

Batch planner optimaliseert op economische en milieu-technische factoren

Optimalisatie van de volgorde van produktieruns in een multi-product batch-fabriek

dr.ir. R.M. Stikkelman &
dr.ir. P.J.T. Verheijen

dr.ir. R.M. Stikkelman is werkzaam bij Interduct,
Interfaculty Delft University Clean Technology
institute

dr.ir. P.J.T. Verheijen is werkzaam bij TU Delft,
vakgroep Chemische Proces Technologie

Produceert u een visceuze lijm of een donkere kleurstof die zelfs in geringe hoeveelheid een ander produkt van specificatie brengt? Of een amine- en een epoxyverbinding die doorreageren tot een ongewenste produkt? Als planner van produktieruns heeft u handen vol werk om een optimale volgorde vast te stellen. Vooral als u maar een beperkt aantal reactoren ter beschikking heeft en een groot aantal produkten onder tijdsdruk moet maken. In dit verhaal presenteren wij u Batch Planner: een computerprogramma dat in staat is de optimale produktievolgorde te bepalen in een fabriek met meerdere multi-product reactoren.

De chemische industrie levert vele materialen, zoals kunststoffen, lijmen, harsen, kleurstoffen, bestrijdingsmiddelen en voedingsmiddelen aan tussenhandelaren en eindgebruikers. Om aan de uiteenlopende wensen van verschillende klanten te kunnen voldoen is het produktenpakket breed en zijn de leveringstijden kort. Dit heeft een aantal consequenties. Door het grote aantal produkten met bijbehorende specificaties vinden veel produktwisselingen plaats. Het te produceren volume per produkt is onvoldoende om de capaciteit van één reactor volledig te benutten. Meerdere produkten worden daarom in één reactor gemaakt. Er is sprake van een multi-product fabriek.

Het maken van een produktieplanning in zo'n fabriek is een lastige zaak. Het primaire doel van batchplanning is er voor te zorgen dat de gewenste hoeveelheid van een produkt op het juiste moment beschikbaar is. Overproductie zonder mogelijkheden voor opslag leidt tot onnodig verlies van kostbaar materiaal. Courante produkten worden meestal op voorraad gehouden. Minder

gangbare en bederfelijke produkten worden pas na bestelling geproduceerd. Het gereed komen van deze produkten dient bij voorkeur gepland te worden op het moment dat het produkt naar de klant getransporteerd kan worden.

Een secundaire en vaak onderbelicht doel van een batchplanning is het verbeteren van de bedrijfsvoering. Hierbij kan gedacht worden aan een optimale bezettingen van de reactoren, een optimale inzet van personeel, het minimaliseren van niet produktieve tijd veroorzaakt door wacht-, ombouw- en schoonmaaktijden, het beperken van handelingen met grondstoffen en gereede produkten en het voorkomen van *off spec* produkt door contaminatie met materiaal uit voorgaande batches.

De complexiteit van het vinden van een optimale produktievolgorde wordt aan de hand van een eenvoudig uitzienend probleem geïllustreerd. Na de introductie van mogelijke oplossingsstrategieën, wordt het computerprogramma Batch Planner gepresenteerd. Batch Planner minimaliseert het aantal ongewenste effecten

in een planning van meerdere producten over meerdere multi-product reactoren.

Een planningsprobleempje

De problemen die ontstaan bij het maken van een productieplanning kunt u het best ervaren door zelf een productieplanning op te stellen. Probeer eens twee batches van produkt A, drie van B, vier van C en vijf van D in één reactor te plannen. Op tijdsaspecten hoeft u niet te letten. Er zijn echter wel een paar contaminaties tussen producten mogelijk die leiden tot 'off spec' produkt. Produkt A mag niet gevolgd worden door B en C. Produkt B niet door D. Produkt C niet door A, B en C en produkt D niet door A en C. Veel succes.

Complexiteit van batch planning

Tijdens het uitvoeren van het planningsprobleempje blijkt dat het vinden van een optimale planning al moeilijk kan zijn. Het aantal mogelijkheden om N batches in één reactor te plannen ligt in de orde van grootte $N!$. Een planning van 14 batches heeft ± 87 miljard mogelijkheden. Het aantal mogelijkheden om N batches in meer dan één reactor te plannen is nog veel groter. Combinatorische problemen, waartoe plannings-

problemen behoren, zijn uitgebreid wiskundig onderzocht. In de complexiteitstheorie noemen we een combinatorisch probleem simpel, als er een efficiënte oplossingsmethode (algoritme) bestaat, waarvan de benodigde rekentijd begrensd wordt door een functie, die een polynoom van N is, met N het aantal te plannen batches. De wiskundige notatie van het bovenstaande is:

$$T(N) = O(N^k)$$

met $T(N)$: benodigde (reken)tijd
 N : aantal te plannen batches
 k : constante

We noteren de categorie van planningsproblemen waarvoor een efficiënt algoritme bekend is, met P. Helaas is voor een groot gedeelte van de planningsproblemen geen efficiënt algoritme bekend. Deze categorie problemen noteren we met NP. Het is echter nog niet aangetoond dat er voor de NP-problemen geen efficiënte algoritmen zijn; ze zijn in ieder geval nog niet gevonden. Als er voor één van de NP-problemen een efficiënt algoritme gevonden wordt, dan, zo zegt een stelling uit de

Oplossingsstrategieën voor combinatorische problemen

Hieronder volgt een opsomming van de strategieën die gekozen kunnen worden bij het optimaliseren van combinatorische problemen.

I Bekijken van alle zinvolle mogelijkheden

Men gaat volgens een meer of minder slimme tactiek alle mogelijkheden langs. Hiermee verkrijgt men gegarandeerd de optimale oplossing.

Alle mogelijkheden langsgaan

Deze methode gaat simpelweg alle mogelijkheden langs en vindt (uiteindelijk) de optimale oplossing. Een groot nadeel is dat de benodigde optimalisatietijd $O(N!)$ is en dus in de praktijk alleen bij kleine problemen gebruikt kan worden.

Branche and bound-methode (snoeimethode)

De planning wordt systematisch batch voor batch opgebouwd totdat de waarde van de doelfunctie hoger is dan een van te voren ingesteld criterium of totdat alle batches geplaatst zijn. In het eerste geval wordt de planning systematisch afgebroken en dusdanig weer opgebouwd dat alleen die combinaties bekeken worden die niet beginnen met de reeds verworpen beginvolgorde. In het tweede geval wordt de waarde van de doelfunctie vergeleken met het ingestelde criterium. Als de waarde lager is dan het criterium, wordt de planning wederom systematisch afgebroken en opgebouwd, maar nu met de waarde van de doelfunctie als criterium. Het criterium is te kritisch gekozen als de doelfunctiewaarde bij alle combinaties groter blijkt dan het criterium. De benodigde optimalisatietijd is $O((N-x)!)$, waarin x onder meer afhankelijk is van de efficiëntie van het van te voren ingestelde criterium.

Dynamisch programmeren

Van een optimale planning zijn de eerste K batches zo gerangschikt dat deze batches in een gereduceerd probleem, bestaande uit die K batches, ook in de optimale volgorde staan. Hieruit volgt het volgende: om de optimale volgorde van een verzameling batches te vinden, moeten we elke batch beschouwen en ons afvragen hoeveel het zou "kosten" (in de zin van onze doelfunctie) om deze batch als laatste batch in de volgorde te zetten. Als laatste batch in onze optimale oplossing nemen we dus uit alle mogelijkheden de batch met de laagste "kosten". Dynamisch programmeren heeft veel minder rekentijd nodig dan het langsgaan van alle mogelijkheden, maar voor problemen met meer dan zo'n 25 batches wordt de rekentijd te lang voor toepassing in de praktijk. Een ander nadeel van dynamisch programmeren is dat de hoeveelheid benodigde geheugenruimte erg groot is vanwege de benodigde recurrente betrekkingen. In de meeste gevallen blijkt branche and bound-methode sneller te werken dan dynamisch programmeren.

II Benaderen van optimale oplossing (heuristieken)

De tactiek bij deze benadering is erop gericht snel een bijna-optimale oplossing te genereren. Het nadeel is dat de oplossing een benadering is van het globale optimum. Het grote voordeel is dat er niet zo veel rekentijd nodig is.

Simulated annealing (SA)

Dit is een variant van de Monte Carlo-methode voor de simulatie van fysische systemen. Na een willekeurige verandering in de planningsvolgorde wordt gekeken of deze verandering correspondeert met een acceptabele waarde

complexiteitstheorie, is er voor elk NP-probleem een efficiënt algoritme.

Doelfunctie

De doelfunctie is een essentieel onderdeel van de optimalisatie van een planningsprobleem. Deze functie geeft kwantitatief aan wat geoptimaliseerd moet worden. De meest gebruikelijke doelfunctie verbindt aan elk aspect van de planning een kostenplaatje. Door minimalisatie van deze doelfunctie wordt een planning tegen minimale kosten gevonden. De definitie van de doelfunctie kan ook zodanig gekozen worden dat bijvoorbeeld een minimalisatie van produktietijd of geproduceerd afval mogelijk wordt.

Oplossingsstrategieën [zie ook het kader]

Om bij planningsproblemen tot een acceptabele oplossing te komen, moet er rekening gehouden worden met zowel de benodigde rekentijd als de kwaliteit van de oplossing. Drie manieren om de doelfunctie van planningsproblemen te optimaliseren zijn:

I *Bekijken van alle zinvolle mogelijkheden*

Men gaat volgens een meer of minder slimme tac-

tiek alle mogelijkheden langs. Hiermee verkrijgt men gegarandeerd de optimale oplossing. De strategieën die hiervoor in aanmerking komen zijn: alle mogelijkheden langsgaan, dynamisch programmeren en de branche and bound-methode.

II *Benaderen van optimale oplossing (heuristieken)*

De tactiek bij deze benadering is erop gericht snel een bijna-optimale oplossing te genereren. Het nadeel is dat de oplossing een benadering is van het globale optimum. Het grote voordeel is dat er niet zo veel rekentijd nodig is. De mogelijke strategieën zijn: simulated annealing, lokale zoek-heuristieken, Insertie-algoritmen en het splitsen in toewijzingsfase en optimalisatiefase

III *Gebruik maken van intuïtie en ervaring*

Het optimaliseren geschiedt met behulp van de intuïtie en ervaring van het planningspersoneel.

Batch planner

Interduct heeft het computerprogramma Batch Planner ontwikkeld met als doel het plannen van meerdere producten in meerdere multi-product batchreactoren te op-

van de doelfunctie. De doelfunctie mag binnen een band variëren. De bovenwaarde van die band is in het begin hoog om het zoekgebied zo breed mogelijk te maken. Bij latere iteraties wordt de bovenwaarde langzaam omlaag gehaald in de verwachting dat men in de buurt van het globale optimum 'inzoomt'. Deze methode levert een optimum, die afhankelijk van de snelheid waarmee de bovenwaarde van de band daalt een benadering geeft van de optimale oplossing. De benodigde rekentijd voor het vinden van 'acceptabele' oplossingen is beduidend minder dan bij branche and bound-technieken.

Lokale zoek-heuristieken

Lokale zoek-heuristieken zijn de meest bekende en ook meest succesvolle heuristieken voor het vinden van bijna-optimale oplossingen van het 'Traveling Salesman Problem' (TSP). Er wordt begonnen met een route die kan maar die niet optimaal hoeft te zijn. Door r takken uit de route te halen en de zo verkregen losse stukken m.b.v. r nieuwe takken weer aan elkaar te verbinden, krijgen we een nieuwe route. Van elke route wordt bekeken wat de waarde van de doelfunctie is. Elke mogelijkheid voor het weghalen van r takken en het invoegen van r nieuwe takken wordt bekeken en de route met de laagste bijbehorende doelfunctie wordt de nieuwe benadering. Hoe groter r , hoe nauwkeuriger de benadering, maar ook hoe langer de benodigde rekentijd. Uit experimenten is gebleken dat alleen $r = 2$ en $r = 3$ interessante waarden van r zijn. Bij $r = 2$ geldt voor de benodigde rekentijd $O(N^2)$ terwijl voor $r = 3$ geldt $O(N^3)$.

Insertie-algoritmen

Na het kiezen van een eerste batch wordt uit de nog te plannen batches een batch in een keuze-stap geselecteerd. Een veel gebruikte keuze-stap is "farthest insertion". Dit houdt in dat de lastigste batches eerst geplaatst worden en de minder lastige later ingevoegd worden. De

geselecteerde batch wordt op de beste plaats voor of na de al gekozen batch geplaatst. Deze laatste stap wordt een aantal keer herhaald totdat alle batches gepland zijn. De insertie-algoritmen worden veel gebruikt om (snel) een benadering van het optimum te verkrijgen. Het insertie-algoritme is een efficiënt algoritme en is dus in de praktijk goed bruikbaar.

Splitsen in toewijzingsfase en optimalisatiefase

Een veel gebruikte methode om het complexe probleem op te lossen is het splitsen in twee kleinere, minder complexe problemen. Zo kan het planningsprobleem om N batches te plannen op M reactoren gesplitst worden in een toewijzingsfase, waarin alle N batches aan een reactor toegewezen worden op een "slimme" manier. Daarna worden de aan een reactor toegewezen batches per reactor apart geoptimaliseerd. Dit proces kan een aantal keer herhaald worden, waarbij in de nieuwe toewijzing gebruik gemaakt wordt van informatie verkregen uit de vorige toewijzings- en optimalisatiefase. De toewijzingsfase is sterk situatie-afhankelijk. Elke situatie heeft een andere toewijzing nodig. Deze methode geeft slechts een benadering van de oplossing maar heeft als groot voordeel dat de benodigde rekentijd klein is.

III Intuïtie & ervaring

Het plannen geschiedt door de mens met gebruik van een planbord met kaartjes en controle tabellen. Ervaringsregels leren dat bepaalde combinaties handig zijn om te plannen. Dit plannen op intuïtie en ervaring wordt veel toegepast, mede omdat flexibel gereageerd kan worden op veranderende omstandigheden. De methode is echter arbeidsintensief en tijdrovend, en meestal wordt het optimum niet gevonden. Ook is het niet uitgesloten dat door menselijke fouten problemen ontstaan, zoals het niet tijdig gereed zijn van een produkt ten gevolge van een verkeerde produktcombinatie.

timaliseren met behulp van de branch and bound-methode. Tevens maakt het programma het plannen met behulp van intuïtie en ervaring via de computer mogelijk. In Batch Planner zijn de verblijftijden van de produkten in de reactor bepalend voor de planning. Handelingen in voor- en nageschakelde apparatuur moeten binnen de verblijftijd in de reactor uitgevoerd kunnen worden. Batch Planner is daarom niet geschikt voor het optimaliseren van multi-purpose installaties.

In Batch Planner zijn een viertal onderdelen te herkennen:

Gegevensbeheer van produkten en reactoren

Algemene gegevens die gelden voor elke optimalisatie kunnen met behulp van een ingebouwde editor op eenvoudige wijze ingevoerd, veranderd en bewaard worden. Definitie van produkten vindt plaats door het toekennen van een identificatienummer, een produkt-naam en een code voor de opslagmogelijkheden. Voor elke reactor wordt de te verwachten produktietijd en de te verwachten opbrengst per produkt opgegeven. Op dit moment kan Batch Planner 255 verschillende produkten en 15 reactoren aan. Een interactie code bepaalt voor elke mogelijke produktcombinatie de acties die ondernomen moeten worden om deze twee produkten na elkaar te produceren. Hierbij kan gedacht worden aan een reactorreiniging, een andere opijning van de apparatuur of helemaal niets. Van elke interactie moet bekend zijn wat de verwachte uitvoeringstijd is en moet gespecificeerd worden wat de negatieve effecten zijn. In dit artikel worden de hoeveelheden gebruikte spoelvloeistof als negatief effect beschouwd, maar evenzo kunnen financiële aspecten meegenomen worden.

Opgave van het gewenste produktiepakket

De formulering van het gewenste produktiepakket geschiedt door itemnummers van de te produceren produkten in te voeren. Batch Planner vraagt vervolgens per produkt naar de te produceren hoeveelheid en de datum waarop het gereed moet zijn. Na het invoeren van het gewenste produktiepakket, moet de datum worden opgegeven van de eerste dag van de planningsperiode en de tijdsduur van de planning. Het programma controleert automatische of de benodigde gegevens aanwezig zijn in de databank.

Specificatie van de doelfunctie

De door ons gedefinieerde doelfunctie koppelt aan negatieve aspecten van de planning strafpunten. De negatieve aspecten zijn:

- spoelingen (per spoeling 100 strafpunten)
- overproductie (het aantal strafpunten is afhankelijk van de teveel geproduceerde hoeveelheid en de opslagmogelijkheden van een produkt)
- produktwisseling op één reactor is ongewenst omdat de kans op vergissingen door operators dan toeneemt (2 strafpunten).
- produktie in reactoren met lage capaciteit (per batch één strafpunt)

In de hieronder uitgewerkte voorbeelden waren wij gericht op het verminderen van de milieubelasting. Met name het spoelen van reactoren gaf aanleiding tot afval en dus was ons doel het aantal spoelbeurten te minima-

liseren. Spoelbeurten zijn nodig als combinaties van batches contaminatie en dus 'off spec' produkt veroorzaken. Dit geldt voor aangrenzende batches en batches die twee produktiestappen uit elkaar liggen. Door een relatief hoog aantal strafpunten toe te kennen aan spoelingen wordt de geoptimaliseerde produktievolgorde gekenmerkt door een minimaal aantal spoelingen.

Een eis aan de geoptimaliseerde planning is dat op tijd geproduceerd wordt. De situatie waarbij de dag van planning voorbij de datum valt waarop het produkt gereed had moeten zijn, wordt niet geaccepteerd. In principe kan de doelfunctie in Batch Planner aangepast worden aan de wensen van de gebruiker.

Presentatie van de resultaten

Batch Planner maakt gebruik van de branch and bound-methode voor het vinden van de beste produktievolgorde. Na een rekentijd variërend van enkele minuten tot enkele uren wordt een produktievolgorde gegenereerd waarbij de doelfunctie geminimaliseerd is. Een lijst met de geplande produktievolgorde per reactor kan afgedrukt worden op een printer of opgeslagen worden als tekstbestand. De lijst bevat per reactor de begintijden en de te verwachten eindtijden van de geplande batches. Het geoptimaliseerde resultaat wordt ook op een grafisch beeldscherm weergegeven. Over een periode van maximaal acht weken wordt voor elke reactor aan de hand van gekleurde blokjes, waarvan de grootte een maat is voor de produktietijd, aangegeven wanneer batches of speciale acties gepland zijn.

Het grafische planbord kan ook gebruikt worden om zonder optimalisatie procedures op intuïtie en ervaring een planning te maken. Met behulp van een muis kan op eenvoudige wijze de planning software-matig uitgevoerd worden. Batches kunnen geplaatst en weggehaald worden waarbij het programma controleert op mengbaarheden met de omliggende batches. Het computerscherm bestrijkt een tijdspanne van acht weken met de mogelijkheid stapsgewijs in te zoomen tot één dag.

Voorbeelden

Om de optimalisatie te demonstreren zijn twee voorbeelden opgenomen. Voordat begonnen kan worden met het optimaliseren van een produktieplanning moeten eerst de algemene gegevens van produkten en reactoren vastgelegd worden. Tabel I t/m IV bevatten de benodigde gegevens voor de voorbeelden van dit artikel.

In het eerste eenvoudige voorbeeld moet 50 ton van testprodukt A, 50 ton van testprodukt C en 50 ton van testprodukt D geproduceerd worden. De planning start op 11 november 1994. Nadat aan de Batch Planner het gewenste produktiepakket is aangeboden, vindt de optimalisatie plaats. De resultaten hiervan staan in Tabel V. Ondanks het feit dat de doelfunctie er op gericht is spoelingen te vermijden, bevat de geoptimaliseerde planning twee spoelingen. Er zijn geen betere oplossingen.

In het tweede voorbeeld moeten dezelfde hoeveelheden voor produkt A, C en D gepland worden als in het eerste voorbeeld. Door een extra hoeveelheid van 50 ton Produkt B in te plannen wordt een vermindering van het aantal spoelingen bereikt, zoals te zien is in Tabel VI. Voor produkt B geldt in reactor I een andere capaciteit (15 ton per batch) dan in reactor II (10 ton per batch). In

Tabel I. Definitie van produkten. Opslag is mogelijk bij code +. Opslag is niet mogelijk bij code -.

Item nummer	Produktnaam	Opslagcode
A	Testprodukt A	+
B	Testprodukt B	+
C	Testprodukt C	+
D	Testprodukt D	-

Tabel II. Specificatie van productiecapaciteit en verwachte produktietijd voor de reactoren

Item nummer	Reactor i		Reactor ii	
	uren	ton	uren	ton
A	10	10	20	10
B	20	15	20	10
C	-	-	20	10
D	30	15	-	-

Tabel III. Interacties codes voor combinaties van twee produkten

Voor ↓ Na →	A	B	C	D
A	11	1	1	11
B	11	1	1	1
C	1	11	1	1
D	11	11	11	1

Tabel IV. Specificatie van interacties. Spoelingen van reactoren.

Interactiecode	Duur interactie [uren]	Hoeveelheid [m ³]
1	0	0
11	12	5

de geoptimaliseerde planning wordt precies 50 ton produkt B geproduceerd.

Conclusies

In dit artikel heeft u kennis kunnen maken met het combinatorische probleem van het plannen van de volgorde van produktieruns. In eerste instantie lijkt dit probleem simpel, maar reeds bij een klein aantal batches is het aantal combinaties groter dan een mens kan overzien. Wiskundige technieken bieden hiervoor oplossingsstrategieën, die echter beperkingen hebben ten aanzien van de benodigde rekentijd of mate waarin het unieke optimum wordt benaderd.

Door Interduct is een computerprogramma ontwikkeld waarmee op toegankelijke wijze de volgorde van produktieruns kan worden geoptimaliseerd. De methode is op dit moment geschikt voor 250 produkten en 15 reactoren. Met behulp van een tweetal eenvoudige voorbeelden is de werking van de Batch Planner geïllustreerd. Het optimalisatie-doel is vastgelegd in een doelfunctie. Deze doelfunctie kan flexibel gebruikt worden. In de voorbeelden is het primaire doel van de planning 'off spec' productie door contaminatie en tussentijdse reactorspoelingen te voorkomen. Dit biedt een economisch voordeel en beperkt de lozing van reinigingsmiddelen. De beperking van het programma is gelegen in de

Tabel V. Planningsresultaten van het eerste voorbeeld

Item	Reactor	Datum	Starttijd	Eindtijd	Opmerking
D	I	111194	0.00	6.00	
D	I	121194	6.00	12.00	
D	I	131194	12.00	18.00	
D	I	141194	18.00	0.00	
A	II	111194	0.00	20.00	
11	II	111194	20.00	8.00	spoeling
A	II	121194	8.00	4.00	
11	II	131194	4.00	16.00	spoeling
A	II	131194	16.00	12.00	
C	II	141194	12.00	8.00	
C	II	151194	8.00	4.00	
A	II	161194	4.00	0.00	
C	II	171194	0.00	20.00	
C	II	171194	20.00	16.00	
C	II	181194	16.00	12.00	
A	II	191194	12.00	8.00	

Tabel VI. Planningsresultaten van het tweede voorbeeld

Item	Reactor	Datum	Starttijd	Eindtijd	Opmerking
A	I	111194	0.00	10.00	
11	I	111194	10.00	22.00	Spoeling
A	I	111194	22.00	8.00	
B	I	121194	8.00	4.00	
B	I	131194	4.00	0.00	
D	I	141194	0.00	6.00	
D	I	151194	6.00	12.00	
D	I	161194	12.00	18.00	
D	I	171194	18.00	0.00	
A	II	111194	0.00	20.00	
B	II	111194	20.00	16.00	
B	II	121194	16.00	12.00	
C	II	131194	12.00	8.00	
C	II	141194	8.00	4.00	
A	II	151194	4.00	0.00	
C	II	161194	0.00	20.00	
C	II	161194	20.00	16.00	
C	II	171194	16.00	12.00	
A	II	181194	12.00	8.00	

branche and bound- optimalisatiemethode. Bij een groot aantal te plannen batches per reactor (>30) neemt de rekentijd onacceptabele proporties aan (> dag). In de nabije toekomst zal Batch Planner uitgebreid worden met één van de gepresenteerde benaderingsmethoden om ook grote optimalisatieproblemen binnen acceptabele tijd bij benadering te kunnen oplossen.

Dankwoord

De ontwikkeling van Batch Planner is mede tot stand gekomen door de buitengewone inzet van ir. A.E. Oord tijdens zijn afstuderen.

Slotopmerking

Een oplossing van het planningsprobleempje is:

Reactor	A	A	C	D	B	C
D	B	C	D	D	D	B