

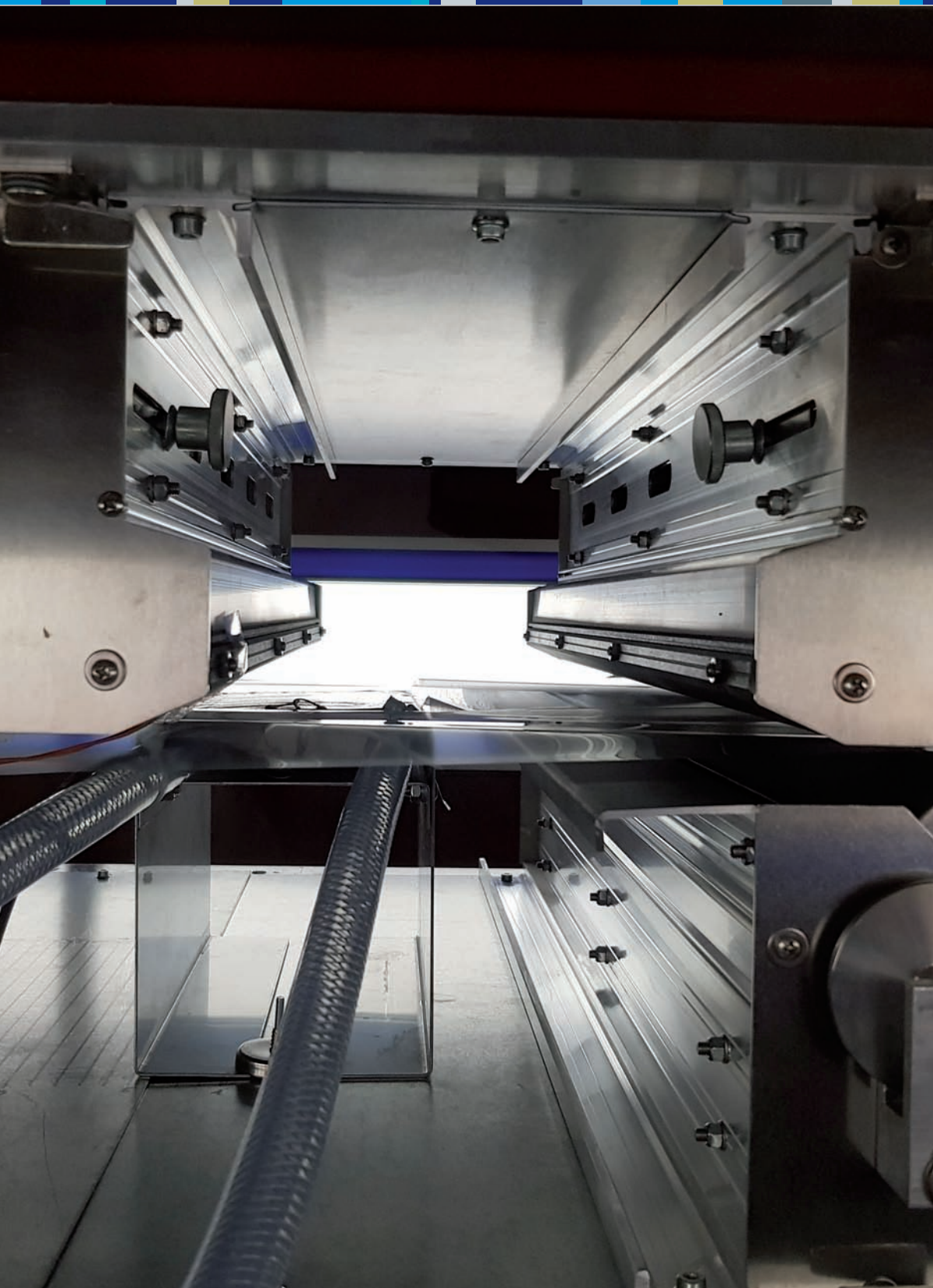
coating International

Anlagen und Verfahren zur Beschichtung und Veredelung

Machinery and Processing for Coating and Converting

Sonderdruck aus 1-2018

www.coating.ch



TROCKNUNG DRYING

- ▶ Trocknung –
Prozess- Modellierung
und Messungen
- ▶ Drying – process modelling
and measurements

Trocknung – Prozess- Modellierung und Messungen

Drying – process modelling and measurements

Von Vivek Dhaka, Nikolaus Gröhl, Florian Lemm, Drytec GmbH & Co. KG
By Vivek Dhaka, Nikolaus Gröhl, Florian Lemm, Drytec GmbH & Co. KG

1. EINLEITUNG. Die Trocknung ist einer der wichtigsten und komplexesten Prozessschritte im R2R-Betrieb einer Beschichtungsanlage. Die bloße Komplexität wird durch die mehrdimensionale Abhängigkeit von mehreren Prozessparametern diktiert, z.B. vom Wärmeübergangskoeffizient (HTC), der Lewis-Zahl, dem wechselseitigen Diffusionskoeffizienten usw. Das Verständnis dieser Parameter spielt eine entscheidende Rolle bei der Dimensionierung von Trocknungsanlagen. Die Forschungs- und Entwicklungsabteilung von Kroenert und Drytec untersucht kontinuierlich auf diesem Gebiet durch numerische Simulationen, theoretische Modellierungen und Experimente zur Bewertung alternativer Trocknungstechnologien. Dieser Artikel gibt einen Einblick in realisierte HTC-Messungen und in die Vorteile der computergestützten Simulation (CAS) in der Prozess- und Designoptimierung, die zu einer verbesserten Effizienz und Wirtschaftlichkeit beiträgt. Das Trocknen von Polymerlösungen fällt unter die Kategorie von Prozessen, bei denen gleichzeitig Wärme (von heißer Luft) und Stoffe (verdampfendes Lösungsmittel) durch die Luft-Flüssigkeits-Grenzfläche fließen. Angesichts der großen Bedeutung des Prozesses ist es äußerst wichtig, das komplexe Netzwerk von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Schlüsselparametern zu visualisieren. Ein solcher Schlüsselparameter ist der Wärmeübergangskoeffizient.

2. WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENT (HTC). Der von der Düse ausgehende Heißluftstrahl dient als Quelle für die Wärmeübertragung auf das Beschichtungssystem. Die Frage, die man stellen muss, ist jedoch, ob all diese verfügbare Wärme auf die Beschichtung übertragen wird? Wenn nicht, welcher Teil davon wird tatsächlich von der Beschichtung aufgenommen? Wie kann diese fraktionierte Aufnahme maximiert werden? Diese Frage kann beantwortet werden, indem die Grenzschichtphänomene näher betrachtet werden. Wenn ein fester Körper mit der Temperatur T_s in einen Fluidstrom der Temperatur T_f gebracht wird, der so gehalten wird, dass $T_f > T_s$ ist, dann wird die Temperatur des festen Körpers ansteigen. Dieser Temperaturanstieg erfolgt nur über eine dünne Schicht (Grenzschicht) in unmittelbarer Nähe des Festkörpers. Um mit der Formulierung zu beginnen, ist es notwendig, die Energiebilanz

1. INTRODUCTION. Drying in roll-to-roll operations is one of the most important and complex process steps. The sheer complexity is dictated by the multi-dimensional dependency on several process parameters, for e.g. heat transfer coefficient (HTC), Lewis number, mutual diffusion coefficient, etc. The understanding of these parameters plays a crucial role in the dimensioning of dryers. The R&D department at Kroenert and Drytec is ceaselessly investigating in this field, while performing numerical simulation, theoretical modelling and experiments to evaluate alternative drying technologies and parameters aforementioned. This article will give an impression of realized HTC measurements and advantages of computer-aided simulation (CAS) in process and design optimization leading to improved economics.

Drying of polymer solutions falls under the category of processes involving simultaneous heat (from hot air) and mass transfer (evaporating solvent) through the air-liquid interface. Given the prime importance of process, it is of utmost necessity to visualize the intricate network of interdependencies among various key parameters. One such parameter is the heat transfer coefficient.

2. HEAT TRANSFER COEFFICIENT (HTC). The hot air jet emanating from the nozzle acts as the source for heat transfer to the coating system. However, the question that one must ask is whether all of this available heat gets transferred to the coating? If not, then what fraction of it is actually being taken up by the coating? How can this fractional intake be maximized? These questions can be answered by introducing the concept of Boundary Layer phenomena.

When a solid body, with temperature T_s , is placed in a fluid stream of temperature T_f maintained such that $T_f > T_s$, then the temperature of the solid body will rise. This increment in temperature will occur only over a thin layer (boundary layer) in the immediate neighbourhood of the solid body. To begin with the formulation, it is necessary to set up the energy balance across the boundary layer. Assuming that radiation has no role to play here, then the heat transfer can only take place by conduction. On the basis of Fourier's law, the heat flux $q(x)$ through an area A and over a defined time interval is proportional to the temperature gradient across the boundary between a solid surface and fluid stream, so that

über die Grenzschicht hinweg aufzustellen. Unter der Annahme, dass Strahlung hier keine Rolle spielt, kann die Wärmeübertragung nur durch Wärmeleitung erfolgen. Auf der Grundlage des Fourierschen Gesetzes ist der Wärmefluss $q(x)$ durch eine Fläche A und über ein definiertes Zeitintervall proportional zum Temperaturgradienten über der Grenze zwischen fester Oberfläche und Fluidstrom.

$$q(x) = -\kappa \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad [1]$$

Wobei κ die Wärmeleitfähigkeit des Fluids ist. Nach Newtons Abkühlungsgesetz kann die pro Fläche und Zeit ausgetauschte Wärme als Produkt aus lokalem Wärmeübertragungskoeffizienten und Temperaturdifferenz ausgedrückt werden.

$$q(x) = \alpha(x) \times (T_f - T_s) \quad [2]$$

Wenn dimensionslose Größen eingeführt und [1] & [2] kombiniert werden, ergibt das

$$q(x) = -\kappa \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad [1]$$

Where κ is the heat conductivity of a fluid. According to Newton's law of cooling, the heat exchanged per unit area and time can be expressed as a product of local heat transfer coefficient and temperature difference

$$q(x) = \alpha(x) \times (T_f - T_s) \quad [2]$$

Introducing dimensionless quantities and comparing [1] & [2], leads to

$$Nu(x) = \frac{\alpha(x) \times l}{\kappa} = - \frac{l \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)}{(T_f - T_s)} \quad [3]$$

Where $Nu(x)$ is the local dimensionless coefficient of heat transfer, popularly known as the Nusselt number. Hence, the heat flux can be rewritten as



Das Kunststoff-Zentrum
Prüfung · Weiterbildung · Forschung · Zertifizierung

Beschichtung technischer Textilien

13. – 14. März 2018, Würzburg

Freuen Sie sich auf Beiträge namhafter Unternehmen

Special guest
Michael Wiesner
Digitale (Un)sicherheit

Programm auf
www.skz.de/8016

BRÜCKNER covestro CTF 2008 DITF FILK FPS Fraunhofer IGB H Sika stfi VALMIRA GLASS® VAUDE Vinnolit WACKER

Medienpartner:
coating
International

$$Nu(x) = \frac{\alpha(x) \times l}{\kappa} = -\frac{l \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)}{(T_f - T_s)} \quad [3]$$

$$q(x) = \left(\frac{\kappa}{l} \right) \times Nu(x) \times (T_f - T_s) \quad [4]$$

Hier ist $Nu(x)$ der lokale dimensionslose Koeffizient der Wärmeübertragung, allgemein bekannt als die Nusselt-Zahl. Daher kann der Wärmefluss wie folgt umgeschrieben werden:

$$q(x) = \left(\frac{\kappa}{l} \right) \times Nu(x) \times (T_f - T_s) \quad [4]$$

Durch Umgestaltung der obigen Formulierung wird:

$$Nu(x) = \frac{l}{\kappa} \left(\frac{q(x)}{(T_f - T_s)} \right) \quad [5]$$

Aus [1] ist ersichtlich, dass für Grenzschichten mit vergleichsweise größeren Dicken der Wärmefluss abfällt, was zu einer Abnahme der lokalen Nusselt-Zahl führt ([5]). Für eine lokale Grenzschicht der Dicke $\delta(x)$ gilt:

$$\alpha(x) \propto Nu(x) \propto \frac{1}{\delta(x)} \quad [6]$$

Weiter zur Frage, wie kann man die Nusselt-Zahl beeinflussen? Im Allgemeinen spielen hier mehrere Parameter eine wichtige Rolle, beispielsweise Düsenabstand, Austrittsdurchmesser (oder Schlitzbreite bei Schlitzdüsen), Düsenaustrittsgeschwindigkeit, Austrittswinkel etc. Aus Gründen der Praxisnähe wird im Folgenden nur auf den Parameter «Düsenaustrittsgeschwindigkeit» eingegangen. Um eine konkrete Vorstellung von der lokalen Nusselt-Zahl zu erhalten, kann daher eine der folgenden Messverfahren genutzt werden:

- Es werden ein Wärmeflussensor und eine Kühlplatte mit Anschlüssen für gekühltes Wasser verwendet. Das gekühlte Wasser wird von einer Kühlvorrichtung (Thermostat) bereitgestellt. Die Verbindung des Wärmeflussensors und der Kühlplatte erfolgt durch Wärmeleitpaste. Die Temperatur an der Unterseite des Wärmeflussensors wird durch die am Kühlgerät eingestellte Temperatur gesteuert. Die gesamte Anordnung wird unter einer Düse innerhalb des Trockners bei definierter Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur angeordnet. Die Temperatur der Luft wird durch ein Thermoelement gemessen und alle Daten werden mit einem Datenlogger aufgezeichnet.
- Der Wärmeflussensor ist direkt an der Materialbahn befestigt und ein Thermoelement unter dem Sensor angeordnet, um die Materialbahntemperatur zu erfassen. Die Bahn wird dann bei definierter Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Bahngeschwindigkeit durch den Trockner geführt.

Rearranging the above formulation

$$Nu(x) = \frac{l}{\kappa} \left(\frac{q(x)}{(T_f - T_s)} \right) \quad [5]$$

It is evident from [1] that for boundary layers with comparatively higher thicknesses, the heat flux will drop down, leading to a decrement in the local Nusselt number ([5]). Therefore, the relationship between HTC and local boundary layer thickness $\delta(x)$ can be established as shown below. [6]

$$\alpha(x) \propto Nu(x) \propto \frac{1}{\delta(x)} \quad [6]$$

Moving on to the question at hand, i.e. how can one influence the Nusselt number? In general, there are several parameters that play a significant role here, for example, nozzle to web spacing, nozzle pitch, outlet diameter (or width in case of slot nozzles), nozzle outlet speed, outlet angle, etc. Covering all parametric influences is beyond the scope of this article, and hence, the focus lies on only one process parameter, i.e. nozzle outlet speed. To get a concrete idea of the local Nusselt number, one of the following measurement setups can be realised:

- A plate with connections for cooled water provided by a cooling device (thermostat) is attached to the heat flux sensor by heat conducting cream. The bottom side temperature of the heat flux sensor is controlled by the temperature set at the cooling device. The whole arrangement is placed under a nozzle inside the dryer at defined air speed and air temperature. The temperature of the air is measured by a thermocouple and the entire data can be recorded via a data-logger.

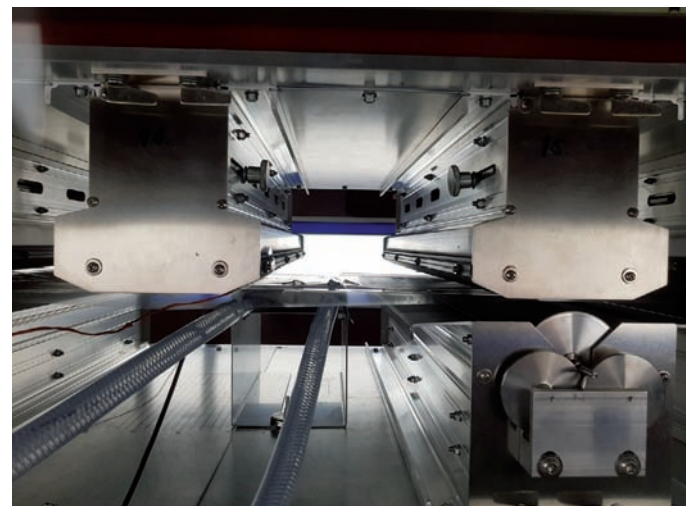


Abb. 1: HTC - Messung

Fig. 1: Static HTC measurement

Die Messung des Wärmestroms auf einer sich bewegenden Bahn birgt einige Schwierigkeiten:

- Ein guter Wärmeleitkontakt zur Bahn ist zu gewährleisten.
- Das Fehlen einer kontrollierten Kühlung führt zu einem schnelleren Annähern der Temperatur der unteren Seite des Wärmeflussensors an die Lufttemperatur. Dies führt dazu, dass die Temperaturdifferenz zwischen Unter- und Oberseite in den Bereich der Sensortoleranz fällt.
- Der Abstand zwischen Wärmeflussensor und Düse sollte so stabil wie möglich sein. In Rollentrocknern ist dies kein Problem, aber in Schwebetrocknern sollte die Bahn stabil sein und die Bahnspannung hoch genug sein, um die Bahn durch den Trockner so flach wie möglich zu führen.

Beide Methoden wurden im Kroenert Technologiezentrum durchgeführt. Aus den Messwerten über die Düsenbreite wurde die Nusselt-Zahl bei konstantem Abstand Düse-Bahn ermittelt. Ein Anstieg der Nusselt-Zahl wurde beobachtet, wenn die Gebläsegeschwindigkeit (Düsenauslassgeschwindigkeit) erhöht wurde.

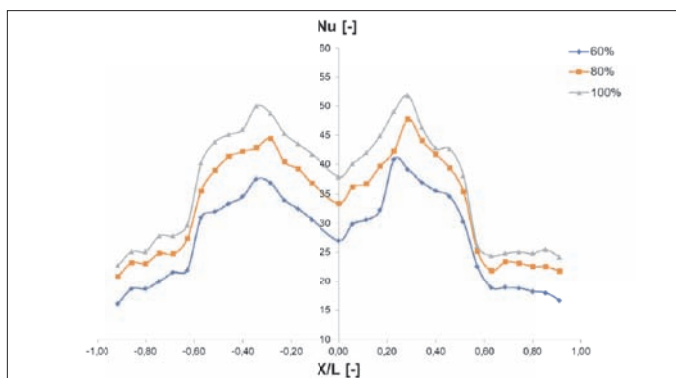


Abb.2: Änderung der Nusselt Zahl vs. der normierten Position unter einer typischen Düse (0 beschreibt die Düsenmitte)

Fig.2: Variation of Nusselt number with dimensionless distance under a typical nozzle (0 represents the centre of nozzle)

3. COMPUTERGESTÜTZTE SIMULATION (CAS). Nachdem nun ein Parameter gemessen wurde, stellt sich die Frage, wie der bestehende Trocknungsprozess verbessert werden kann. Hier kommt CAS ins Spiel. Wie bereits erwähnt, ist das Trocknen ein komplexer Prozess mit mehreren parametrischen Abhängigkeiten. Die CAS ermöglicht es, den Prozess in seiner Gesamtheit zu verstehen und liefert eine vereinfachte, aber dennoch detaillierte Beschreibung des Prozesses. Die Vorteile von CAS können wie folgt festgehalten werden:

- Vermittelt ein besseres Verständnis des Prozesses.
- Liefert qualitativen und quantitativen Einfluss von Parametern (Prozess / Design) auf den Gesamtprozess.
- Baut den Weg auf, um das gewünschte Ziel zu erreichen.
- Markiert mögliche Bereiche für die Optimierung.
- Führt zu einer Verbesserung der Prozesseffizienz durch eine alternative Trocknungsstrategie. Zum Beispiel, um den gleichen Endfeuchtigkeitsgehalt durch Variation von Trocknungstemperatur und Luftströmung zu erreichen, wodurch der Gesamtenergieverbrauch verringert wird oder indem die Produktionsgeschwindigkeiten und somit die Produktmengen verbessert werden.


- The heat flux sensor is fixed on the web and a thermocouple is placed under the sensor to keep track of the temperature. The web is then run through the dryer with defined air temperature and air speed.


The measurement of the dynamic heat flux on a moving web will generate some difficulties:

- Maintaining good heat conducting contact to the web.
- An absence of controlled cooling results in a quicker approach of bottom side temperature of heat flux sensor to the air temperature. This will result in a bottom and top side temperature difference falling into the range of the sensor's tolerance.
- The distance heat flux sensor to nozzle should be as stable as possible. In roller type dryers this is not an issue but in flotation dryers, the web should be sturdy and the web tension high enough to guide the web through the dryer as flat as possible.

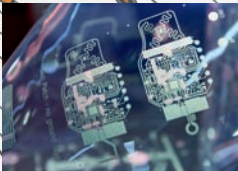
Both methods were executed at Kroenert's Technology Centre. The variation in Nusselt number was calculated while passing a nozzle pitch. A significant increment in the Nusselt number was observed when the blower speed (nozzle outlet speed) was increased.

3. COMPUTER AIDED SIMULATION (CAS). Once a parameter has been measured, the question arises as to how it can be used to improve the existing drying process. Here, CAS comes into the picture. As stated before, drying is a complex process with sever-






 Messe München
 Connecting Global Competence

LOPEC 2018: Status quo of printed electronics




Book your ticket now!
lopec.com





Exhibition: March 14–15, 2018
Conference: March 13–15, 2018
 Messe München, Germany


 International Exhibition and Conference for the Printed Electronics Industry

Durch jahrelange kontinuierliche Forschung auf dem Gebiet der Trocknung hat das F & E-Team bei Kroenert und Drytec erfolgreich ein Modell entwickelt, das die effizientesten Prozessbetriebsbedingungen präzise vorhersagen kann und sich als ein bemerkenswertes Werkzeug bei der Gestaltung von Trocknern erwiesen hat.



Abb. 3: Startfenster des Trocknerberechnungsprogramms
Fig.3: Schematic of drying program

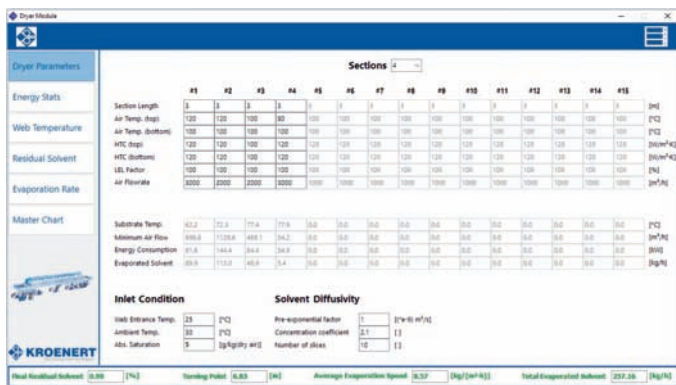


Abb. 4: Fenster zur Parametereingabe
Fig.4: Parameter window

4.AUSBLICK. Die zugrunde liegende Philosophie hinter diesen Trocknungstests im Kroenert Technology Center besteht darin, alle notwendigen Daten für die Durchführung von CAS zu sammeln. Das Ergebnis wird die Entwicklung und weitere Optimierung der aktuellen Trocknungstechnologie beschleunigen. Zur Verbesserung der Düsen- und Trocknergeometrie wird insbesondere die Bestimmung prozess- und designbezogener Parameter ergänzt um eine qualitative Bewertung der Strömungsdynamik eingesetzt. Dieser Ansatz der Verknüpfung von praktischen Erfahrungen mit theoretischen Rahmenbedingungen führt zu sehr energieeffizienten Maschinen und Trocknern. ↩

Drytec GmbH & Co. KG, D-22848 Norderstedt, www.drytec.net

al parametric interdependencies. CAS enables comprehension of the process in its entirety and provides a simplified, yet detailed description of the process. The advantages of CAS can be pinned down as follows:

- Imparts a better understanding of the process.
- Delivers qualitative and quantitative influence of parameters (process/design based) on the overall process.
- Builds up the pathway to help meet the required target.
- Highlights possible areas for optimization.
- Leads to improvement in process efficiency by presenting an alternative drying strategy. For example, achieving the same final moisture content by reducing temperature/airflow, thereby cutting down on total energy consumption or by improving production speeds and hence, higher product yields.

With years of continuous research in the field of drying, the R&D team at Kroenert and Drytec has successfully developed a model, which can accurately predict the most efficient process operating conditions, and has proven to be a remarkable tool in guiding the design of dryers.

4. OUTLOOK. The underlying philosophy behind these drying tests at the Kroenert Technology Centre is to gather all necessary data for performing CAS; the outcome of which will expedite the development and further optimization of current drying technology. The determination of process and design related parameters supplemented with the qualitative evaluation of flow dynamics, in particular, are being used to improve the nozzle and dryer geometry. This approach of combining practical experience with theoretical framework will lead to highly energy-efficient roll-to-roll converting machines. ↩

Drytec GmbH & Co. KG, D-22848 Norderstedt, www.drytec.net