



**Simulační studie**  
**Expanzia plastového odpadu do roku 2050**  
Tým: xpatri00  
Varianta 9: Plasty

9. prosince 2019

Nikolas Patrik (xpatri00)  
Peter Horňák (xhorna14)

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>1</b>
1.1	Cieľ práce . . . . .	1
1.2	Postup práce . . . . .	1
1.3	Overenie validity modelu . . . . .	1
1.4	Autori práce . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Rozbor témy a použitých technológií</b>	<b>1</b>
2.1	Používané metódy a technológie . . . . .	2
<b>3</b>	<b>Koncepcia</b>	<b>2</b>
3.1	Popis konceptuálneho modelu . . . . .	2
3.2	Forma konceptuálneho modelu . . . . .	2
<b>4</b>	<b>Spôsob riešenia</b>	<b>3</b>
4.1	Spúšťanie simulačného modelu . . . . .	3
<b>5</b>	<b>Testovanie a experimenty</b>	<b>3</b>
5.1	Postup testovanie . . . . .	4
5.2	Experimenty . . . . .	4
5.2.1	Experiment 1 . . . . .	4
5.2.2	Experiment 2 . . . . .	5
5.2.3	Experiment 3 . . . . .	5
5.2.4	Experiment 4 . . . . .	6
5.3	Záver a zhrnutie experimentov . . . . .	6
<b>6</b>	<b>Záver</b>	<b>6</b>
<b>A</b>	<b>Petriho sieť</b>	<b>8</b>

# 1 Úvod

## 1.1 Cieľ práce

Táto dokumentácia popisuje návrh a implementáciu modelu, ktorý skúma problematiku každoročného rastu plastového odpadu. Model bol navrhnutý pomocou Petriho siete[1, snímka 123] a je založený na historických a momentálnych štatistikách. Vďaka tomuto modelu a experimentami nad ním prevedenými, je možné pozorovať postupný nárast plastového odpadu a prípadné následky. Zmyslom experimentov je zistiť, ako kvalitne je systém navrhnutý a zhodnotiť výsledky, ktoré experimenty poskytnú.

## 1.2 Postup práce

Aby sme mohli zistiť možné následky, bolo potrebné získať informácie o súčasnom stave výroby plastov a ich následnom používaní. Avšak v tejto problematike často nevieme určiť presné čísla, čo nás núti náš model v istých častiach zjednodušiť. Následný návrh vyplýva z dát, ktoré boli zverejnené v poslednej dekáde.

## 1.3 Overenie validity modelu

Validita modelu bola overená experimentovaním s modelom a následným porovnaním výsledkov z vedeckých štúdií, ktoré sa zaoberali rovnakou problematikou. Z výsledkov sa javí, že tento model je pre zadaný cieľ validný. Podrobné výsledky experimentov sú popísané v kapitole 5.

## 1.4 Autori práce

Nikolas Patrik - xpatri00

Peter Horňák - xhorna14

# 2 Rozbor témy a použitých technológií

Táto štúdia sa zaoberá témou zvyšujúceho hromadenia odpadu v oceánoch a na súši. Všetky dáta sú potvrdené alebo vznikli ich spriemerovaním z viacerých zdrojov.

Ročne sa na svete vyprodukuje okolo 359 miliónov ton plastov [2]. Z tohoto množstva sa dostane až 8 miliónov ton do oceánov[3]. Vďaka snahe rôznych firiem ako je Adidas, Patagonia, 4Ocean, Bureo [4], ktoré zbierajú plasty z oceánov a recyklujú ich, ročne vytiahneme okolo 5% plastového odpadu z oceánov. Tieto výrobky zvyčajne vydržia dobu danú exponenciálnym rozložením 2 roky(stanovené podľa priemernej záruky daných výrobkov). Následne sa z daných výrobkov stáva opäť plastový odpad, ktorý v mnohých prípadoch nemôže byť ďalej recyklovaný, tento odpad sa následne pridáva k celkovej ročnej produkcii a celková ročná produkcia môže narastať.

Zvyšných 97% plastov ostáva na súši. Z tohoto množstva plastového odpadu je podľa dát z roku 2015 - 19.5 % zrecyklovaných, 25,5 % spaľovaných (čo pre náš model znamená, že tento plastový odpad zaniká z dôvodu, že neposkytuje také priestorové nároky ako normálny plast) a potom 55 % [3, How do we dispose of our plastic?] z tohoto množstva zostáva na zemi a je hromadený na smetiskách. Z recyklovaných plastov následne vznikajú produkty každodennej potreby a tak ich životnosť sa pohybuje v dobe danou exponenciálnym rozložením[1, snímka 92] so stredom pol roka a potom sa z nich opäť stáva odpad.

Takýto model predstavuje celkovú produkciu plastov ak by výroba plastov by bola stále rovnaká. Avšak podľa historických údajov môžeme vidieť, že každoročne produkcia plastov narastá. [3, How much plastic we produce?]. Podľa našich výpočtov vychádza, že priemerný nárast v 21. storočí je 3.99 %.

## 2.1 Použité metódy a technológie

Na vytvorenie modelu bol použitý jazyk C++ spolu s knižnicou SIMLIB<sup>1</sup>. Na parsovanie argumentov modelu pre rôzne experimenty bol použitý modul `getopt`.

## 3 Konceptcia

V tejto sekcii popíšeme návrh konceptuálneho modelu[1, snímka 48]. Tento model reprezentuje životný cyklus plastového odpadu na zemi. Systém je modelovaný formou petriho siete. Z rozboru problému vieme, že je potrebné modelovať pohyb plastov na zemi podľa daných faktov. Treba brať v úvahu že recyklované plasty zvyčajne nemajú následne dlhú životnosť a onedlho sa z nich stáva znovu plastový odpad. Produkty ktoré vytvárajú rôzne firmy z odpadu z mora môžu mať pomerne dlhú životnosť, ale podľa toho, že väčšina produktov má záruku 2 roky sme určili že doba životnosti bude určene exponenciálnym rozložením so stredom 2 roky. Pre recyklované plasty je situácia podobná avšak tieto produkty sú zvyčajne obmieňané na dennej báze a preto bolo potrebné zobrať stred rozloženia bližšie ku ich začiatku životnosti a preto sme zvolili hodnotu pol roka. Z celkovej kvantity plastového odpadu tieto položky netvorí veľkú časť a preto validitu modelu neovplyvní menšia nepresnosť v zvolených stredoch exponenciálnych rozložení. Podľa rôznych zdrojov sa rôzne plasty môžu rozkladať okolo 450 rokov[5]. Avšak pre náš model, keďže trvá iba 30 rokov, sú relevantné plasty, ktoré sa nám počas doby simulácie môžu rozpadnúť. V tomto časovom rozmedzí sa môžu rozložiť malé plasty ako napríklad tašky alebo cigarety, tie však z celkovej hmotnosti predstavujú veľmi malé množstvo. Podľa týchto údajov sme teda zvolili dobu potrebnú na rozklad plastového odpadu ako normálne rozloženie[1, snímka 93] so stredom 350 rokov a rozptylom 140, keďže v normálnom rozložení sa väčšina dát nachádza v rozmedzí trojnásobku rozptylu od stredu, čo pre nás znamená, že plasty do 30 rokov majú pravdepodobnosť rozkladu okolo 1 %. Ostatný plastový odpad ostáva v systéme a teda môžeme zistiť koľko plastového odpadu sa v danej dobe nachádza na zemi a v mori od spustenia simulácie.

Keďže odpad ktorý bol už recyklovaný nemôže byť znovu použitý, je percentuálne rozdelenie pravdepodobnosti že odpad bude buď spopolnený alebo odložený na skládku v rovnakom pomere ako tomu bolo pri rovnakom prípade s recyklovaním.

### 3.1 Popis konceptuálneho modelu

Náš konceptuálny model viz. príloha A je modelovaný dvomi vetvami formou petriho siete.

Jedna slúži na modelovanie exponenciálne zvyšujúcej sa produkcie plastov ročne o 3.99 % zo začiatkom produkcie v hodnote 359 miliónov ton plastov ročne.

Druhá a hlavná vetva modeluje životný cyklus plastového odpadu. Ako vieme 3 percentá ročne z celkovej produkcie skončia v mori. Zvyšok je ostáva na zemi. Priebeh života plastového odpadu na mori je následovný. Buď sa stáva z plastového odpadu znovu použiteľný tovar ktorého životnosť je okolo dvoch rokov alebo ostáva v mori kde sa rozkladá po dobu 600 rokov. Ak sa daný odpad znovu použil na výrobu nového výrobku stáva sa z neho po nejakej dobe znovu odpad, ktorý avšak už nemôže byť ďalej recyklovaný.

Ak odpad zostáva na zemi, tak ostáva patrí do jedného z troch prípadov. Buď je hromadený na smetiskách a začne sa rozkladať, alebo je spopolnený, kedy odchádza zo systému. V ďalšom prípade je recyklovaný, kedy sa stáva znovu z tohoto plastového odpadu výrobok a teda má pred sebou nejakú životnosť. Po vypršaní tejto doby sa z neho stáva opäť odpad a pre tento odpad potom nasleduje podobný proces ako pre odpad ktorý je produkován, avšak s tým faktom že tento už nemôže byť recyklovaný.

### 3.2 Forma konceptuálneho modelu

Model je zobrazený formou Petriho siete v prílohe. A a je doplnený informáciami z tejto sekcie a dopĺňujúcou legendou v modeli.

---

<sup>1</sup><https://www.fit.vutbr.cz/peringer/SIMLIB/>

## 4 Spôsob riešenia

Riešenie simulačného modelu[1, snímka 40] reprezentuje vytvorený konceptuálny model. Implementácia sa skladá s objektu typu `Event`[1, snímka 169], ktorý generuje udalosti každý rok, pričom vygeneruje príslušné množstvo opadu v jednotkách. Pri čom jednotka reprezentuje milión metrický ton. Každý rok sa vygeneruje príslušný počet jednotiek na základe počiatkovej produkcie a ročného nárastu produkcie plastov.

Ďalej tieto jednotky reprezentujú objekt typu `Process`[1, snímka 121]. Sú to transakcie ktoré reprezentujú život plastového odpadu na našej Zemi.

V programe sa vedie štatistika koľko z daného odpadu sa rozkladá na zemi a koľko v mori pri vložených parametroch modelu (miera recyklácie, miera spaľovania a odkladanie odpadu, alebo podľa počiatkovej produkcie a ročného prírastku/úbytku z tejto produkcie).

Pri spustení každej simulácie sa inicializujú potrebné dáta buď zo zadaných parametrov alebo sa im priradia východzie hodnoty na základe prieskumov dát z tejto problematiky. Čas sa nastaví na dobu 30 rokov. Konkrétne sa počítajú výsledky množstva odpadu ktorý pribudne na zemi za túto dobu a to v oceánoch a na súši.

Udalosť reprezentujúca vznik nového odpadu sa aktivuje každý nový rok a generuje potrebné množstvo plastu. Následne sa novo vzniknuté procesy plastového odpadu aktivujú a vykonávajú simulácie na základe ktorej ostáva v systéme dobu potrebnú na ich rozloženie, alebo opúšťajú systém potom čo boli spopolnené. Stav plastov ktoré následne čakajú dobu na ich rozloženie je sledovaný daný počet je vedený ako štatistika v danom simulačnom modeli.

### 4.1 Spúšťanie simulačného modelu

Simulačný model je potrebné pred prvým spustením najskôr preložiť. Na preloženie simulačného modelu je potrebné mať na svojom systéme nainštalovanú knižnicu `SIMLIB`<sup>1</sup>. Túto knižnicu stiahnete na oficiálnych stránkach knižnice. Je potrebné stiahnuť najnovšiu verziu aká je momentálne dostupná. Konkrétne ide o verziu 3.07 z 19.10.2018. Následne projekt preložíme príkazom `make`. V adresári nám následne vznikne binárny súbor reprezentujúci simulačný model. Tento binárny súbor je možné potom spustiť príkazom `make run`. Ak chceme náš model spustiť s ľubovoľnými parametrami je potrebné zavolať `make run ARGS="parametre"` kde za parametre programu dosadíme presne parametre modulu ako by sme spúšťali samotný binárny súbor.

Pri spustení binárneho súboru bez parametrov simulačný model využíva východzie parametre ktoré sú určené na základe prieskumu dát o danej problematike. Ak chceme vidieť aký by bol vývoj tohoto problému ak by sme upravili niektoré z parametrov máme možnosť upraviť nasledujúce parametre modelu:

- `-s` – vyjadruje množstvo v percentách z celkového odpadu ktoré sa dostane do morí a oceánov.
- `-r` – vyjadruje množstvo vyloveného a znovu použitého odpadu z mora v percentách
- `-d` – množstvo odpadu ktorý je hromadený na skládkach alebo na iných miestach v percentách
- `-c` – množstvo recyklovaného odpadu v percentách
- `-p` – ročnú produkciu odpadu v miliónoch ton
- `-i` – ročný nárast/pokles produkcie plastového odpadu vyjadrený ako percentá pomocou desatinných čísiel.

## 5 Testovanie a experimenty

Cieľom experimentu bolo overiť validitu modelu, ale hlavne ukázať ako sa dajú upravovať hodnoty vstupných parametrov aby sme čo najviac obmedzili produkciu plastového odpadu.

---

<sup>1</sup><https://www.fit.vutbr.cz/peringer/SIMLIB/>

## 5.1 Postup testovanie

Každý experiment spočíval v upravení niektorých parametrov modelu aby sa ukázalo vplyv určitých činiteľov na výsledky modelu v porovnaní s výsledkami pri súčasných trendoch pri práci s plastovým odpadom. Výsledky experimentov majú slúžiť ako motivácia k recyklovaniu plastov a tým pádom aj v znižovaní ročnej produkcie plastov.

**Postup experimentov je možné popísať nasledovne:**

1. Určenie vstupných parametrov experimentu.
2. Spustenie simulácie
3. Porovnanie výsledkov simulácie s výsledkami danými parametrami so súčasným trendom.
4. Vyvodenie záverov o produkcii plastov.

## 5.2 Experimenty

Každý experiment má presný popis, dôvod prečo je vykonaný a k výsledkom sú následne vyvedené závery. Experimenty sú porovnávané vzhľadom k súčasným trendom produkcia plastového odpadu, jej ročného nárastu a miery recyklácie. Do roku 2050 teda pri súčasnom trende môžeme očakávať nasledujúce prírastky na plastovom odpade:

Množstvo odpadu vyprodukovaného do roku 2050	
Odpad na súši [Mt]	Odpad v oceáne [Mt]
13537	694

Tabulka 1: Množstvo odpadu pri súčasných trendoch práce s plastovým odpadom vyprodukovaného do roku 2050

### 5.2.1 Experiment 1

Zámerom tohto experimentu bolo zistiť ako by ovplyvnil naše výsledky zvýšený zber odpadu z mora a jeho následná recyklácia do produktov.

Množstvo odpadu vyprodukovaného do roku 2050		
Recyklovaný odpad z oceánu [%]	Odpad na súši [Mt]	Odpad v oceáne [Mt]
5	13537	694
25	13591	573
50	13692	421

Tabulka 2: Množstvo vyprodukovaného odpadu po zvýšení recyklácie odpadu z oceánov

Z experimentu je možné pozorovať, že pri 50% recyklácii odpadu z oceánov a jeho následnom použití, pričom určité percento sa opäť stane odpadom, by vo svetových oceánoch bolo o viac ako 1/3 plastového odpadu menej. Avšak časť z toho odpadu by sa dostala na súš, čo predstavuje zhruba nárast o 1,1%. Spracovať plasty, ktoré sa vyskytujú na súši, je jednoduchšie a menej finančne náročné, čiže tento nárast nepredstavuje až také negatívum. Celkový rozdiel je 118 miliónov ton plastov, čo sa rovná celkovému poklesu len o 0,08%. Záverom tohto experimentu je, že recyklácia odpadu z oceánov, nezredukuje plastový odpad v takej miere ako by sme si mohli predstavovať, avšak keby tento fakt znamenal, že výroba by sa zredukovala, tak by to mohlo mať niekoľko násobne lepšie následky, samozrejme, to že sa zníži následná výroba plastov môžeme označiť za čistú hypotézu.

### 5.2.2 Experiment 2

Zámerom tohto experimentu bolo zistiť ako by ovplyvnil naše výsledky zvýšenie recyklácie odpadu ktorý ostáva na zemi. Predpokladáme že zároveň množstvo odpadu ktoré je ročne spolnené sa nemení.

Množstvo odpadu vyprodukovaného do roku 2050		
Recyklovaný odpad zo zeme [%]	Odpad na súši [Mt]	Odpad v oceáne [Mt]
20	13537	694
30	12816	747
40	12051	779
50	11377	853

Tabulka 3: Množstvo vyprodukovaného odpadu po zvýšení recyklácie odpadu ktorý skončí na súši

Ako je možné pozorovať už pri 10 % náraste recyklácie odpadu, množstvo plastového odpadu vyprodukovaného na zemi sa zníži až o 668 miliónov ton, čo vychádza v prepočte na jeden rok zníženie produkcie plastov o 22 miliónov ton. Pri ešte vyššom náraste recyklácie, sa tieto čísla ešte o čosi vylepšia. Bohužiaľ ako môžeme pozorovať, zo zvýšenou mierou recyklácie nastáva problém, že čoraz viac odpadu sa dostáva do oceánu. Ako vieme práca s odpadom v oceáne je náročnejšie čo sa týka finančnej ale aj technickej stránky. Preto by bolo vhodné zaviesť vhodné riešenie s riešením z experimentu 1 1.

### 5.2.3 Experiment 3

Zámerom tohto experimentu je ukázať aký vplyv má spaľovanie plastov na ich hromadenie. Predpokladáme že miera recyklácie sa zachová. Avšak tento experiment neuvažuje nad možným vplyvom spaľovanie plastov na životné prostredie, a uvoľňovaním skleníkových plynov<sup>1</sup>, keďže to nie je prípad ktorým sa zaoberá táto štúdia.

Množstvo odpadu vyprodukovaného do roku 2050		
Miera spaľovania odpadu [%]	Odpad na súši [Mt]	Odpad v oceáne [Mt]
25	13537	694
30	12623	740
35	11671	728
40	10513	723

Tabulka 4: Množstvo produkované odpadu pri zvýšení spaľovanie odpadu

Ako je možné vidieť miera spaľovanie dokáže výrazne ovplyvniť množstvo nahromadeného odpadu a už pri 5% náraste je vidieť pokles až o takmer 1000 miliónov ton odpadu. Spaľovanie plastov však prináša aj mierny nárast plastového odpadu v mori, ale ako môžeme vidieť v 2 nie je to až tak pri recyklácií. Avšak spaľovanie odpadu prináša so sebou aj problémy týkajúce sa hromadenia skleníkových plynov takže je vhodné zvážiť že či je toto vhodný spôsob na zbavovanie sa odpadu, v porovnaní napríklad s recykláciou.

<sup>1</sup><https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/03/should-we-burn-plastic-waste/>

#### 5.2.4 Experiment 4

Tento experiment mal za cieľ zistiť, ako ovplyvní zmena každoročného nárastu produkcie, výsledné hodnoty plastového odpadu v roku 2050. Výsledky budú porovnané s našou predvolenou hodnotou, ktorý sme odvodili z priemerného nárastu za posledných 10 rokov.

Množstvo odpadu vyprodukovaného do roku 2050		
Ročný nárast produkcie [%]	Odpad na súši [Mt]	Odpad v oceáne [Mt]
0	7286	370
3.99	13537	694
4.5	14796	773
8.75	32560	1784

Tabulka 5: Množstvo vyprodukovaného odpadu pri zmenách v náraste ročnej produkcie

V prvom prípade, kedy by sa rast produkcie z roku 2018 zastavil až do roku 2050, je možné pozorovať, že by výsledný odpad bol takmer polovičný oproti odpadu, keď priemerný rast bude rovnaký ako v 21. storočí. Je predpoklad, že v roku 2050 sa naša ročná produkcia zoštvornásobí [6] oproti roku 2014, čo znamená priemerný ročný nárast 4.5 percenta. Z tohto môžeme vidieť, že náš prvotný výpočet rastu o 3.99% má pomerne malú odchýlku. Ak počítame s rastom 4.5% celkový odpad v roku 2050 predstavuje 15569 miliónov metrických ton. Doterajší odpad, ktorý bol vyrobený sa v roku 2019 odhaduje na približne 8000[7] miliónov metrických ton, čo dohromady znamená 23559 miliónov metrických ton. Odhadovaný odpad v roku 2050 je okolo 25000 miliónov metrických ton. Toto značí, že náš model má isté nedostatky ale môžeme ho prehlásiť validným. V poslednom prípade experiment počítal s priemerným ročným rastom produkcie o 8.75%, čo sa rovná priemernému ročnému rastu od roku 1950 do 2015 [3]. Je možné vidieť, že v tomto prípade sa odpad viac ako zdvojnásobí. Zmyslom tohto experimentu bolo ukázať, že aj malý ročný nárast, v rozmedzí iba 30 rokov znamená pomerne veľký rozdiel.

### 5.3 Závery a zhrnutie experimentov

Výsledkami experimentov sa ukázalo, že recyklácie je veľmi vhodnou metódou na znižovanie množstva plastového odpadu. Taktiež je možné podotknúť, že znovu-využitím plastového odpadu je tiež možné výrazne zredukovať množstvo odpadu v oceánoch, dokonca až o tretinu. Ako najvhodnejšia metóda na zbavovanie sa plastového odpadu, sa ukázalo, že je spaľovanie plastov, avšak táto štúdia nezohľadňuje možný vplyv na životné prostredie. Ďalej sa ukázalo, že aj menšie prírastky v týchto metódach môžu mať značný vplyv výsledky. Z toho vyplýva že aj malé zmeny sú lepšie ako žiadne. V poslednom experimente sa ukázalo, že model sa približuje predpokladom z rôznych štúdií. Tak isto je možné pozorovať, že najmenšie ročné nárasty produkcie majú obrovské následky pre najbližšie roky.

## 6 Záver

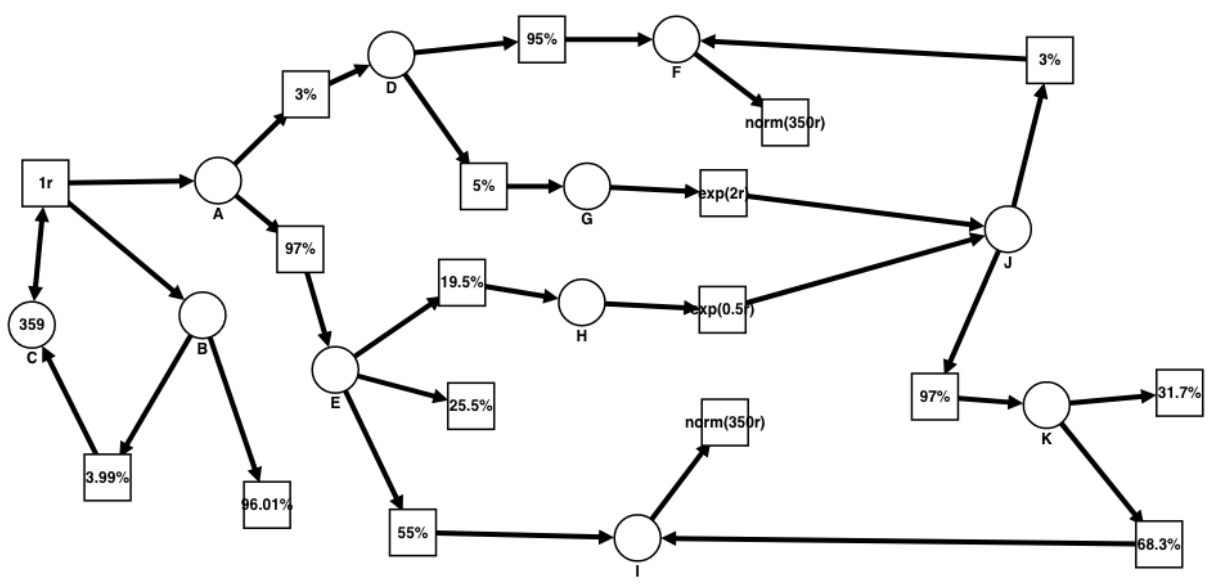
Cieľom tejto práce bolo získať dáta o práci s plastami v minulosti a informácie o momentálnej situácii, zanalyzovať získané dáta a následne ich vytvoriť abstraktný model, ktorý by simuloval ich výrobu a následné spracovanie. Ten bolo nutné naprogramovať a spraviť s ním simulácie, ktoré by určovali možnú budúcu situáciu a poukazovali na nebezpečenstvo plastového odpadu ak bude pokračovať súčasný trend.



## Literatura

- [1] Petr Peringer and Martin Hrubý. Modelování a simulace, text k přednáškám kursu modelování a simulace na fit vut v brně. [online], 22. listopad 2018. [vid. 2018-12-05].
- [2] Muhammad Firdaus Yulinah Trihadiningrum. Microplastic pollution in the sediment of jagir estuary, surabaya city, indonesia. [online], 6 December 2019.
- [3] Hannah Ritchie and Max Roser. Plastic pollution. *Our World in Data*, 2019. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>.
- [4] Owen Burke. 11 ocean-friendly companies like patagonia and adidas that are removing plastic from our seas and transforming it into cool new products. [online], May 6, 2019.
- [5] Kate Whiting. This is how long everyday plastic items last in the ocean. [online], 02 Nov 2018.
- [6] European Union. Plastics in a circular economy. May 2017. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2017/603940/EPRS\\_BRI\(2017\)603940\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2017/603940/EPRS_BRI(2017)603940_EN.pdf).
- [7] Kara Lavender Law Roland Geyer, Jenna R. Jambeck. Production, use, and fate of all plastics ever made. May 2018. [https://plasticoceans.org/wp-content/uploads/2018/05/Production\\_use\\_and\\_fate\\_of\\_all\\_plastics\\_ever\\_made.pdf](https://plasticoceans.org/wp-content/uploads/2018/05/Production_use_and_fate_of_all_plastics_ever_made.pdf).

A    Petriho sieť



Obrázek 1: Petriho sieť