</i> | 72 |
| <i>Tab. 10. Výsledky analýzy trajektorie 2, materiál NBR.....</i> | 75 |
| <i>Tab. 11. Výsledky analýzy trajektorie 3, materiál EPDM</i> | 78 |
| <i>Tab. 12. Výsledky analýzy trajektorie 3, materiál NBR.....</i> | 80 |
| <i>Tab. 13. Výsledky analýzy trajektorie 4, materiál EPDM</i> | 83 |
| <i>Tab. 14. Výsledky analýzy trajektorie 4, materiál NBR.....</i> | 85 |
| <i>Tab. 15. Výsledky analýzy trajektorie 5, materiál EPDM</i> | 87 |
| <i>Tab. 16. Výsledky analýzy trajektorie 5, materiál NBR.....</i> | 89 |
| <i>Tab. 17. Výsledky analýzy trajektorie 6, materiál EPDM</i> | 91 |
| <i>Tab. 18. Výsledky analýzy trajektorie 6, materiál NBR.....</i> | 93 |

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Nastavení průběhu rychlosti tečení v programu Cadmould

Příloha P II: Naměřené hodnoty na stroji REP

Příloha P III: Výsledky materiálových testů na stroji RPA 2000

PŘÍLOHA P I: PRŮBĚH RYCHLOSTI TEČENÍ



PŘÍLOHA P II: NAMĚŘENÉ HODNOTY NA STROJI REP

| zkušební deska | vstříkovací tlak [MPa] | délka zatečení [mm] | | | | | | | | | | – X | s |
|----------------|------------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| | | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. | 10. | | |
| LEŠTĚNÁ | 12 | 466 | 442 | 465 | 456 | 461 | 467 | 454 | 468 | 460 | 462 | 460,1 | 7,45 |
| | 16 | 605 | 602 | 603 | 606 | 600 | 596 | 602 | 606 | 618 | 610 | 604,8 | 5,69 |
| | 20 | 720 | 723 | 725 | 726 | 721 | 731 | 728 | 724 | 729 | 724 | 725,1 | 3,3 |
| | 24 | 827 | 829 | 833 | 832 | 826 | 823 | 824 | 820 | 825 | 822 | 826,1 | 4,01 |
| BROUŠENÁ | 12 | 377 | 372 | 376 | 369 | 372 | 371 | 380 | 368 | 383 | 371 | 373,9 | 4,66 |
| | 16 | 541 | 554 | 551 | 541 | 543 | 547 | 553 | 545 | 544 | 549 | 546,8 | 4,53 |
| | 20 | 690 | 674 | 673 | 665 | 671 | 678 | 684 | 679 | 677 | 678 | 676,9 | 6,55 |
| | 24 | 775 | 788 | 790 | 781 | 782 | 787 | 789 | 792 | 792 | 793 | 786,9 | 5,52 |
| JEMNÝ DEZÉN | 12 | 597 | 598 | 596 | 595 | 597 | 594 | 593 | 596 | 595 | 596 | 595,7 | 1,42 |
| | 16 | 738 | 736 | 737 | 736 | 737 | 735 | 734 | 737 | 734 | 735 | 735,9 | 1,3 |
| | 20 | 894 | 886 | 889 | 892 | 895 | 893 | 897 | 888 | 896 | 895 | 892,5 | 3,5 |
| | 24 | 1070 | 1092 | 1103 | 1084 | 1114 | 1089 | 1108 | 1058 | 1022 | 1049 | 1078,9 | 27,58 |
| FRÉZOVANÁ | 12 | 441 | 454 | 450 | 436 | 451 | 445 | 449 | 442 | 443 | 446 | 445,7 | 5,14 |
| | 16 | 593 | 595 | 594 | 594 | 592 | 585 | 590 | 588 | 591 | 589 | 591,1 | 2,98 |
| | 20 | 697 | 694 | 705 | 707 | 696 | 698 | 706 | 703 | 704 | 704 | 701,4 | 4,43 |
| | 24 | 826 | 828 | 819 | 817 | 833 | 836 | 837 | 834 | 828 | 820 | 827,8 | 6,9 |
| HRUBÝ DEZÉN | 12 | 454 | 457 | 473 | 470 | 474 | 472 | 452 | 465 | 477 | 469 | 466,3 | 8,46 |
| | 16 | 604 | 594 | 602 | 606 | 603 | 597 | 596 | 599 | 600 | 614 | 601,5 | 5,48 |
| | 20 | 812 | 808 | 800 | 789 | 806 | 794 | 786 | 815 | 799 | 785 | 799,4 | 10,22 |
| | 24 | 897 | 903 | 904 | 884 | 892 | 913 | 908 | 907 | 884 | 899 | 899,1 | 9,41 |

