



Doctoral Thesis

Analysis and Modelling of the Energy Consumption of Chemical Batch Plants

Author(s):

Bieler, Patric S.

Publication Date:

2004

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004830844> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 15532

Analysis and Modelling of the Energy Consumption of Chemical Batch Plants

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

Presented by
PATRIC S. BIELER
Dipl. Chem.-Ing. ETH
Dipl. NDS ETHZ in Betriebswissenschaften
born July 28, 1975
citizen of Luzern (LU) and Giswil (OW)

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. K. Hungerbühler, examiner
Prof. Dr. D. T. Spreng, co-examiner
Prof. Dr. A. Wokaun, co-examiner
Dr. U. Fischer, co-examiner

Zurich 2004

Abstract

Two different approaches for energy analysis and modelling of chemical batch plants (a top-down model and a bottom-up model) were conducted in this thesis. Steam, electricity and brine were the investigated utilities. Steam was used for heating the reactors and the building. Electricity was used by diverse electric equipment in the building. Brine was used for low-temperature cooling of the reaction vessels and the nutsche dryers (i.e., cooling below a starting temperature of about 30 °C).

A top-down model (TODOMO) consisting of a linear equation based on the specific energy consumption per ton of production output and the base consumption of the plant was postulated. This TODOMO showed to be applicable for batch plants of the following kind:

- Monoproduct batch plants
- Multiproduct batch plants with constant production mix
- Multipurpose batch plants in which only similar chemicals are produced

The results showed that the electricity consumption of infrastructure equipment was significant and responsible for about 50% of total electricity consumption. Base consumptions for the steam and the brine system were only minor. The specific energy consumption for the different buildings was related to the degree of automation and the production processes performed.

For the heating steam, a model only depending on air change rate and degree-days was applicable.

For multipurpose batch plants with highly varying production processes and changing production mix, the TODOMO was not applicable and produced inaccurate results. A bottom-up model (BOTUMO) was postulated for these plants. The model consists of a production dependent part and a production-independent part accounting for the infrastructure consumption. The production dependent part actually consists of a term related to the chemicals, another term related to the equipment, and a time-dependent loss term.

With the help of numerous measurements, different apparatus and unit operation models were built. These models use only easily accessible substance and apparatus information and account for the losses of the different apparatus. The models are therefore designed for being transferable to other batch plants and products and not limited to one specific plant. The single apparatus models showed that losses for steam and brine consumption are high. The losses were characterised by a so-called loss coefficient. This loss coefficient represents the heat transfer coefficient of the outside surface area of the equipment. For steam consumption, a loss coefficient of about $4.2 \cdot 10^{-2} \text{ kW} / \text{m}^2 / \text{K}$ was found while for brine consumption a loss coefficient of about $1.7 \cdot 10^{-2} \text{ kW} / \text{m}^2 / \text{K}$ was found. More than 50% of the losses of the steam are therefore due to the heating/cooling-system design with its steam traps.

With the help of the above-mentioned equations, an Excel[®] model was built for the modelling of whole production plants according to the BOTUMO. Modelling of the whole production plant was performed for one and two days,

one week and one month. The production data were taken from either the production record (PR) or the process step procedure (PSP). The modelling resulted in a high accuracy for the longer periods (PSP data is used as input).

Analyses of the modelling results for one month showed that the apparatus group *reactors and nutsche dryers* is the most important energy consumer in the building (apart from infrastructure consumption in the case of electricity). More detailed analyses of the energy consumption of this apparatus group showed, that about 30 to 40% of steam energy are lost and thus large optimisation potentials are revealed. For the electricity consumption, it is shown that the small circulation pumps of the heating/cooling-system of the reactors and nutsche dryers require about 25% of the total electricity consumption of this apparatus group (i.e., ca. 50% of the consumption of the stirrers) if no electric heating is performed. Electric heating is used for one single high-temperature reactor. The consumption of this heating circuit is larger than the consumption of all other stirrers in the building (over 25 stirrers).

A sensitivity analysis showed that the batch time has the largest influence on the energy consumption. Variations of $\pm 50\%$ in the batch time resulted in changes in energy consumption of about $\pm 30\%$.

Different saving potentials, ranging from elimination of reflux conditions to invention of a new heating/cooling-system for a generic batch reactor, were identified.

The applicability of the BOTUMO is shown for short and long modelling periods using different types of input data. Transferability and applicability to other buildings and chemicals need to be investigated in further case studies.

Zusammenfassung

In dieser Doktorarbeit wurden zwei verschiedene Arten der energetischen Analyse und Modellierung (ein top-down Modell und ein bottom-up Modell) von chemischen Batch Produktionsanlagen entwickelt. Die untersuchten Energien waren Dampf, Elektrizität und Sole. Dampf wurde sowohl zur Erhitzung der Reaktoren und Nutschentrockner (und ihres Inhaltes), als auch zur Gebäudeheizung benutzt. Die Elektrizität wurde von den verschiedenen elektrischen Apparaturen der Gebäude verbraucht. Die Sole wurde zu Tieftemperatur-Kühlzwecken verwendet (d.h. Kühlen unterhalb einer Starttemperatur von ca. 30 °C).

Ein top-down Modell (TODOMO), bestehend aus einer linearen Gleichung, basierend auf dem spezifischen Energieverbrauch pro Tonne Produktionsausstoss und dem Grundverbrauch des Gebäudes, wurde vorgeschlagen. Dieses TODOMO ermöglichte die energetische Modellierung von folgenden Typen von Batch Produktionsanlagen:

- Monoprodukt Batch Betriebe
- Mehrprodukt Batch Betriebe mit konstantem Produktmix
- Mehrzweck Batch Betriebe in denen ausschliesslich ähnliche Chemikalien produziert werden

Die Resultate zeigten einen signifikanten Elektrizitätsverbrauch der Infrastrukturanlagen auf (ca. 50% des totalen Stromverbrauches). Der Grundverbrauch für Dampf und Sole war nur gering. Der spezifische Energieverbrauch der untersuchten Gebäude zeigte einen klaren Zusammenhang mit dem Automationsgrad der Produktionsgebäude und den produzierten Chemikalien.

Für den Heizdampfverbrauch des Gebäudes wurde ein Modell entwickelt, welches nur vom Luftwechsel innerhalb des Gebäudes und von den Heizgradtagen abhängig ist.

Für Mehrzweck Batch Betriebe mit stark unterschiedlichen Produktionsprozessen und schwankendem Produktmix war das TODOMO nicht anwendbar und ergab ungenaue Resultate. Für diese Betriebe wurde ein bottom-up Modell (BOTUMO) postuliert und entwickelt. Das Modell besteht aus einem produktionsabhängigen Teil und einem batchzeitunabhängigen Grundverbrauchsteil. Der produktionsabhängige Teil besteht aus einem von den Chemikalienspezifikationen abhängigen Term, einem von den Apparatespezifikationen abhängigen Term und einem zeitabhängigen Verlustterm.

Durch diverse Messungen konnten Einzelapparate- und Einzeloperationsmodelle entwickelt werden. Diese Modelle benötigen ausschliesslich einfach zu bestimmende Substanz- und Apparatedaten und modellieren zudem die Verluste der verschiedenen Apparate. Die Modelle wurden so entwickelt, dass sie sich einfach auf andere Betriebe und Chemikalien übertragen lassen und nicht auf einen spezifischen Betrieb beschränkt sind. Bereits aus den Einzelapparatemodellen ging hervor, dass die Verluste für Dampf- und Soleverbrauch signifikant waren. Die Verluste wurden durch einen Verlustkoeffizienten charakterisiert. Dieser Verlustkoeffizient beschreibt den Wärmeübergangskoeffizienten an der Aussenfläche eines Apparates. Für den Dampfverbrauch wurde ein Ver-

lustkoeffizient von $4.2 \cdot 10^{-2} \text{ kW} / \text{m}^2 / \text{K}$ und für den Soleverbrauch ein solcher von $1.7 \cdot 10^{-2} \text{ kW} / \text{m}^2 / \text{K}$ gefunden. Hieraus kann geschlossen werden, dass über 50% des Verlustes beim Dampf auf das Heiz/Kühlsystem mit seinen Kondensatableitern zurückzuführen sind.

Zur Modellierung des Energieverbrauches ganzer Produktionsgebäude mit Hilfe des BOTUMO wurden die oben erwähnten Gleichungen in ein Excel[®] Modell integriert. Dieses Modell wurde zur Modellierung des Energieverbrauches des ganzen Produktionsgebäudes für einen und zwei Tage, eine Woche, sowie einen Monat verwendet. Die Modellrechnungen zeigten sehr gute Genauigkeiten für die Modellierung von längeren Perioden (mit Hilfe der PSP Daten).

Analysen über die Periode von einem Monat zeigten, dass die Apparategruppe *Reaktoren und Nutschentrockner* den wichtigsten Energieverbraucher im untersuchten Gebäude darstellt (neben dem Infrastrukturverbrauch bei der Elektrizität). Detailliertere Analysen dieser Apparategruppe zeigten, dass ca. 30-40% des Dampfverbrauches für Verluste aufgewendet werden musste. Dies weist auf grosse Optimierungspotenziale hin. Beim Elektrizitätsverbrauch konnte gezeigt werden, dass die kleinen Umwälzpumpen der Heiz-/Kühlsysteme der Reaktoren und Nutschentrockner ca. 25% des gesamten Elektrizitätsverbrauches dieser Apparategruppe benötigen (d.h. ca. 50% des Verbrauches der Rührwerke), wenn die elektrische Heizung nicht läuft (sonst entsprechend weniger). Die elektrische Heizung wird für einen einzelnen Hochtemperaturreaktor benötigt. Der Verbrauch dieser Heizung ist grösser, als der Verbrauch aller im Betrieb vorhandenen Rührwerke (über 25).

Eine Sensitivitätsanalyse wurde durchgeführt und zeigte, dass von allen untersuchten Parametern, die Batchzeit den grössten Einfluss auf den gesamten Gebäudeenergieverbrauch hat. Eine Variation der Batchzeit um $\pm 50\%$ resultierte in einer Veränderung des Gesamtenergieverbrauches von $\pm 30\%$.

Verschiedene Einsparpotenziale wurden gefunden. Diese reichen von der Elimination von Rücklaufbedingungen bis zu einem völlig neuen Design für die klassischen Heiz/Kühlsysteme.

Die Anwendbarkeit des BOTUMO wurde sowohl für kurze als auch für lange Zeitabschnitte gezeigt. Die verschiedenen Zeitabschnitte wurden mittels unterschiedlicher Genauigkeiten der Eingabedaten modelliert. Die Übertragbarkeit auf andere Produktionsgebäude und Chemikalien muss in zusätzlichen Fallstudien untersucht werden.