

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

MODELOVÁNÍ A SIMULACE

7. Model cementárny

1 Úvod

V této práci je řešena implementace systému hromadné obsluhy (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 136) modelu cementárny, modelující kompletní výrobní proces portlandského cementu.

Na základě modelu a simulačních experimentů bude ukázáno chování systému za použití různého počtu zařízení. Pro zpracování modelu bylo nutno nastudovat způsob výroby cementu a složení různých druhů cementu.

1.1 Autoři

- Heczková Petra, xheczk04@stud.fit.vutbr.cz
- Mather Petr, xmathe00@stud.fit.vutbr.cz

Na práci se nepodílel žádný odborný konzultant, veškeré potřebné informace byly dostupné na webových stránkách a v odborné literatuře.

1.2 Ověření validity

Validita modelu byla ověřena experimenty, které probíhaly na serveru merlin.fit.vutbr.cz. Výsledky těchto experimentů odpovídaly předpokládanému chování originálu.

1.3 Zadání a cíle projektu

Oficiální zadání projektu je přístupné na webových stránkách předmětu IMS <http://perchta.fit.vutbr.cz:8000/vyuka-ims/34>. Zadání bylo rozšířeno, aby lépe odpovídalo realitě, např. střídání dne a noci. Detailnější popis bude v kapitole 4.

Cíle projektu:

1. analýza výrobního procesu cementu
2. zjistit vytížení jednotlivých zařízení v lomu a cementárně
3. zefektivnění výroby cementu

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

2.1 Popis použitých postupů pro vytvoření modelu

K vytvoření projektu byl použit jazyk C++ a simulační knihovna Simlib. Tyto prostředky byly zvoleny kvůli zadání projektu a jednoduchosti implementace. Alternativou by bylo použití jiného programovacího jazyka pro simulaci SHO, např. Simula67. Toto řešení by bylo časově náročnější vzhledem k našim malým zkušenostem s tímto jazykem.

2.2 Popis původu

- C++ - <http://en.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B>
- Simlib - <http://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>

2.3 Popis výroby cementu

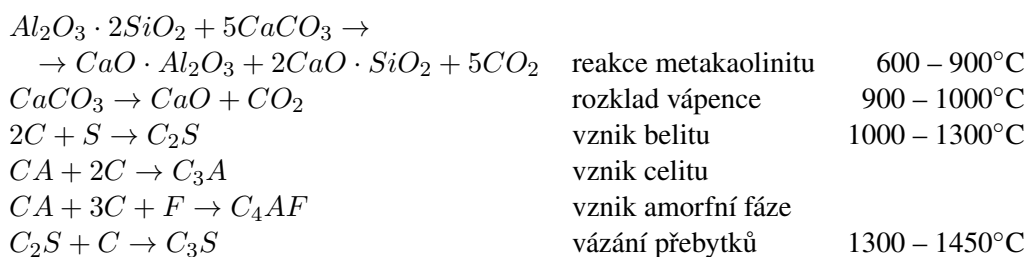
Popis výroby portlandského cementu je možné rozdělit do několika etap. Portlandský cement byl vybrán, protože je nejpoužívanějším druhem cementu při výrobě malty a betonu. Následující informace o výrobě byly čerpány z http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/produkty/cement/vyroba_cementu.htm, http://cs.wikipedia.org/wiki/Portlandsk%C3%BD_cement a <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/vyroba-cementu>.

2.3.1 Těžba suroviny

Hlavní suroviny jsou směsi vápence (zdroj vápníku $CaCO_3$) a jílu (zdroj křemíku SiO_2), případně dalších látek (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO). Tyto suroviny se těží v kamenolomech a v drtičích drtí se zhruba na velikost šterku.

2.3.2 Příprava spečeniny (slínku)

Slínek portlandského cementu je vyroben ohřátím v rotační peci dlouhé zhruba 100m za vysoké teploty (okolo $1450^\circ C$) homogenním rozmícháním surového materiálu, který byl předtím vysušen a rozemlet na jemný prášek. Kromě jiného (odpařování vody) probíhají v peci následující reakce: (Převzato z: M. Pavlíková, Z. Pavlík, J. Hošek: Materiálové inženýrství 1, ČVUT v Praze, 2008)



Tabulka 1: Tabulka reakcí při různých teplotách v rotační peci

2.3.3 Mletí cementu

Slínek je rozemlet spolu s dalšími složkami (v závislosti na požadovaném druhu cementu) na velmi jemný prášek – portlandský cement. Těmito dalšími složkami mohou být např. popílek nebo struska.

2.3.4 Nakládání a doprava

Cement je uskladněn v silech a odtud dopravován k zákazníkovi. Část cementu je dopravována zabalená v pytlích.

2.4 Zařízení

V této práci je modelováno několik druhů zařízení nacházejících se v lomu a cementárně. Nakládací, přepravní a drtící technika byla převzata z prezentace o těžbě vápence na ložisku Koněprusy <http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/seminar-2014/06-optimalizace-tezby-a-zpracovani-vapencu.pdf>. Kapacita nákladního auta CAT 775G, které převáží suroviny z lomu do cementárny je 70.5 tun podle údajů uvedených u výrobce. Samotné nakládání surovin na auto zde zanedbáváme, protože ovlivňuje model jen minimálně.

Ve vápencovém lomu se nachází ještě čelisťový drtič Metso a kuželový drtič Dragon. Kapacita těchto čelisťových drtičů se pohybuje v závislosti na typu, zde byl uvažován typ 120. Obdobné je to u kuželového drtiče, ten dokáže zpracovat tunu materiálu za 1,6-2,5 minut. V cementárně je ještě předehříváč, který je

součástí rotační pece, samotná pec a mlýn. U rotační pece se počítá s kapacitou 1500 tun za den. Cementových mlýnů existuje několik typů, zde byl vybrán typ, který zpracuje 44-47 tun za hodinu.

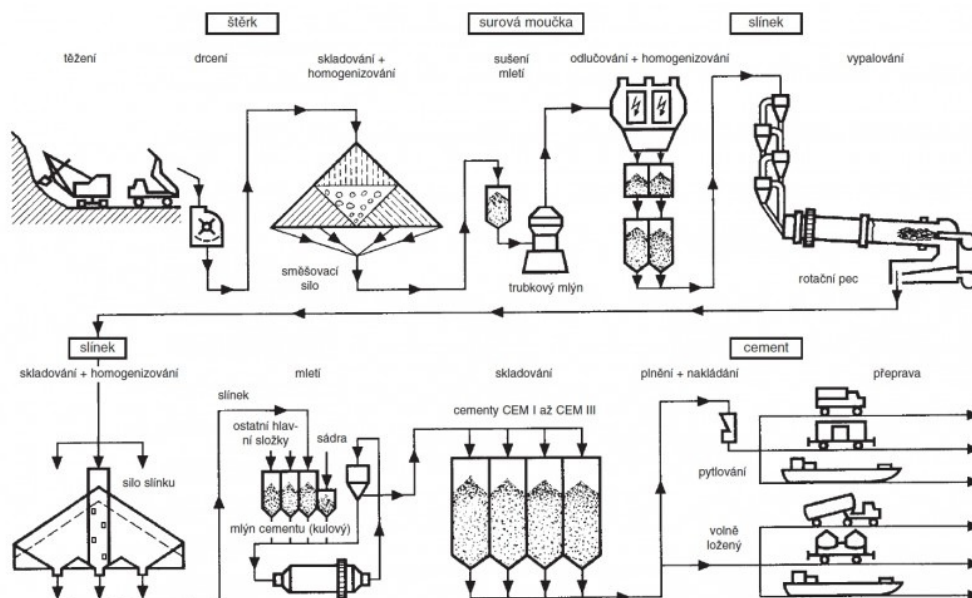
2.5 Popis původu zařízení

- Nákladního auta CAT 775G - http://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/off-highway-trucks/off-highway-trucks/18256810.html
- Čelisťový drtič Metso - http://www.metso.com/miningandconstruction/mm_crush.nsf/WebWID/WTB-111004-2256F-054A1?OpenDocument&mid=47624796874A6F43C2257C3500512B0
- Kuželový drtič Dragon - <http://dragonmachinery.com/mobile-crusher-and-screener-plant-ne.html>
- Rotační pec - <http://www.rotarydryerchina.com/en/products/efl.html>
- Mlýn - <http://www.cementmachinery.com/view.asp?prono=232>

3 Koncepce

3.1 Modelářská témata

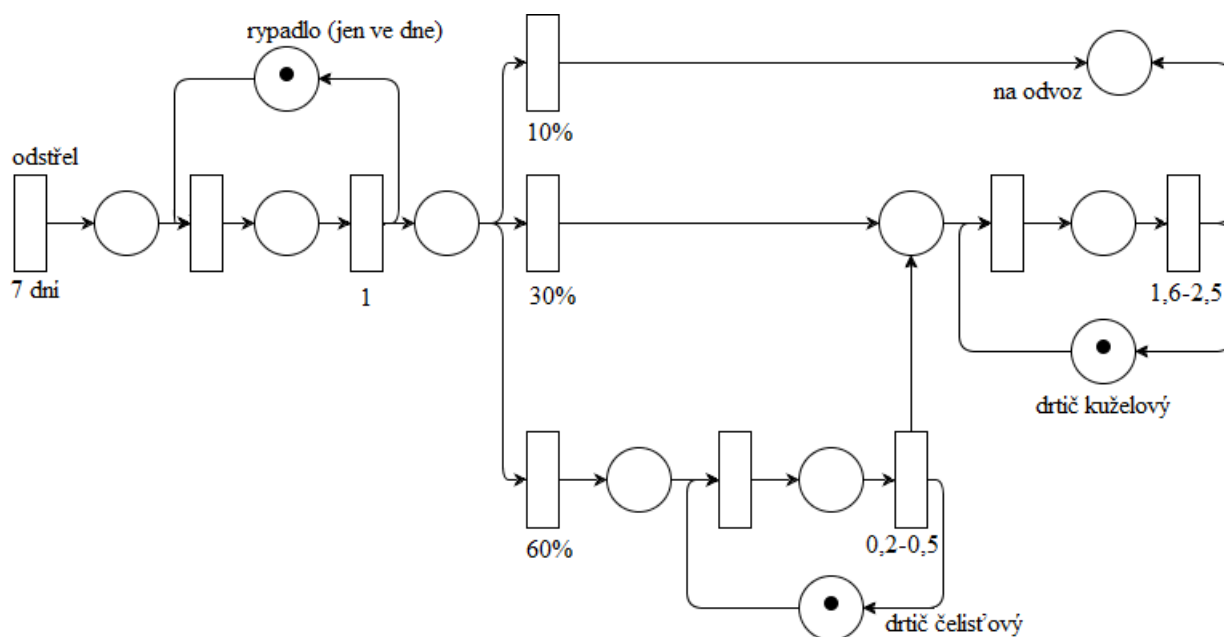
Konceptuální model (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 48) vychází z výše uvedeného popisu výroby cementu. Tato práce bude zaměřena hlavně na fungování vápencového lomu a dopravu surovin do cementárny. Další důležitou věcí bylo rozdělení pracovní doby v lomu na denní, noční a víkend (blíže v kapitole 4.1). Na obrázku 1 se nachází schéma cementárny, ze kterého jsme vycházeli při modelování. Procesy jako je homogenizace jsme zanedbali, protože neměly žádný vliv na tento model.



Obrázek 1: Schéma cementárny

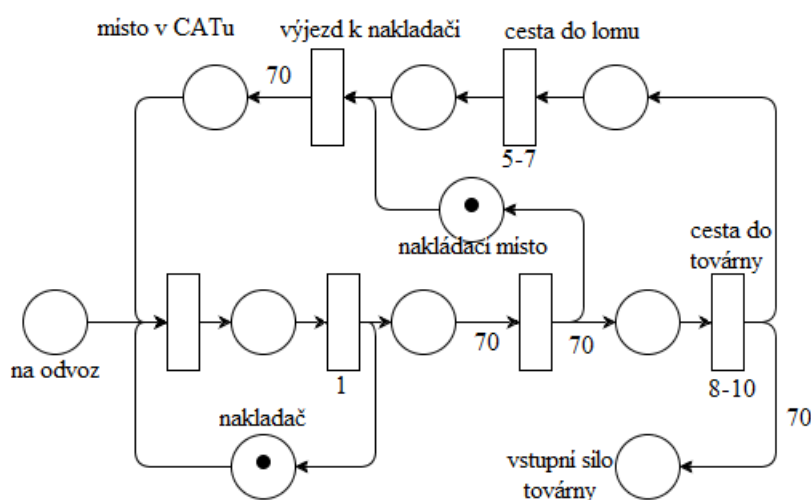
3.2 Abstraktní model

Na následujícím obrázku s první částí Petriho sítě (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 123) je vidět způsob fungování vápencového lomu. Generátor materiálu odstřel pracuje jednou za 7 dní, ostatní časy jsou v minutách. Zařízení rypadlo a oba drtiče pracují pouze ve všedních dnech (kvůli přehlednosti není na petriho síti znázorněno). Všechny vygenerované transakce (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 136) končí v místě na odvoz odkud pokračují do další části grafu.



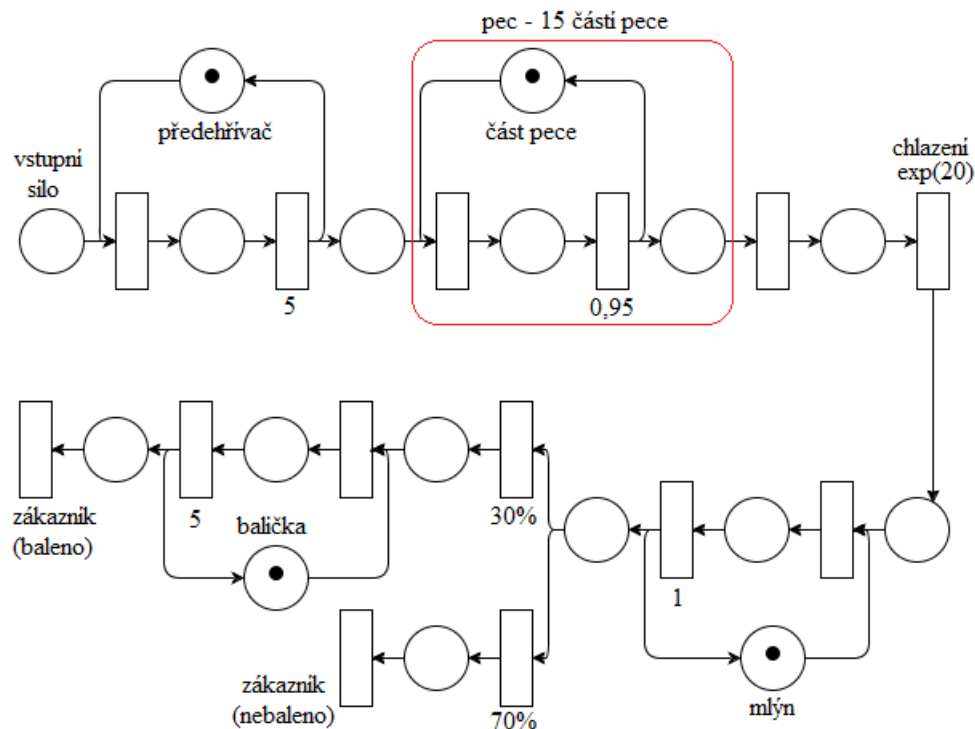
Obrázek 2: Petriho síť s vápencovým lomem (časové údaje v minutách)

Další částí Petriho sítě (Obrázek č. 3) je doprava. To zahrnuje naložení, cestu a vyložení nákladu. Opět je zde zařízení (nakladač) s denním a nočním provozem.



Obrázek 3: Doprava od lomu k cementárně (časové údaje v minutách)

Poslední částí (Obrázek č. 4) je samotná cementárna. Nejzajímavější je rotační pec, která je modelována jako 15 identických částí. V Petriho síti je pro přehlednosti uvedena jen jedna část barevně odlišená červeným obdelníkem, tato část by se ještě čtrnáctkrát za sebou opakovala.



Obrázek 4: Petriho síť cementárny (časové údaje v minutách)

3.3 Implementační témata

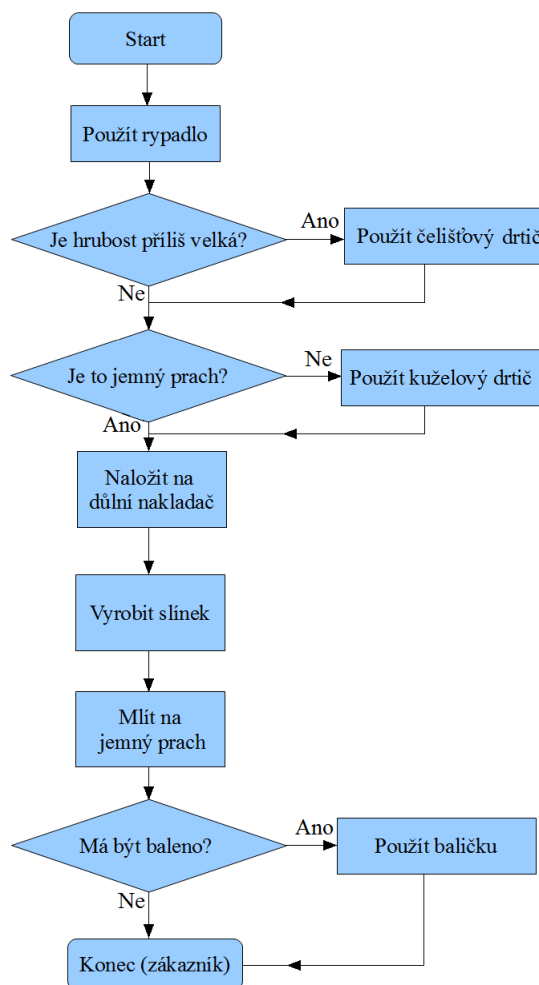
Algoritmus pro cestu z lomu do cementárny je zde popsán v pseudokódě.

```

Inicializuj pomocné proměnné
while (není volno) {
    Zaber nakládací místo
    if(nakladač != NULL)
        Aktivuj nakladač
    Čekaj na naložení
    Uvolni nakládací místo
    Jeď do cementárny
    while(je neprázdný)
        Vysyp náklad
    Vrať se do lomu
}

```

Základní jednotkou výroby v tomto modelu je tuna materiálu. Zpracování jedné tuny materiálu je popsáno vývojovým diagramem na obrázku č. 5.



Obrázek 5: Zpracování jedné tuny materiálu

4 Architektura simulačního modelu

Základními třídami v této práci jsou třídy *Ton*, *Ton_in*, *Noc*, *CAT* a *Odstrel*. Třída *Ton* představuje první část zpracování jedné tuny materiálu, tzn. lom a drcení. Třída *Ton_in* pak modeluje zpracování v cementárně. Rotační pec je implementována jako pole míst, to lépe vyjadřuje její spojitost. Třída *Noc* je popsána v následující podkapitole. Třída *CAT* je naložení surovin a cesta do cementárny. Třída *Odstrel* generuje množství surovin získaných v lomu.

4.1 Práce v lomu

Zadání práce bylo rozšířeno o střídání práce a volna v lomu. Volno nastává je-li noc nebo víkend, v ostatních případech se z lomu získávají suroviny. Proces *Noc* (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 121) je modelován jako prioritní (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 139) a obsazuje veškerá zařízení v lomu po dokončení právě běžícího procesu. Po uplynutí volného času jsou zařízení uvolněna a provoz lomu pokračuje.

4.2 Makefile

Po spuštění programu pomocí souboru *Makefile* se program *Cementarna* provede celkem devětkrát pokaždé s jinými parametry.

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

5.1 Postup experimentování a jednotlivé experimenty

Cílem simulačních experimentů je zjistit vytížení jednotlivých zařízení a upravit model tak, aby cementárna pracovala efektivněji. Bylo provedeno celkem devět experimentů, každý z nich trval tisíc dní modelového času (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 21). Statistika je v programu implementována třídou Stat (<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/index.php?id=8662>, slide č. 197).

5.1.1 Experiment 1

Po skončení běhu simulace prvního experimentu byly získány výsledky, které jsou uvedeny v tabulce 2. Hodnota, na kterou se zaměří další experimenty je průměrné vytížení pece. To je zatím jen kolem 13%, proto bude další experiment zaměřen na hledání místa v systému, kde lze zefektivnit přísun materiálu.

Rotační pec		Fronta k rotační peci	
Doba provozu	1 440 000 min	Průměrná délka	4
Počet požadavků	202 860	Průměrný čas ve frontě	2.375 min
Průměrné využití	13.3831 %	Nejdelší čekání	3.8 min

Tabulka 2: Vybraná statistika zatížení jedné části rotační pece

5.1.2 Experiment 2

Jak se možné vidět z tabulky 3 průměrné využití předeřívací pece je zhruba 0,7 tun materiálu, zatímco může zpracovávat až 5 tun. Problém se pravděpodobně bude nacházet ve výrobním řetězci ještě před ní.

Předeříváč		Jeho fronta	
Kapacita	5 t	Max. délka	65
Min. využitá kapacita	0 t	Průměrná délka	4.57861
Max. využitá kapacita	5 t	Nejdelší čekání	1 min 5 s
Průměrné využití	0.704388 t	Průměrný čas ve frontě	35 min

Tabulka 3: Statistika předeřívací pece

5.1.3 Experiment 3

Zde můžete pozorovat tabulku využití nakladače. Hodnoty jsou zkresleny tím, že odstávka po směně nebo přes víkend je modelována jako využití. Nicméně je vidět, že i zde je průměrná řada v řádu jednotek tun.

Důlní nakladač		Fronta	
Doba provozu	1 440 000 min	Max. délka	17
Počet požadavků	203 647	Průměrná délka	2.32518
Průměrné využití	93.0325 %	Průměrný čas ve frontě	36.8681 min

Tabulka 4: Statistika zatížení nakladače

5.1.4 Experiment 4

Podle statistik čelistový drtič pracuje dobře, zatímco kuželový nabírá zpoždění a pozdržel skoro polovinu materiálu. V dalším experimentu zkusíme přidat druhý.

Čelistový drtič		Fronta	
Doba provozu	1 440 000 min	Max. délka	1
Počet požadavků	207 233	Průměrný čas ve frontě	0.281457 min
Průměrné využití	81.0621 %	Max. čas	0.499403 min

Kruželový drtič		Fronta	
Doba provozu	1 440 000 min	Max. délka	141 159
Počet požadavků	169 231	Průměrný čas ve frontě	≈ 227 dní
Průměrné využití	99.9999 %	Max. čas	≈ 1 rok 94 dní

Tabulka 5: Statistika drtičů

5.1.5 Experiment 5

Po přidání druhého kruželového drtiče se situace zlepšila. Druhý kruželový drtič je využit pouze na 20 %. Dal by se tedy nahradit méně výkonným.

Kruželový drtič 1		Fronta	
Doba provozu	1 440 000 min	Max. délka	3
Počet požadavků	167 968	Průměrný čas ve frontě	5.92979 min
Průměrné využití	99.8592 %	Max. čas	≈ 2 dny 16 hodin

Kruželový drtič 2		Fronta	
Doba provozu	1 440 000 min	Max. délka	3
Počet požadavků	141 319	Průměrná čas ve frontě	1.00217 min
Průměrné využití	20.1254 %	Max. čas	5.50313 min

Tabulka 6: Statistika kruželových drtičů

5.1.6 Experiment 6

Pec zvýšila účinnost o 5 %. Pokračujeme dále v hledání možných zdržení.

Rotační pec		Fronta k rotační peci	
Počet požadavků	283 570	Průměrná délka	0.374155
Průměrné využití	18.7077 %	Průměrná čas ve frontě	2.375 min

Tabulka 7: Vybraná statistika zatížení jedné části rotační pece

5.1.7 Experiment 7

Nyní je materiál zdržen zde. Při dalším experimentu budeme zjišťovat, jak pomůže systému auto na dopravu materiálu navíc.

Důlní nakladač		Fronta	
Doba provozu	1 440 000 min	Max. délka	59 572
Počet požadavků	284 342	Průměrná délka	29 798.4
Průměrné využití	99.9999 %	Průměrný čas ve frontě	≈ 86 dní 18 hodin

Tabulka 8: Statistika zatížení nakladače

5.1.8 Experiment 8

Druhé auto na dopravu materiálu vyřešilo problém a nakladači odlehčilo. V následujícím experimentu opět zkontrolujeme vytížení pece.

Důlní nakladač		Fronta	
Doba provozu	1 440 000 min	Max. délka	9
Počet požadavků	343 906	Průměrná délka	6.54041
Průměrné využití	99.9999 %	Průměrný čas ve frontě	27.3549 min

Tabulka 9: Statistika zatížení nakladače

5.1.9 Experiment 9

Pec nyní zvedla výkonnost na 22,6 %. Nikde v systému se v tomto nastavení netvoří zbytečné fronty. V tomto okamžiku je výroba limitována převážně možnostmi lomu.

Rotační pec		Fronta k rotační peci	
Počet požadavků	343 140	Průměrná délka	0.452754
Průměrné využití	22.6377 %	Průměrná čas ve frontě	2.375 min

Tabulka 10: Vybraná statistika zatížení jedné části rotační pece

5.2 Závěry experimentů

Bylo provedeno celkem 9 experimentů, během těchto experimentů se zdokonalila znalost o systému. Zjistilo se, kde se tvoří zbytečné fronty a systém je zdržován. Provedla se úprava modelu, byla přidána dvě zařízení. Dalšími experimenty podobného charakteru by se pravděpodobně došlo k dalším zlepšením výroby.

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

V rámci projektu vznikl nástroj ke sledování výroby cementu, který umožňuje experimentálními metodami zjišťovat důležité hodnoty o systému. Z výsledků experimentů vyplývá, že vytíženost klíčové části cementárny, tzn. rotační pece, je 22,6 %. Činnost cementárny je rovněž ovlivňována možnostmi lomu, který poskytuje potřebné suroviny.