

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

INFORMAČNÍ TECHNOLOGIE



Modelování a simulace

Simulační studie k projektu

Varianta č. 2 - Výrobní proces z oblasti: potravinářské

Autor:
Tomáš HOLÍK

Datum:
22. listopadu, 2017

1 Úvod

Úkolem této práce je sestavení simulačního modelu systému SHO výrobní linky v potravinářském nebo elektrotechnickém průmyslu. Mnou vybraná výrobní linka je výroba piva a základních surovin pro výrobu piva. Konkrétně výroba ležáku, polotmavého piva a světlého piva. Na konceptuálních a simulačních modelech je ukázán postup výroby piva v moderních velkých pivovarech s konkrétními daty získaných z exkurzí, z knih nebo technických dokumentů a s daty odvozenými podle typických postupů výroby piva z knih.

Na základě těchto modelů a simulačních experimentů bude prováděno sledování zatížení jednotlivých částí systému při nezávislé výrobě jednotlivých surovin pro pivo. Hlavním cílem experimentů pak bude snaha o plynulou výrobu piva bez čekání na suroviny a bez vytváření front, podle změny opakování výroby várek, urychlení určitých částí výroby, pokud to je možné či navýšení počtu těchto strojů. Kromě zatížení a efektivity se také bude sledovat množství odpadu ve výrobě.

1.1 Zdroje faktů

Autorem této práce je student třetího ročníku bakalářského studia na Fakultě informačních technologií: Tomáš Holík (xholik13). Základní informace k postupu výroby piva, informace o kapacitě strojů a dalších zařízeních, byly získány na základě dvou exkurzí v pivovarech. V jednom pivovaru následně došlo i k interview pracovníka pivovaru pro získání podrobnějších informací o pivovaru i o konkrétních procesech výroby. Další informace byly čerpány z odborné literatury a technických dokumentů, mezi které patří:

1. Kniha: Technologie výroby sladu a piva - výroba sladu, mladiny, varní vody a piva, hodnoty spotřeby surovin na určitou jednotku piva[1],
2. Kniha: Velká kniha piva: vše o pivu - obecné informace o procesu výroby piva[2],
3. Diplomová práce: Výroba piva, téma výuky a zájmové činnosti - výroba varní vody, výroba sladu, postup výroby u velkých pivovarů[5],
4. Bakalářská práce: Technologie výroby piva v pivovaru Ostravar - konkrétní hodnoty k výrobě várek surovin a piva[6],
5. Seminární práce: Výživy hospodářských zvířat - odpad z výroby surovin[10]

1.2 Ověření validity

Při ověřování validity jsem čerpal z výše uvedených zdrojů. Mnou vytvořený model se zakládá na hodnotách z odborných publikací, hodnot z velkých pivovarů a z exkurze v těchto pivovarech. Také z interview se sládkem, který má mnoholetou zkušenost v odvětví pivovarnictví.

2 Rozbor tématu a použitých metod/technologií

Typický velký pivovar se dá rozdělit do čtyř částí

1. výroba sladu,
2. výroba mladiny,
3. hlavní kvašení a zrání piva,

4. filtrace, stáčení a expedice

Výroba sladu, mladiny, hlavní kvašení a zrání piva, filtrace a stáčení pracují nezávisle. Jedinou závislostí je zásoba dané suroviny v kádích, silech nebo v tancích pro další postup výroby.

2.0.1 Výroba sladu

Při výrobě sladu jsem se rozhodl k použití strojů, které se používají v moderním velkém pivovaru, s kapacitami na základě typického exempláře tohoto typu stroje. Příjem ječmene je řešen ignorováním příjmu ječmene od pěstitelů nebo obchodních organizací. Ječmen bude generován ze zásoby, kterou tito dodavatelé doplňují podle potřeby. Logistika v tomto modelu je řešena pouze interně, zaměřením je hlavně na proces výroby surovin na výrobu piva.

Postup výroby sladu:

1. Doprava ječmene šnekovým dopravníkem rychlostí přibližně 20-40kg/min. Maximální kapacita je vyšší (až 20t/h) [14].
2. Čištění a filtrace sítím. Čištění probíhá v nejvyšších patrech sladovny v aspirátoru. Z aspirátoru ječmen putuje přes síto, který ječmen roztrídí. Zrna s průměrem nižším než 2,2mm propadávají sítím [1, str. 46]. Tyto zrna se nazývají výčist a jsou odpadem - používají se jako krmivon [10, str. 5]. Výčist představuje 2-8% z celkové váhy ječmene podle ročníku [str. 46][1]. Zbytek ječmene se skladuje v sítích.
3. Máčení pomocí kónického náduvníku. Typický kónický naduvník má kapacitu 50t. Do náduvníku se opakovaně napouští a vypouští voda. Před každým vypouštěním se z povrchu vody odstraňuje ječmen nebo jemné nečistoty, které vyplavaly, odsáváním nebo mechanickým způsobem. Tyto nečistoty se nazývají splavky a tvoří přibližně 2% z hmotnosti ječmene. K máčení se používá neutrální voda. Na rychlost máčení má vliv teplota vody a velikost zrna [1, str. 58]. Při každém napouštění se pokaždé volí jiná teplota vody - 12-25°C Obvykle probíhají 3 napouštění a vypouštění celková doba od 36-48h. Čím vyšší teplota vody, tím je klíčení rychlejší, ale je také větší spotřeba energie. Spotřeba vody je $4 - 6m^3 \cdot t^{-1}$. Z toho je 70% voda odpadní, která se používá k závlaze.
4. Klíčení v pneumatických sladovadlech - Saladinova skříň. Cílem klíčení je tvorba a aktivace enzymů a odbourávání látek při růstu zrna. Klíčení se rozděluje na několik stádií klíčení - mokrá hromada, suchá hromada, mladík a zelený slad. Při klíčení se zrna provzdušňují a kropí vodou o zvyšující se teplotě od 12 do 18°C. Délka klíčení je typicky 4-7dny.
 - (a) Mokrá hromada - ječmen je vymočený na humna nebo do jiných speciálních klíčidel.
 - (b) Suchá hromada - stadium do 24 hodin po vymáčení, objevuje se první hlavní zárodečný kořínek, hromada vyžaduje přívod vzduchu.
 - (c) Mladík - nejdůležitější fáze klíčení, zrno intenzivně dýchá; intenzivně probíhají enzymatické přeměny.
 - (d) Zelený slad - na závěr klíčení musí být hromada kropena vodou, hromada dále uvadá a fáze klíčení je ukončena transportem (nastíráním) zeleného sladu na hvozdu.

Z 100kg ječmene je průměrně 140kg zeleného sladu. Typická Saladinova skříň má kapacitu 200tun-280tun [3].

5. Hvozďení v dvouliskovém hvozdu. Cílem je převést zelený hvozď s vysokým obsahem vody do skladovatelného a stabilního stavu, zastavit životní pochody v zrně a vytvořit aromatické a barevné látky charakteristické pro druhy sladu. Zelený slad není v důsledku vysokého obsahu vody skladovatelný, snížením obsahu vody během hvozďení se slad stává skladovatelným a stabilním. Tedy je nutné do 24 hodin zelený slad použít. Maximální zátěž hvozďů se pohybuje mezi 40 až 200kg zeleného sladu na $1m^2$, kde celková kapacita je $400m^2$ - $600m^2$.

Druhy sladů a jejich průběh hvozďení:

- Bavorský proces - předsušení po dobu 30 hodin při teplotě $45-55^{\circ}C$, to sníží procento vody na 10. Následné vyhřátí po dobu 6h při teplotě $55-75^{\circ}C$, což sníží procento vody na 5. Poslední částí je dotahování při teplotě $105^{\circ}C$ po dobu 4h, což sníží množství vody na 4%. Následně dochází k rychlému zchlazení vzduchem.
- Plzeňský proces - sušení po dobu 12 hodin při teplotě $55^{\circ}C$, to sníží procento vody na 10. Následné vyhřátí po dobu 12 hodin při teplotě $85^{\circ}C$, což sníží procento vody na 4. Následně dochází k rychlému zchlazení vzduchem.
- Karamelový proces - předsušení po dobu 40 hodin při teplotě $45-75^{\circ}C$, to sníží procento vody na 8. Následné vyhřátí po dobu 4h při teplotě $75-105^{\circ}C$, což sníží procento vody na 4. Poslední částí je dotahování při teplotě $160^{\circ}C$ po dobu 2h, což sníží množství vody na 2%. Následně dochází k rychlému zchlazení vzduchem [5].

Ze 100kg zeleného sladu je 78kg vysušeného sladu. [1].

6. Odkličování v odkličovačce a skladování sladu do sladových sil. Při odkličování se získává nejčennější odpad sladový květ. Ze 100kg ječmene se získá 3 až 5kg sladového květu. Následně se odklíčený slad dopravuje do sil pro uskladnění a další použití [1, str. 87]. V těchto silech je třeba mít kapacitu až na 4 týdny výroby.

2.0.2 Výroba mladiny

Pro výrobu mladiny je nutný slad. Množství nutného sypání (kombinace sladů) pro várku mladiny se vypočítá podle vzorců:

Nejprve je třeba získat hmotnost extraktu v mladině, jež potřebujeme získat. Nechť EPM je extrakt původní mladiny [kg], V_m objem mladiny v kvasné nádobě [l], OG původní hustota mladiny a P_m stupňovitost mladiny [$^{\circ}P$].

$$EPM = 0,9982 \cdot V_m \cdot OG \cdot \frac{P_m}{100}$$

Nyní můžeme vypočítat množství potřebného sypání. Nechť EPM je extrakt původní mladiny [kg], m_c je výsledné množství [kg], E je extraktivnost sladu a EF_v je váha tohoto sladu (procentuální množství v sypání).

$$m_c = \frac{EPM}{E_1 \cdot EF_{v1} \cdot E_2 \cdot EF_{v2} \cdot \dots \cdot E_n \cdot EF_{vn}}$$

Z těchto vzorců jsem zjistil, že pro výrobu 600hl mladiny (várky v pivovaru) pro polotmavé pivo je nutné 8600kg sypání - 860kg karamelového a 7740kg světlého sladu. Kde extraktivnost světlého sladu (plzeňského typu) je 0,805 a extraktivnost karamelového je 0,78. Stupeň polotmavého bude 11.

Pro světlé je nutné 7700kg světlého sladu a pro ležák 9530kg. Kde požadovaný stupeň pro světlé je 10 a pro pežák 12. Extraktivnost bavorského sladu (pro ležák) je 0,78.

V reálném prostředí se tyto údaje mírně liší. Například extraktivnost je nižší než v laboratorním prostředí, kde tyto údaje byly měřeny. Velké pivovary si tyto údaje měří sami a na základě nich si vytváří tabulky extraktivnosti a dalších údajů. Typická extraktivnost ve velkých pivovarech je 98% laboratorního výsledku. K získání informací o vzorcích a jednotlivých sladech jsem využil [2] a [1].

Výroba mladiny často probíhá plně automatizovaně pomocí strojů, je nutný pouhý jeden technik, který kontroluje údaje. Případně mu stroj sám signálem poví, co je potřeba dále.

Postup výroby mladiny:

1. Sypání přepravené ze sil se dopravuje řetězovým dopravníkem, aby nedošlo k poškození sladu. Při přepravě dochází k čištění sladu pomocí magnetu, který odstraňuje jemné kovové částice a prachovým filtrem, který odstraňuje jemný prach.
2. Šrotování na suchém šrotovníku. Ve velkých pivovarech se obvykle používá šestiválcový šrotovník, který dokáže sešrotovat celou várku za 1h až 90 minut. Jednotlivé válce šrotují sypání od celých zrn až po jemnou krupici. U šrotovníku musí být zásobník s kapacitou na odchozí krupici [1, str. 120].
3. Vystírání a rmutování v rmutovací a vystírací kádi. Úkolem vystírání je smíchat krupici sypání s varní vodou o teplotě 35-45°C. Základním úkolem rmutování je převést do roztoku veškerý škrob i vhodný podíl bílkovin, zvýšit podíl cukru a dalších látek. Kapacita vystírací a rmutovací kádě musí být až čtyřnásobná v porovnání s kapacitou sladu rozmýchaného ve varní vodě.

Objem vody nutné při scézování a rmutování se vypočítá podle vzorce:

Nechť V_{vz} objem nálevu (tj. vystírací a zapařovací vody) [hl], G_s hmotnost sladu [100 kg], E_s je extraktivnost sladu [%], E_z ztráta extraktu laboratoř/varna [%] a K_p požadovaná koncentrace předku [%].

$$V_{vz} = \frac{G_s(E_s - E_z) \cdot (100 - K_p)}{100 \cdot K_p}$$

Na várku pro světle pivo bylo použito 7700kg sladu, extraktivnost je 80,5%, požadovaná koncentrace předku 14% a ztráta extraktu je přibližně 1%. Je tedy nutné 380 hl varné vody. Pro ležák 390 hl a pro polotmavé 311hl.

V simulovaném pivovaru je tzv. dvourmutový postup. Kdy se bere z vystírací kádě 1/2 vystírky a přidává se v rmutovací kádi, následně po vyhřátí se tato polovina vrací zpět do vystírací kádě. Následně se z vystírací bere znovu polovina, která se vyhřeje a vrací zpátky. Tímto se ohřeje i vystírka ve vystírací kádi, která se po vracení druhé části vyhřeje na odrmutovací teplotu (75-80°C).

Postup:

- (a) Vystírá se při teplotě 37°C.
- (b) První část hustého rmutu se spouští do rmutovací pánce a ohřívá se s gradientem 1°C za minutu na teplotu 52°C, poté následuje odpočinek 10 min. Následuje druhá fáze ohřevu, ohřívá se s gradientem 1°C na 63°C. Poté následuje 10-20min odpočinek. Následně se rmut zvolna vyhřeje (gradient 0,7 °C za minutu) na teplotu 72-74 °C, při které obvykle během 5-10 min dokonale zcukří. Po zcukření se rmut co nejrychleji (gradient 1,5 °C za minutu) uvede do varu a vaří 15-20 min. Pomalým vracením povařeného rmutu do vystírací pánve při rychlém chodu míchadla se dosáhne v celém objemu díla nižší cukrotravné teploty 62-64 °C.

- (c) Druhý, rovněž hustý rmut se zcukří při 72–74 °C a povaří 15 min. Po jeho vrácení se dosáhne odrmutovací teploty 75–78 °C. Pro podporu pěnivosti je možno snížit objem druhého rmutu tak, aby po jeho vrácení teplota vzrostla pouze na 70–71 °C, při které se zařadí prodleva 20–30 min. Následně se parním ohřevem dílo dohřeje na odrmutovací teplotu.

Výsledkem rmutování je rmutovací dílo. Informace získané z [1] a [3].

4. Scézování v scézovací kádi. Cílem scézování je rozdělit složky v rmutovacím díle, které se skládá z mláta - husté suspenze a vodného roztoku extraktivních látek - předek. Dílo se do scézovací kádě přečerpává spodem potrubím, které se rozdělí, aby se čerpalo rovnoměrně. Přečerpá se předek. Kypřidlo následně zkypruje mláto, takto se docílí rovnoměrnému vyslazení mláta. Vyslazování probíhá vstřikováním varné vody o teplotě 75°C z několika hlavic. Po vyslazení následně dochází k postupnému odfiltrování sladiny. Po odfiltrování sladiny se scézovací kád vyplachuje a odstraňuje se mláto. Zaplavení dna varnou vadou trvá 2min, čerpání díla, cirkulace kypřidla 5 min, vyslazování 110min, odkap, výhoz a výplach kádě 18min. Celkově trvá scézování v moderní scézovací kádi od 100 do 130 min. Na 100kg sypání je přibližně 120l mláta.
5. Chmelovar v mladinové pánvi. Cílem je vařit sladinu s chmelem. Výsledkem je horká mladina. V chmelovaru dochází k fyzikálně-chemickým změnám, které stabilizují koncentraci a složení mladiny. Před vařením mladiny se připravuje chmel do dávkovacích nádob ze kterých se chmel dávkuje do mladiny. Kapacita mladinové pánve je o 30 až 50% vyšší než objem mladiny kvůli potenciálnímu vzednutí hladiny při varu. K ohřívání mladiny se používá vnitřní vára, který obsahuje trubkové výměníky, které přivádí páru. Z tohoto důvodu vznikají teplotní rozdíly až 20°C, které lze eliminovat čerpadlem. Dávka vysokoobsažného a aromatického chmele je přibližně 30kg od každého na 600hl mladiny [3][2]. Doba varu v atmosferickém chmelovaru trvá v rozmezí 60-120 minut. Skládá se z několika fází, kde se postupně zvyšuje teplota od 75°C až na 110°C. Nejprve se přidává vysokoobsažný chmel a ke konci v poslední fázi se přidává aromatický chmel.
6. Odlučování kalů ve výřivé kádi a chlazení v chladiči. Do výřivé kádě se tangenciálně vhodnou rychlostí načerpává mladina. Tím dochází k rotačnímu pohybu, při kterém se hořký kal shromažďuje ve středu dna nádob, kde postupně vytváří kalový kužel. Po zpomalení pohybu se mladina odtahuje ze strany válcového pláště a posléze z kraje dna nádoby. Při správném provozním režimu představuje zadržený chmel v kalech pouze 1% z celkového objemu várky. Po odlučování se mladina musí zchladit v jednostupňovém chladiči. Mladina se chladí předem předchlazenou varní vodou o teplotě 2-3°C. Doba odlučování kalů a chlazení mladiny by neměla překročit 60min. Množství odlučeného kalu je přibližně 800mg na litr mladiny [1] [5].

Po 32 várkách obvykle dochází k sanitární přestávce na čištění kádí. Po 8 várkách se čistí mladinová pánev.

2.0.3 Hlavní kvašení a zrání piva

Cílem kvašení piva je řízená přeměna sacharidů na alkohol a CO_2 a současné vytváření vhodných organoleptických vlastností piva. Při kvašení je vytvářen chuťový charakter piva.

Prostor, kde probíhá kvašení piva, se nazývá spilka. Tato místnost musí být větrána tak, aby se v ní nehromadil CO_2 . Chladí se celý prostor a současně jsou chlazeny samostatně i jednotlivé kádě. Objem kádě je ve vybraném pivovaru 200hl. Součástí spilky je místnost pro uchování kvasnic, ve které jsou skladovány a ošetřovány kvasnice. V zařízení je udržována teplota pod 5°C. Typický velký pivovar má kapacitu kádi podle velikosti várky, pohybuje se

od 100-500hl a celková kapacita spilky je až 50000hl. Modelovaný pivovar má kapacitu od 150-250hl a celkovou kapacitu 24000hl [6].

Zakvašení a provzdušňování. Cílem je distribuce kvasinek do celého objemu zchlazené mladiny a zvýšení obsahu rozsahu puštěného kyslíku tak, aby optimálně nastartoval metabolismus kvasinek. Mladina je transportována do kvasných kádí samospádem, při transportu je zároveň zakvašována a provzdušňována. Spilka je často v podzemních prostorech. Celková doba hlavního kvašení je obvykle 6-10 dní a počet dnů by měl být stejný nebo nižší než původní extrakt stupňovitosti mladiny.

Stádia hlavního kvašení:

1. První vizuální projevy hlavního kvašení se objevují po 12 až 24 hodinách. Na povrchu mladiny se objevuje pěna. Jedná se o stádium zaprašování a odrážení.
2. Další stadium nízkých bílých kroužků obvykle začíná 24 až 36 hodin po naplnění kádě. Na povrchu kvasící mladiny se vytváří typické bílé růžice pěny. Toto stadium je provázeno intenzivním vývojem tepla, je dosaženo maximální teploty kvašení (obvykle 8 až 12 °C), která musí být udržována chlazením po dobu dvou dnů a pak je zahájeno zchlazování. Rychlost zchlazování má být 1 °C za den, aby nebyl narušen průběh kvašení.
3. V dalším stádiu, které se nazývá propadání, se snižuje intenzita kvašení (úbytek zdánlivého extraktu je 0,2 až 0,3% za 24 hodin). S tím je spojeno snižování výšky pěny na povrchu kádě. Na konci tohoto stadia zůstává na povrchu mladiny nízká (cca 2 až 3 cm) a tmavá vrstva pěny – deka. Kvasná deka obsahuje vyloučené látky, kvasnice a kontaminanty. Kvasná deka se sbírá pomocí děrované lžice (průměr otvorů cca 2 mm), a tím jsou odstraněny nežádoucí látky, které by při propadnutí deky mohly způsobit nepříjemnou hořkost piva. Sbíráni deky se někdy provádí opakovaně 1 den před sudováním a těsně před sudováním.

Na konci kvašení se kvasnice shlukují na dně kádě, které se sbírají a používají se na další zakvašení. Při kvašení dochází k určitým objemovým ztrátám, tyto ztráty se pohybují mezi 2 a 3%. Na 300hl mladiny odpovídá zásobník kvasnic s objemem 10hl [6] [3].

Optimální způsob transportu mladého piva je využití samospádu pomocí potrubí o co nejkratší délce. Teplota mladého piva na zrání se pohybuje od 4 do 6°C. Po transportu musí dojít k sanitačnímu čištění kvasných kádí.

Prostor ve kterém probíhá dokvašování - zrání piva se nazývá ležácký sklep. Sklep musí být větrán, aby se v něm nehromadil CO_2 . Teplota je udržována na -2 až 3°C. Pivo je skladováno v ležáckých tancích - ležaté válcovité nádoby uložené do spádu k výpustnímu otvoru. Objem kolísá od 100 do několika tisíc hl. Samotné zrání probíhá od 21 dnů do 90 dnů u ležáků. Modelovaný pivovar má kapacitu tanku od 175-280hl a celkovou kapacitu 56000hl [6]. Po vyprázdnění tanků se musí tank vyčistit od kvasnic. Následně se pivo přepravuje na filtraci a stáčení.

2.0.4 Filtrace, stáčení a expedice

Cílem filtrace je upravit pivo před stáčením tak, aby se po dobu několika měsíců nezměnila jeho čírost v transportním obalu. Na filtraci se používají křemelinové filtry. Křemelína se skládá z drobných skořápek pravěkých rozsivek a z oxidu křemičitého. Průtočnost křemelíny je přímo úměrná její jemnosti. V důsledku toho platí, že čím jemnější křemelíny použijeme, tím ostřejší filtraci docílíme. Jako filtr se používá naplavovací svíčkový filtr. Samotný proces filtrace trvá mezi 18-30 hodinami [1]. Filtrované pivo se uskládňuje v přetlačných sklepech. Kde se vytváří zásoba před jeho plněním do lahví nebo plechovek.

Stáčení ve stačírňách. Sestava strojů a zařízení funkčně seřazenou, propojenou dopravníky (lahví, přepravek a palet), určenou k zajištění operací spojených s plněním lahví, v rozsahu od vstupu prázdných lahví až po výstup plných lahví (v přepravních obalech nebo na paletách) nazýváme souhrnně stáčírnu. Aby bylo při provozu možno dosahovat optimálního výkonu celé linky, nemůže být nastavený výkon všech strojů stejný. Základním strojem linky, je vždy plnič, jehož výkon je vždy 100% a všechny stroje přes plničem se nastaví podle plniče. Ve velkých pivovarech toto probíhá automaticky. Ve stačírňách se prosazuje robotizace. Kde se roboti starají jak o nakládání, tak o vykládání. Částí stáčírny je také mokrá část, kde dochází k čištění vratných lahví na znovupoužití. Kapacita jednoho plniče je 500 až 540 za hodinu, plnění jedné lahve tedy trvá přibližně 7 sekund [1]. Praktické zkušenosti doporučují jako provozně vhodné výkony kolem 30 000 lahví za hodinu, pro vyšší výkony se pak některé stroje zdvojují.

Před plněním je tzv. pasterace, což je tepelné ošetření piva s cílem zvýšit jeho biologickou trvanlivost. Paster dokáže zpracovat až 200h piva za hodinu [1]. Kde na pivo působí po dobu 1 minuty vysoká teplota 70°C. Poté pivo teče dále do plniče. Naplněná lahev, poté pokračuje do dalších strojů, které láhev připraví k expedici.

Typický velký pivovar má mezi 40-100 auty, podle velikosti várky mladiny, které pravidelně vyváží pivo ke svým zákazníkům nebo klientům. V modelu pivovaru je 60 aut, každé s kapacitou na 24000 lahví. Předpokládá se vyvážecí doba mezi 12-24h.

2.1 Popis použitých postupů

Pro vytvoření mého modelu jsem využil knihovny SIMLIB/C++ [11]. Jedná se o objektově orientovanou knihovnu pro jazyk C++. Tato knihovna patří mezi základní nástroje pro simulaci.

2.2 Popis původu použitých metod/technologií

Veškeré použité algoritmy, konstrukce a datové struktury, které jsem použil v tomto projektu byly získány z předmětu Modelování a simulace, z prezentací pro první a druhé cvičení z tohoto předmětu, dokumentace a příkladů knihovny SIMLIB/C++.

3 Koncepce - model

Cílem tohoto modelu je simulovat výrobu surovin pro výrobu piva. Každá část modelu, pracuje nezávisle a spojené jsou pouze vyprodukovaným produktem. Tento model simuluje výrobu třech druhů piv - ležáku, polotmavého a světlého piva. Sledovat zatíženost jednotlivých linek a pokusit se o maximální zatížení každé z nich bez vytváření front. Kromě zatíženosti také sleduje odpad z výroby piva, průměrné množství je podle přesných informací z knihy [1].

Zanedbání a zjednodušení v modelu:

1. Neovlivnitelné faktory - jako jsou přírodní katastrofy apod..
2. Problémy při expedici nebo dodávání surovin. Velké pivovary si často vytvářejí zásoby, které tyto příhody mitigují, ve výsledku nebudou mít na model vliv. Problémy při expedici by byly redundantní pro model a neměli by na výsledný model vliv.
3. S veškerým odpadem při výrobě se nijak dále nepracuje. Pro model by bylo redundantní zpracovávat odpad, který se dále ve výrobě nepoužívá.
4. Čištění po určitém počtu várek a sanitární směna v závěru týdne. Smyslem modelu je modelovat zatížení při provozu a zvýšit efektivitu. Přestávky na čištění a sanitární směna

by výsledky zkreslily. V modelu bude předpokládán nepřetržitý provoz. Jediné čištění bude okamžitě po várce.

5. Celkové zjednodušení procesů v jednotlivých strojích. Například scézování je proces, který se skládá z mnoha etap. Pro zjednodušení těchto procesů jsem mnohé procesy ohodnotil pouze průměrnou dobou obsazení tohoto stroje nebo určitým časovým rozmezím doby obsazení stroje, pro co nejdůvěryhodnější výsledky.
6. Zprůměrování potřeby varné vody pro várku. Pro každý typ piva, je nutné jiné množství varné vody na rmutování a vyslazování, v modelu je toto množství zprůměrováno. Rozdíl je naprosto marginální, že to na výsledném model nebude mít vliv.
7. Ztráta objemu mladiny při hlavním kvašení. Ztráta je natolik malá (2%), že by ve výsledném modelu měla minimální vliv.
8. Poruchy při výrobě. Poruchovost strojů je v řádu 1 na 1000 várek a výsledný model by pouze zkreslovaly.
9. Zprůměrování kapacit kvasných kádi, tanků pro zrání a sil pro slad. Velikosti jsou často v rozsahu až 100hl, avšak toto by nebylo možné modelovat v petriho sítích. Proto jsem zprůměroval hodnoty, aby odpovídaly celkové kapacitě velkého pivovaru.
10. Zprůměrování doby kličení, je třeba mít konzistentní dobu příchodu na hvozdu, jinak může dojít k velkým maximálním frontám z menadálého příchodu velkého množství zeleného sladu v jeden moment.
11. Ve skutečném pivovaru se vyrábí mnoho druhů piva, každé má lehce jiný proces výroby, jinou délku zrání apod.. V rámci modelu jsem si zvolil 3 druhy piva, které představují příklad jednoho typu piva.
12. Pro várku polotmavého sladu je třeba 7740 kg, avšak v modelu je to 7770 stejně jak pro plzeňské pivo. Tento rozdíl je natolik marginální, že jsem se ho rozhodl v modelu ignorovat (bude silnější mladina).

3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

Konceptuální model výroby je rozdělen do více částí pro zvýšení přehlednosti. Rozdělení je stejné jak u rozdělení velkého pivovaru + spojení těchto částí řídicím modelem. Každý proces vyjadřuje to, co bylo popsáno v rozboru tématu a použitých témat. Se zjednodušeními popsanými v minulé kapitole.

3.1.1 Řídicí model pro tvorbu várek

Na obrázku č. 2 je uveden řídicí model. V levé části je řízení doby nové várky určitého piva. Tedy v základním modelu bez úprav se budou vytvářet 3 várky ve formě transakce[12, str. 136] mladiny světlého, 1 várka polotmavého a 1 várka ležáku. Další várka se vygeneruje každých 6 hodin. Každá várka mladiny vytvoří zásobu mladiny v množství 600hl na várku. Hotová mladina se zpracovává v hlavním kvašení, která produkuje mladé pivo. Mladé pivo poté zraje v tancích. Po dozrání se pivo filtruje, stáčí a expeduje.

3.1.2 Výroba sladu

Na obrázku č. 1 je uveden proces výroby sladu. Příchod ječmene je dán exponenciálním rozdělením[12, str. 91]. Exponenciální rozdělení je simulace dopravování šnekovým dopravníkem ječmene ze zásob. Řešení hvozdní podle požadovaného typu sladu je ve formě procentuálního rozdělení, které je dáno potřebným sladem na výrobu várek. Výstup výroby sladu je slad o požadované hmotnosti na várku mladiny.

3.1.3 Výroba mladiny

Na obrázku č. 5 je uveden proces výroby mladiny. Vstup přichází z řídicího procesu - sypání. Výstup systému je mladina v hektolitrech - várka je 600hl. Podle této várky je měřena potřebná varná voda a sypání.

3.1.4 Hlavní kvašení

Na obrázku č. 3 je uvedeno hlavní kvašení. Vstupem je mladina z řídicího procesu a výstup systému je mladé pivo v kapacitě jednotlivé kádě - 200hl.

3.1.5 Filtrace, stáčení a expedice

Na obrázku č. 4 je uvedena filtrace, stáčení a expedice. Vstupem je nefiltrované pivo z řídicího procesu. V systému se provádí expedice auty, které převáží pivo v lahvích ze systému.

3.1.6 Expedice přebytečného sladu

Na obrázku č. 6 je uvedena expedice přebytečného materiálu. Při výpočtech potřebného množství na výrobu mladiny a vyprodukovaného množství bude v určitých případech produkováno více sladu než spotřebovaného sladu, tedy se tento přebytečný slad prodává.

3.2 Formy konceptuálního modelu

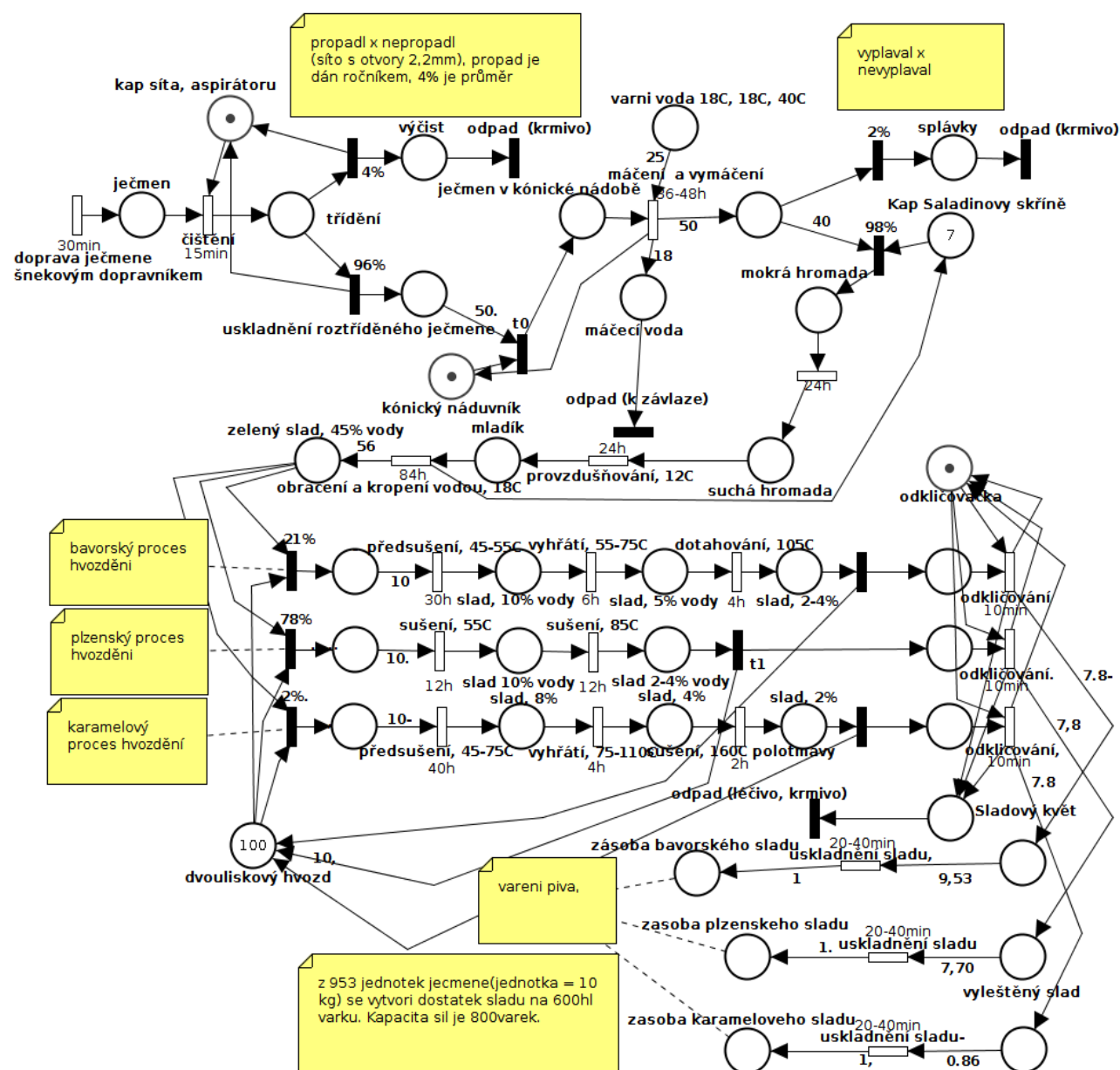


Figure 1: Proces výroby sladu.

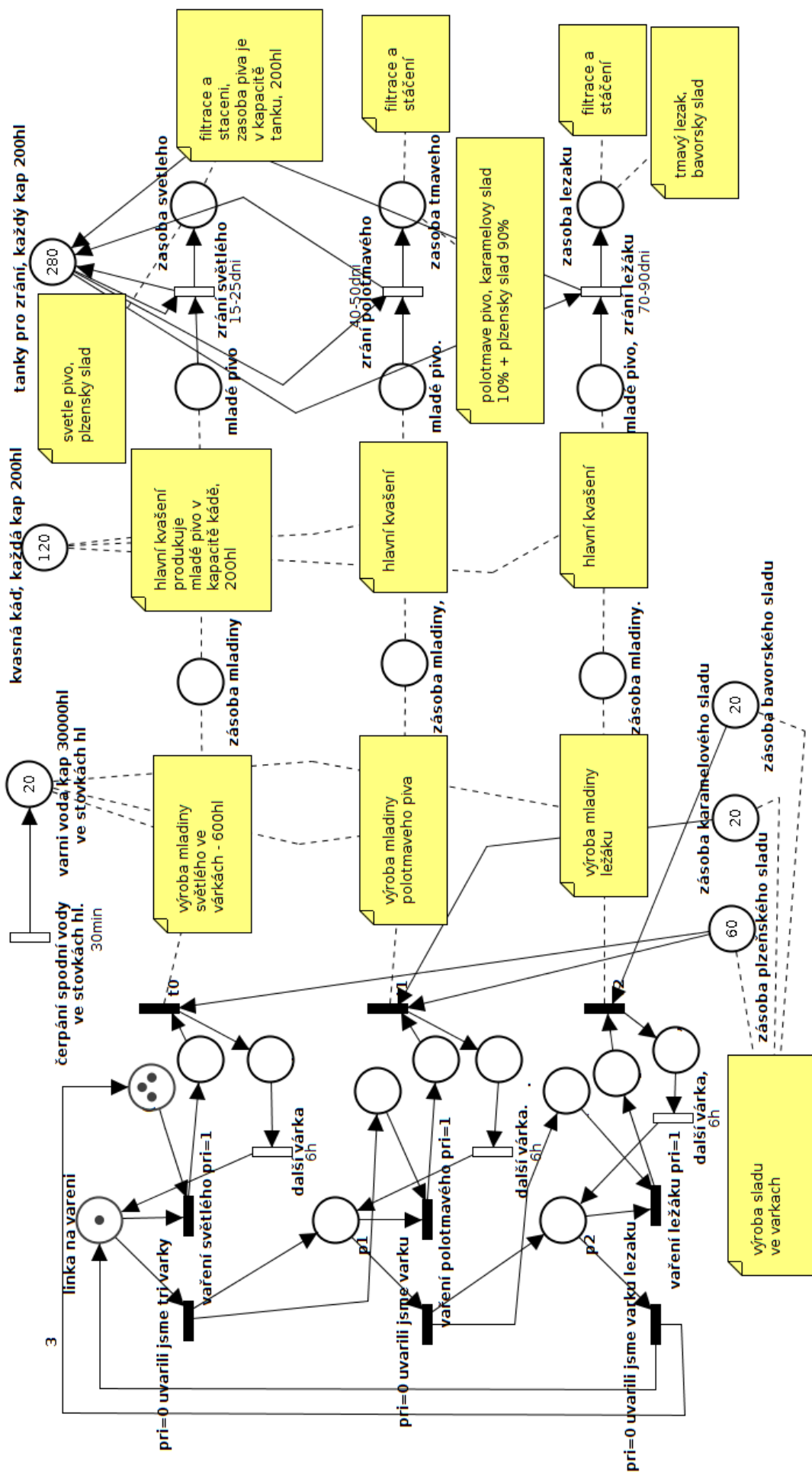


Figure 2: Řídicí model pro tvorbu várek

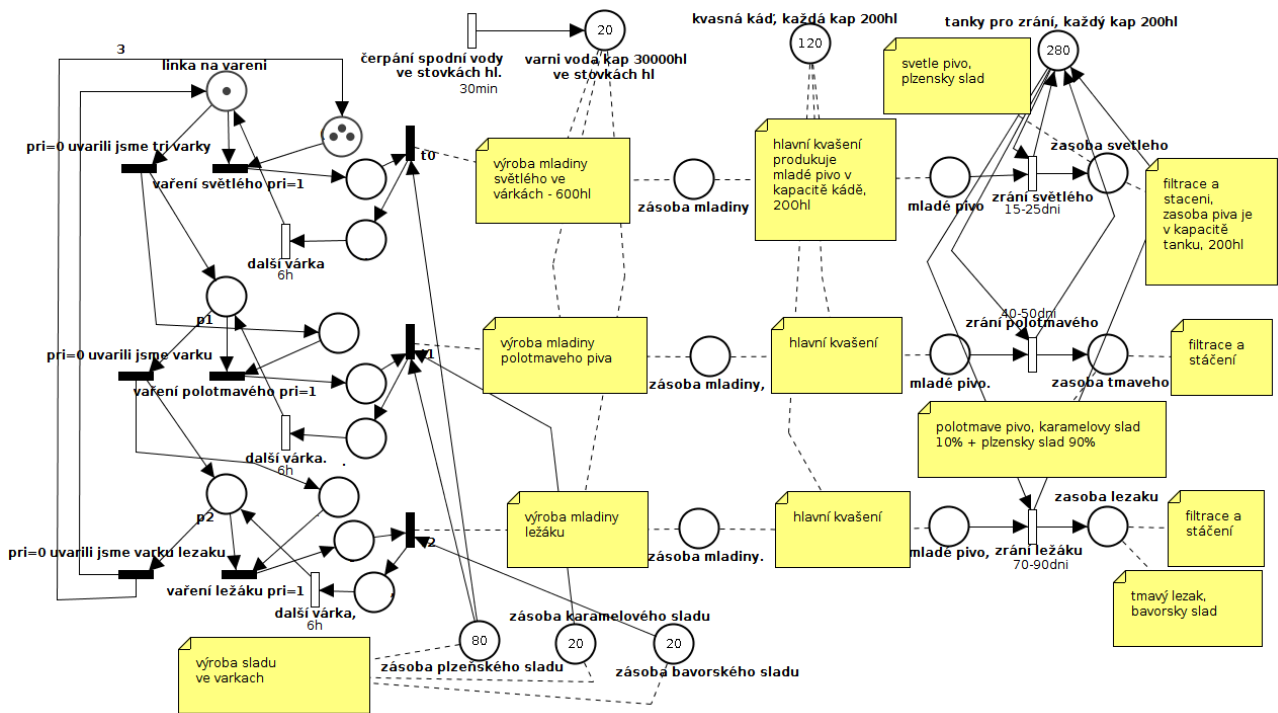


Figure 5: Proces výroby mladiny.

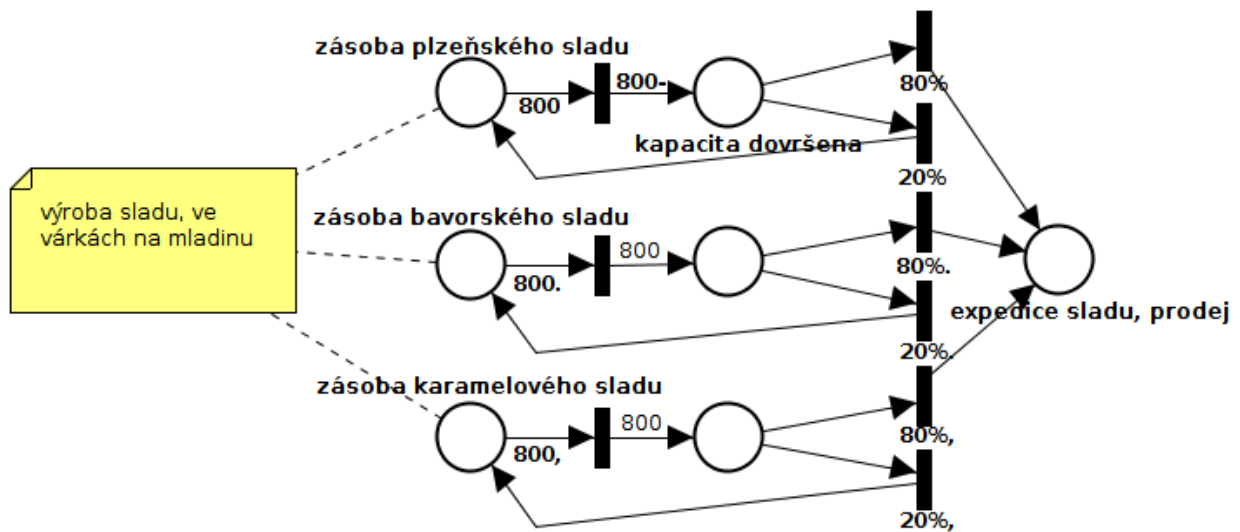


Figure 6: Proces expedice přebytečného sladu.

4 Architektura simulačního modelu

Všechny stroje a zařízení jsou modelovány typem Store[12, str. 163] i při kapacitě 1, protože sklad je možné uvolnit jiným procesem, což bylo nutné u čištění strojů. Veškeré doby obsazení strojů i potřebné množství jsou řešeny jako konstanty v dané třídě. Výroba sladu, mladiny a kvašení produkují odpad, který se ukládá do statických proměnných a je statisticky vypisován na konci programu.

4.0.1 Generátor surovin a sklad

Generátorem je třída **MaterialGenerator**, která generuje do skladu typu **Store** základní suroviny - varní vodu, kvasnice a chmel. Samotný generátor je typu **Process**[12, str. 163]. Třída obsahuje informaci o generovaném množství, kapacitě, inicializovaném množství (množství při startu výroby). Kapacita určuje maximální množství suroviny ve skladu. Pokud je dovršena, generátor čeká, dokud není místo na generované množství. Generátor má za úkol sklad doplňovat s daným zpožděním, který simuluje daný způsob dopravy surovin (varní voda - čerpání, kvasnice a chmel - dovoz).

Skladem produktů je třída **MaterialHolder**, která obsahuje množství produktu na skladě, kapacitu, typ materiálu a poté statistické proměnné, jako například minimální množství, maximální množství apod..

4.0.2 Výroba sladu

Třídy představující výrobu ječmene jsou v souboru **MaltProduction**. Soubor obsahuje třídu typu **Process MaltProduction**, která se stará o třídění a čištění a představuje pohyb ječmene při máčení a klíčení. U máčení a klíčení je třeba určité množství ječmene, než se procesy odstartují. Toto je řešeno statickými proměnnými. Když ječmen dosáhne určitého množství zaktivuje třídu máčení a klíčení. Po dokončení klíčení se ječmen ještě musí hvozdit v třídě hvozdní a odkličovat. Případy, kdy počet příchozích procesů byl jiný než počet odchozích je řešen smyčkou, která vytváří vygenerované produkty. Dopravu ječmene zajišťuje generátor typu **Event**[12, str. 163]. Jedna dodávka obsahuje tunu ječmene, který představuje transakci[12, str. 136].

4.0.3 Výroba mladiny

Třídy představující výrobu mladiny jsou v souboru **WortProduction**, kde hlavní proces výroby představuje třída **WortProduction**, pomocné práce, jako čištění, byly řešeny dalšími třídami **SccecovaciTubCleaning** a **TubCleaning**. Proces si bere potřebné množství z **MaterialHolder** a **MaterialStore** nebo naopak produkuje do **MaterialHolder** mladinu.

4.0.4 Hlavní kvašení a zrání piva

Třídy představující kvašení a zrání piva jsou v souboru **Fermentation**. Třídy jsou typu **Process**. Berou si množství mladiny z **MaterialHolder**. Po vyzrání pak produkují pivo daného typu do jiného skladu **MaterialHolder**. Třída **Fermentation** čeká, dokud některý ze skladů mladiny **MaterialHolder** nemá mladinu potřebnou na naplnění kvasné kádě. Pokud ano spouští proces ve třídě **Fermentation.Process**, který simuluje kvašení a zrání piva.

4.0.5 Filtrace, stáčení a expedice

Třídy představující filtraci a stáčení jsou v souboru **Filtration** a třída představující expedici je v souboru **CarProcess**. Berou si množství nefiltrovaného piva z **MaterialHolder**. Po filtraci a stáčení pak produkují jednotlivé lahve na expedici. V expedici si auta naloží láhce o své kapacitě a lahve vyváží. Třída **Filtration** podobně jak při kvašení čeká, dokud není některý ze skladů nemá nefiltrované pivo. Pokud ano, spouští proces ve třídě **FiltrationAndPasterization**, která simuluje filtraci a pasterizaci a po určitém počtu várek spouští proces pro stáčení piva, který připravuje várku na expedici. Ve třídě **CarProcess**, která je odstartována při startu programu, si jednotlivá auta zabírají rampu a čekají na příchozí lahve, kterými si naplní auto a vyváží.

5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Bude prováděno sledování zatížení jednotlivých částí systému při nezávislé výrobě jednotlivých surovin pro tři druhy piva. Hlavním cílem experimentů pak bude snaha o plynulou výrobu piva bez čekání na suroviny a bez vytváření front, podle změny opakování výroby várek, urychlení určitých částí výroby, pokud to je možné či navýšení počtu těchto strojů. Kromě zatížení a efektivity se také bude sledovat množství odpadu ve výrobě. Budou sledované klíčové stroje a zařízení, které průměrně spotřebují největší množství energie, a které mají největší pořizovací náklady. Po klíčení je nutné veškerý zelený slad spotřebovat do 24 hodin, tedy se nemůže vytvářet fronta delší než 24 hodin. Další sledovanou částí budou kvasné kádě a tanky na zrání, kde by nemělo docházet k žádným frontám. V poslední řadě se bude sledovat i expedice, zatížení aut, průměrná doba nakládání apod..

5.1 Postup experimentování

Postup experimentování bude následující:

1. Nastaví se doba produkce nové várky mladiny, rychlost dopravy ječmene, doba simulace a počet várek u určitého typu piva a další údaje podle typu experimentu.
2. Podle zatížení strojů, zařízení a front se změní doba produkce nové várky mladiny a rychlost dopravy ječmene, až dojde k maximální propustnosti, některého z výrobního procesu.
3. Dojde k změně počtu těchto strojů, zařízení, aut nebo kapacita kádí či tanků, pokud je to možné, či vhodné. Pokud je to nutné dojde k zdvojení zařízení - tedy například se zdvojnásobí stroje na sladovně.
4. Následně se tento proces opakuje.
5. Cílem je maximální propustnost při výrobě 600hl mladiny za jednotku času. Tedy se cílí získat limit propustnosti při výrobě mladiny. Při této propustnosti se získá množství odpadu z výroby.
6. Porovnání výsledků s velkým pivovarem.
7. Vyhodnocení výsledků.

5.2 Dokumentace jednotlivých experimentů

V modelu bylo provedeno 8 následujících experimentů. Každý se soustředil na jednu část výroby a jeden našel v systému chybu.

5.2.1 Experiment č.1

Tento experiment je prováděn s původními hodnotami z konceptuálního modelu.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	6 hodin
Doba dopravy ječmene	30min
Polotmavé, ležák, světlé	1,1,3

Table 1: Hodnoty v experimentu č.1.

Při experimentu se vyprázdnil sklad sladů. Zjištěno to bylo na základě hodnot výstupů jednotlivých skladů `MaterialHolder` a výsledku histogramu průměrného počtu ve skladu. Kde očekávaná hodnota po vyprázdnění je průměrně 20% z celkové hodnoty skladu.

Byla nalezena chyba v systému, při dovršení kapacity ve skladu sladu. Kdy dochází k expedici sladu - prodej sladu, byla šance vrácení materiálu do skladu - proměnná `GO_EXPEDITION` nulová. Důvod nulové hodnoty byl špatný datový typ - integer, který hodnotu vynuloval. Viz figure 7 v příloze. V tomto grafu je možné vidět chybu v programu, kde velký podíl stavu materiálu se blíží nule, oproti tomu model bez chyby má těchto hodnot málo.

Tato chyba znehodnotila výsledek celého experimentu a bylo nutné experiment opakovat s opravenou chybou.

5.2.2 Experiment č.2

Tento experiment je prováděn s původními hodnotami z konceptuálního modelu a opravenou chybou zjištěnou v minulém experimentu.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	6 hodin
Doba dopravy ječmene	30min
Polotmavé, ležák, světlé	1,1,3

Table 2: Hodnoty v experimentu č.2.

Výsledky experimentu jsou v příloze (kapitola 7.2). Zatížení kónické nádoby při dané době dopravy ječmene se blíží 100%. Již vznikají krátké fronty a klíčová maximální fronta ve hvozdu je přesně kritická hodnota 24 hodin. Tedy těsně před dobou zkažení zeleného sladu. Zatížení při výrobě mladiny se blíží 50%. Problém nastává při kvašení a zrání piva. Kvasné kádě se blíží 60% zatížení, ale tanky pro zrání zdaleka nestačí dané produkci mladiny. Fronta je až 15000 hodin. Získaná data tedy byly zastaralá. V příštím experimentu je třeba zjistit potřebné množství tanků pro zrání, pro zjištění zatížení zařízení ve filtraci, pasterizaci a expedici.

5.2.3 Experiment č.3

Tento experiment je prováděn s původními hodnotami z konceptuálního modelu a opravenou chybou zjištěnou v prvním experimentu. Cílem je získat nutný počet tanků pro zrání.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	6 hodin
Doba dopravy ječmene	30min
Polotmavé, ležák, světlé	1,1,3

Table 3: Hodnoty v experimentu č.3.

Při zdvojnásobení kapacity tanků pro zrání se využití blíží 78%. Tedy pro plynulý chod pivovaru v tomto režimu je nutné minimálně 470 tanků pro zrání piva. Zatížení zařízení ve filtraci a pasterizaci se blíží 53% a Průměrný počet používaných aut je 34 ze 60. Z informací z prvních 3 experimentů vyplývá, že se linka mladiny neblíží plného využití při stávající kapacitě zařízení při výrobě sladu ani při filtraci a pasterizaci. Cíl 4. experimentu bude, co nejvíce snížit dobu produkce nové várky při stávajících kapacitách strojů a zařízení ve všech částech výroby.

5.2.4 Experiment č.4

Ve čtvrtém experimentu je snížena doba produkce nové várky na 4 hodiny. Kromě toho bylo nutné zvýšit kapacitu tanků na zrání na trojnásobek původní hodnoty na 720. Kromě těchto hodnot zůstaly všechny ostatní stejné.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	4 hodiny
Doba dopravy ječmene	30min
Polotmavé, ležák, světlé	1,1,3

Table 4: Hodnoty v experimentu č.4.

Využití strojů při výrobě mladiny a při maximálním využití zařízení na výrobně sladu je 77% ve vystírací kádi a průměrně 60% ve všech ostatních důležitých zařízeních. To znamená, že při zdvojení výroby sladu se nebude slad dostatečně rychle spotřebovávat a bude třeba jej prodávat.

Cílem dalšího experimentu bude maximální využití výroby mladiny při zdvojení výroby sladu, bez maximální fronty delší jak 1 hodina.

5.3 Experiment č.5

V pátém experimentu je snížena doba produkce nové várky na 182 minut, byla zdvojena produkce sladu a čas dopravy ječmene je zkrácen na 17,7 minut. Kromě těchto hodnot, bylo třeba zvýšit čerpání vody, dovoz chmele i kvasnic. Kapacita kvasných kádí na 160 a ležáckých tanků na 920 a kapacita při filtraci a pasterizaci na dvojnásob.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	182 minut
Doba dopravy ječmene	17,7min
Polotmavé, ležák, světlé	1,1,3

Table 5: Hodnoty v experimentu č.5.

Bylo dosaženo 99,5% zatížení vystírací kádě se zatížením ostatních klíčových zařízení na výrobně mladiny na průměrně 78%. Při zdvojení produkce již dochází k maximálnímu vytížení kvasné kádě, jejich kapacita tedy nestačí k maximální produkci ve všech zařízeních na výrobně sladu. V příštím experimentu se soustředím na maximalizaci výroby sladu se zvýšením kapacity kónického náduvníku na 3.

5.4 Experiment č.6

V šestém experimentu byla zvýšena kapacita kónického náduvníku o 1 a postupně jsem snižoval čas dopravy ječmene. Maximálního využití bez vzniku delších front vznikl v čase 12,2 minut.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	182 minut
Doba dopravy ječmene	12,2min
Polotmavé, ležák, světlé	1,1,3

Table 6: Hodnoty v experimentu č.6.

V tomto experimentu došlo k maximálnímu zatížení všech částí výroby při výrobě várek mladiny 600hl. V příloze je možné vidět odpad z výroby při maximální výrobní kapacitě. Cílem příštího experimentu bude zjištění nutného počtu tanků ke zrání při jiné produkci piva - zvýší se počet várek pro polotmavé a ležák.

5.5 Experiment č.7

V experimentu číslo 7 jsem upravil vařené várky polotmavého a ležáku a postupně zvyšoval množství nutných tanků ke zrání, finální číslo, kde nenastává k žádným frontám se ustálilo na 1200.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	182 minut
Doba dopravy ječmene	12,2min
Polotmavé, ležák, světlé	3,3,3

Table 7: Hodnoty v experimentu č.7.

Při větším poměru polotmavého a ležáku by bylo třeba ještě větší počet tanků na zrání. Celková kapacita ležáckých tanků pro tento experiment byla zvýšena na 240000hl.

Proměnná	Hodnota
Doba simulace	5 let
Doba produkce nové várky	182 minut
Doba dopravy ječmene	12,2min
Polotmavé, ležák, světlé	2,6,2

Table 8: Hodnoty v experimentu č.7.

Při výrobě 6 ležáků na 2 várky polotmavého a světlého piva je nutné zvýšit kapacitu ležáckých tanků na 300000hl. Poslední experiment bude porovnání výroby piva v modelovaném experimentu s výrobou piva ve velkém pivovaru Ostravar, který má stejně velké várky mladiny - 600hl.

5.6 Experiment č.8

Porovnání s pivovarem Ostravar, který má stejně velké várky mladiny:

1. Množství hl piva při maximálním využití výrobní mladiny v modelu je 1595400hl piva za rok.
2. Množství hl piva při stejném počtu várek za den (každých 6 hodin v Ostravaru) 807000 hl za rok v modelu a 700000hl za rok v pivovaru Ostravar, kde je toto množství bráno

jako výstav - tedy pivo určené k prodeji. Je tedy jisté, že skutečné množství vyrobeného piva je větší.

Z tohoto je zřejmé že velké pivovary nepracují na maximálním zatížení a často si nechávají výrobní kapacitu při zvýšeném zájmu o pivo, aby nemuseli ihned zozširovat svoje výroby.

6 Shrnutí experimentů a závěr

Z experimentů vyplývá, že pro maximální zatížení výroby mladiny o kapacitě 600hl je nutné vyrábět novou várku každé 3 hodiny a zdaleka nestačí kapacita výroby sladu ani kapacita tanků na zrání. Nutná kapacita tanků pro zrání závisí podle výroby piva - délka zrání. Při velkém zájmu o ležák je nutná kapacita 300000hl. Výrobu sladu pak bylo nutné zdvojit. Pro maximální využití této výroby pak bylo nutné podpořit výrobu dalším kónickým náduvníkem. Přebytný slad se poté vyváží. Za pět let bylo při 78% výrobě plzeňského sladu na světlé pivo a polotmavé, 21% výrobě bavorského sladu na ležák a 2% výrobě karamelového sladu na polotmavé pivo, vyvoženo 39693t plzeňského sladu, 12293t bavorského sladu a 1602t karamelového sladu. Přičemž se vyráběli v poměru 3 várky světlého piva na ostatní druhy piva. Problémy s kapacitou ležáckých tanků pro zvýšení výrobní kapacity a většího vytížení je častý ve velkých pivovarech a tento problém se vyskytl i zde. Při maximálním využití výroby mladiny nedošlo k frontám delším než 50 minut a u klíčových frontách ve hvozdu a saladinovy skříně na výrobu sladu, nedošlo k frontě delší jak 24 hodin.

V posledním experimentu pak došlo k porovnání vyráběného piva v modelu s velkým pivovarem Ostravar a bylo zjištěno, že množství vyráběného piva za rok při stejné době nových várek je srovnatelný, ale pivovar zdaleka nepracuje na maximální využití - pouze přibližně 55%.

Experimenty dokázaly, že výroba v modelu ve stejných podmínkách je srovnatelná s velkými pivovary. Model je po zdokonalení vhodný pro plánování rozšíření pivovaru nebo nových pivovaru a také k zjištění všeobecného pojmu o odpadu, průměrného vyráběného piva a sladu. Dále je vhodný k zjištění ekonomické stránky výroby a zisku z výroby, který se dá přepočítat podle použitého materiálu a prodaného piva. Dále po úpravách a přidání grafického rozhraní, je vhodný jako výukový materiál pro studenty zemědělských středních škol.

References

- [1] K KOSAŘ, S Procházka. *Technologie výroby sladu a piva. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, 2000, 398 s.* ISBN 80-902-6586-3, 2000.
- [2] ZÝBRT, Věnek. *Velká kniha piva: vše o pivu. Rubico, Olomouc, 2005, 287 s.* ISBN 80-7346-054-8, 2005.
- [3] CHLÁDEK, Ladislav. *Pivovarnictví. Grada Publishing, a. s., Praha., 2007, 207 s.* ISBN 978-80-247-1616-9, 2007.
- [4] Anna Flosová. *Bakalářská práce, Porovnání tradiční výroby piva s moderními technologiemi.* Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta [Online], 2011.
https://theses.cz/id/q1mfoz/flosova_anna__technologie_vyroby_piva.pdf
- [5] Jiří Hajn, *Diplomová práce, Výroba piva, téma výuky a zájmové činnosti.* Univerzita Karlova v Praze, Pedagogická fakulta [Online], 2007
<https://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/120190942>
- [6] Markéta Vilášková, *Bakalářská práce, Technologie výroby piva v pivovaru Ostrava.* Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta [Online], 2011
http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=38634;download_prace=1.
- [7] Marcel Mészáros, *Bakalářská práce, Technologie výroby specifických druhů piva.* Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická [Online], 2012
http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23269/m%C3%A9sz%C3%A1ros_2012_bp.pdf?sequence=1
- [8] Leona Lučanová, *Bakalářská práce, Výukový text - pivovarnictví.* Masarykova univerzita, Fakulta technologická, Pedagogická fakulta [Online], 2012
https://is.muni.cz/th/350849/pdf_b/
- [9] Bohdan Cvejn, *Bakalářská práce, Analýza informačního systému pro řízení výroby pivovaru.* Masarykova univerzita, Fakulta informatiky [Online], 2013
https://is.muni.cz/th/374506/fi_b/analyza_informacniho_systemu_pro_rizeni_pivovaru.pdf
- [10] Vendula Filípková,
Seminární práce z výživy hospodářských zvířat. Krmné zbytky průmyslu pivovarského, sladovnického a lihovarnického Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Fakulta agronomická [Online], 2005
https://is.mendelu.cz/dok_server/slozka.pl?download=71006;id=48974;z=1;lang=en.
- [11] P. Peringer, *SIMulation LIBrary for C++ programming language [Online], 2011*
<http://www.fit.vutbr.cz/peringer/SIMLIB/>
- [12] P. Peringer, *Slajdy k předmětu IMS [Online], verze 17. října 2017*
<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>
- [13] Výpočet hmotnosti sladů (sypání) [Online],
<http://diversity-pivo.blogspot.cz/2016/09/pivarka-vypocet-hmotnosti-sladu-sypani.html>

[14] Příklad šnekového dopravníku [Online],
<http://www.agrico.cz/snekovy-zlabovy-dopravnik-2-58.html>

7 Příloha

7.1 Přílohy k experimentu č.1

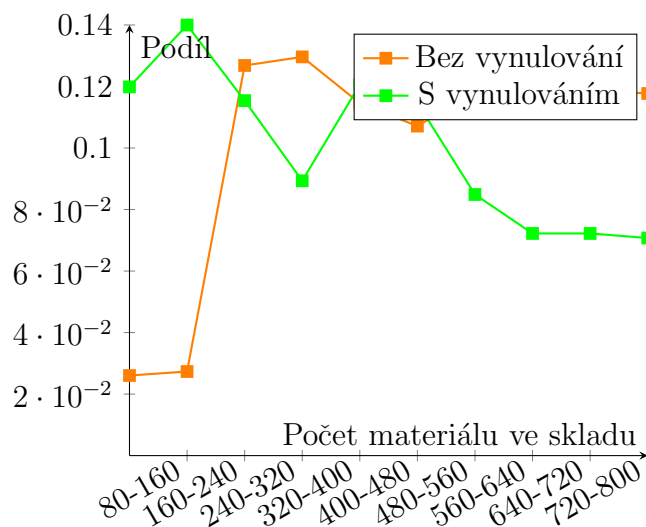


Figure 7: Porovnání histogramu při a bez vynulování proměnné

7.2 Přílohy k experimentu č.2

Typ sladu	Použitý Materiál (ve várkách na mladinu)	Materiál na skladě	Počet dovršení kapacity	Prodáno (v tunách)
Plzeňský slad	5377	221	4	19735
Bavorský slad	1344	598	0	0
Karamelový slad	1344	733	2	1100

Table 9: Informace o skladu sladů

Jméno stroje	Průměrné využití (v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Aspirátor	50,30	2,36	0,249
Kónický náduvník	98	18.8	6.1
Saladinova skříň	88,57	7	2.43
Hvozdnění	88,17	24	5.15
Odkličovačka	4,3	0,67	0,22

Table 10: Informace o zařízení při výrobě sladu.

Jméno stroje	Průměrné využití v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Šrotovník	21	0	0
Vystírací kád	50	0	0
Rmutovací kád	45,4	0	0
Scézovací kád	37	0	0
Mladinová pánev	33	0	0
Výřivá kád	13	0	0
Chladič	17	0	0

Table 11: Informace o zařízení při výrobě mladiny.

Jméno skladu	Maximální využití	Průměrné využití (v %)	Max. doba čekání ve frontě (v h)	Prů. doba čekání ve frontě (v h)
Kvasná kád	74	56	0	0
Tanky pro zrání	280	99	14652	7346

Table 12: Informace o zařízení při kvašení a zrání.

7.3 Přílohy k experimentu č.3

Jméno skladu	Maximální využití	Průměrné využití (v %)	Max. doba čekání ve frontě (v h)	Prů. doba čekání ve frontě (v h)
Kvasná kád	75	56	0	0
Tanky pro zrání	560	78	0	0

Table 13: Informace o zařízení při kvašení a zrání.

Jméno stroje	Průměrné využití (v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Svíčkový filtr	35	10	2
Pastér	49	8	1
Stáčírna	53	5	1

Table 14: Informace o zařízení při filtraci a pasterizaci.

Průměrná doba nakládání (v h)	Průměrné využití aut (v počtu)	Láhve k expedici
4.5	34/60	2000

Table 15: Informace k expedici.

7.4 Přílohy k experimentu č.4

Typ sladu	Použitý Materiál (ve várkách na mladinu)	Materiál na skladě /Min. množství	Počet dovršení kapacity	Prodáno (v tunách)
Plzeňský slad	8065	23/8	0	0
Bavorský slad	2016	104/8	0	0
Karamelový slad	2016	524/3	0	0

Table 16: Informace o skladu sladů

Jméno stroje	Průměrné využití (v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Aspirátor	50	2	0,245
Kónický náduvník	99,8	29	13
Saladinova skříň	88,14	8	1,8
Hvozdnění	87,73	22	5,06
Odkličovačka	4,3	0,67	0,22

Table 17: Informace o zařízení při výrobě sladu.

Jméno stroje	Průměrné využití v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Šrotovník	31	0	0
Vystírací kád	77	1	0,34
Rmutovací kád	68	0	0
Scézovací kád	57	0,46	0,18
Mladinová pánev	49	0	0
Výřivá kád	19	0	0
Chladič	24	0	0

Table 18: Informace o zařízení při výrobě mladiny.

Jméno skladu	Maximální využití	Průměrné využití (v %)	Max. doba čekání ve frontě (v h)	Prů. doba čekání ve frontě (v h)
Kvasná kád	110	83	0	0
Tanky pro zrání	689	90	0	0

Table 19: Informace o zařízení při kvašení a zrání.

Jméno stroje	Průměrné využití (v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Svíčkový filtr	80	15,7	3
Pastér	73	8	1,5
Stáčírna	79	6,5	2,2

Table 20: Informace o zařízení při filtraci a pasterizaci.

Průměrná doba nakládání (v h)	Průměrné využití aut (v počtu)	Láhve k expedici
3.0	49/60	34000

Table 21: Informace k expedici.

7.5 Příloha k experimentu č.5

Typ sladu	Použitý Materiál (ve várkách na mladinu)	Materiál na skladě /Min. množství	Počet dovršení kapacity	Prodáno (v tunách)
Plzeňský slad	10635	753/263	0	0
Bavorský slad	2658	378/64	0	0
Karamelový slad	2658	298/61	1	541

Table 22: Informace o skladu sladů

Jméno stroje	Průměrné využití (v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Aspirátor	42,5	0,9	0,12
Kónický náduvník	97,6	48	11.5
Saladinova skříň	61,14	0	0
Hvozdní	58,5	0	0
Odkličovačka	6,0	0,67	0,20

Table 23: Informace o zařízení při výrobě sladu.

Jméno stroje	Průměrné využití v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Šrotovník	41	0	0
Vystírací kád	98,5	0,85	0,2
Rmutovací kád	89,8	0	0
Scézovací kád	73	0	0
Mladinová pánev	64	0	0
Výřivá kád	25	0	0
Chladič	33	0	0

Table 24: Informace o zařízení při výrobě mladiny.

Jméno skladu	Maximální využití	Průměrné využití (v %)	Max. doba čekání ve frontě (v h)	Prů. doba čekání ve frontě (v h)
Kvasná kád	143	83	0	0
Tanky pro zrání	905	93,6	0	0

Table 25: Informace o zařízení při kvašení a zrání.

Jméno stroje	Průměrné využití (v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Svíčkový filtr	77	10,6	2,2
Pastér	48	3,3	1,5
Stáčírna	51	2	1

Table 26: Informace o zařízení při filtraci a pasterizaci.

Průměrná doba nakládání (v h)	Průměrné využití aut (v počtu)	Láhve k expedici
1.6	60/60	24000

Table 27: Informace k expedici.

7.6 Příloha k experimentu č.6

Typ sladu	Použitý Materiál (ve várkách na mladinu)	Materiál na skladě /Min. množství	Počet dovršení kapacity	Prodáno (v tunách)
Plzeňský slad	10635	626/144	8	39693
Bavorský slad	2658	384/66	2	12293
Karamelový slad	2658	594/60	3	1602

Table 28: Informace o skladu sladů

Jméno stroje	Průměrné využití (v %)	Max doba čekání ve frontě (v h)	Průměrná doba čekání ve frontě (v h)
Aspirátor	61,5	1,3	0,17
Kónický náduvník	94	21	4,5
Saladinova skříň	88,6	8	1,8
Hvozdění	81,5	15	3,5
Odkličovačka	9	0,56	0,18

Table 29: Informace o zařízení při výrobě sladu.

Odpad	Množství
Výčist	7935t
Odpad z máčení	3884t
Máčecí voda	6863400hl
Sladový květ	6804t
Mláto	1322820hl
Hořké kaly	6379t

Table 30: Informace o odpadu