
PROSIM. Revisión bibliográfica de las tecnologías asociadas a los desarrollos del proyecto

Entregable N°1 ProSIM. ITC-AICE



**GENERALITAT
VALENCIANA**

iVACE
INSTITUT VALENCIÀ DE
COMPETITIVITAT EMPRESARIAL



UNIÓN EUROPEA
Fondo Europeo de
Desarrollo Regional

Una manera de hacer Europa

1. Antecedentes

El empleo de técnicas de modelización y simulación es muy habitual hoy en día en los desarrollos tecnológicos asociados a multitud de ramas de la ciencia y la ingeniería, tanto para el estudio del comportamiento de materiales, como del procesamiento de estos. Su utilidad es muy grande ya que permiten resolver problemas y/o validar funcionalidades y condiciones de operación que, de otro modo, requerirían de costosos procedimientos experimentales y ensayos

Los campos de aplicación en los que más extendido se encuentra actualmente la modelización y simulación en el contexto industrial de la baldosa cerámicas son:

- Simulación del comportamiento de materiales: microestructura, generación de tensiones durante la cocción/enfriamiento
- Simulación del procesamiento: prensado, secado, cocción y pulido
- Simulación del comportamiento del producto en uso: resistencia al impacto, resistencia a la aplicación de cargas

El siguiente entregable recoge únicamente la revisión bibliográfica de las tecnologías de modelización y simulación de procesos relacionados con los desarrollos del proyecto, correspondientes a los siguientes procesos:

- Sinterización de gres porcelánico
- Cocción de revestimiento poroso
- Fenómeno de acoplamiento esmalte-soporte
- Secado por atomización de suspensiones cerámicas.

2. Revisión Bibliográfica

A continuación se describe de forma detallada los principales trabajos relacionados con los desarrollos del proyecto, los cuales se han utilizado para impulsar los avances del proyecto.

2.1. Sinterización de gres porcelánico

La sinterización es uno de los procesos tecnológicos más importantes en la industria pulvimetalúrgica y cerámica. La sinterización es el proceso por el cual se produce una pieza compacta y consolidada cuando se le aplica un ciclo térmico consistente en calentar la pieza a una temperatura determinada. Una teoría racional de la sinterización debe predecir las vías de producción de la estructura requerida de un cuerpo sinterizado con el fin de proporcionar sus propiedades físico-químicas y físico-mecánicas que están determinadas por esta estructura. Los conceptos teóricos de la sinterización se basaban originalmente en ideas de una organización discreta de los medios porosos.

Sin embargo, la cinética de sinterización de los cuerpos porosos reales está determinada no sólo por las propiedades de las partículas de polvo y la naturaleza de su interacción, sino también por factores macroscópicos. Entre ellos se encuentran las restricciones cinemáticas (por ejemplo, la adhesión entre la muestra porosa y la superficie del horno), las fuerzas aplicadas externamente y, también, la falta de homogeneidad de las propiedades en la pieza investigada (por ejemplo, la falta de homogeneidad de la distribución de la densidad inicial causada por el prensado preliminar de la muestra porosa). El tratamiento insuficiente de las cuestiones enumeradas anteriormente fue una de las razones básicas que han obstaculizado el uso de la teoría de la sinterización. Así, los problemas indicados deberán resolverse mediante una descripción microscópica que tenga en cuenta los conceptos y fenómenos macroscópicos que difieren en principio del análisis local.

Estos problemas de aplicación de las ideas teóricas a la práctica de la sinterización pueden ser una razón para el limitado número de monografías dedicadas exclusivamente a la sinterización [1]–[6].

En esencia, Frenkel [7] fue el primero en aplicar el enfoque reológico para la sinterización. La relación que determina la cinética de sinterización, fue derivada por Frenkel sobre la base del análisis de dos problemas modelo: la sinterización conjunta de dos partículas esféricas iguales y la contracción de un poro esférico en un medio viscoso infinito. Estas ideas fueron ampliadas y desarrolladas por Mackenzie y Shuttleworth [8]. Estos elaboraron un método de descripción macroscópica de la sinterización como una compresión global uniforme de un medio poroso caracterizado por dos módulos de viscosidad. Mackenzie derivó las relaciones de la dependencia de la porosidad para estos módulos.

Asimismo, una teoría completa de la sinterización, con base termodinámica, fue construida por Skorohod [9]. La teoría se basa en el concepto fenomenológico del flujo viscoso generalizado de los cuerpos porosos. Aquí se encuentra la derivación de las relaciones para las dependencias de los parámetros reológicos (como las viscosidades y la tensión efectiva de sinterización) de la porosidad. El libro contiene también un análisis de los principales mecanismos moleculares del flujo viscoso de los cuerpos amorfos y cristalinos reales, la cinética del crecimiento de los contactos interparticulares y los modelos de sinterización no isotérmica y de sinterización acompañada de heterodifusión. Estas ideas fueron también desarrolladas de forma independiente por Scherer [10], quien introdujo un modelo de sinterización viscosa de materiales amorfos (vidrio) basado en la idea de partículas de polvo de forma cilíndrica.

Todos estos desarrollos fueron compilados, estructurados, revisados y ampliados por Olevsky [11], habilitando la posibilidad de describir a través de una descripción microscópica el comportamiento macroscópico de una pieza real asumiendo un enfoque fenomenológico en la descripción de los modelos. Esas condiciones permitieron el uso de esta descripción, conocida como modelo SOVS, en paquetes de modelado mediante elementos finitos (FE), que permiten la simulación del comportamiento de materiales de tamaño macroscópico. Estos modelos han sido utilizados ampliamente en la bibliografía por diversos autores [12], [13] para el estudio del proceso de sinterización de materiales cerámicos de alta tecnología, y solo recientemente han sido utilizados por el equipo de ITC-AICE para su uso en gres porcelánico [14]. Sin embargo, las particularidades de la cerámica tradicional obligan a una mejora de los parámetros del modelo para alcanzar los niveles de precisión y tolerancia requeridos por las piezas reales.

2.2. Cocción de revestimiento poroso

La cocción del revestimiento poroso se produce de forma análoga a como se produce la del gres porcelánico, con el único cambio en el ciclo térmico al que se somete al soporte cerámico. Por tanto, se puede hablar también de sinterización en el caso del revestimiento poroso, pero la forma en la que se produce el fenómeno es ligeramente distinta. El proceso de sinterización puede ser dividido en tres tipos [15]: sin fase líquida (sinterización del estado sólido), con una cantidad limitada de fase líquida (<10%) (sinterización en fase líquida) o solo en fase líquida (sinterización viscosa). Así, mientras que para el gres porcelánico la sinterización se produce mayoritariamente por fase líquida (se produce una densificación del material gracias a ello), en el revestimiento poroso la sinterización se produce en su mayor parte sin presencia de fase líquida (con poca o nula densificación del material).

Existen amplias revisiones sobre los modelos de sinterización para la sinterización en fase líquida (véase, por ejemplo, los trabajos de German [1], Schatt [16], Savitskii [2] o Exner y Arzt [17]), que son continuaciones o extensiones del fenómeno descrito en la Sección 2.1. Los trabajos teóricos posteriores sobre la sinterización en estado sólido y líquido consideraron efectos adicionales como la sinterización no isotérmica, la gravedad, la orientación de las partículas, la contracción anisotrópica [18] o la superposición de cargas externas. Además, la teoría de la sinterización también se aplicó a nuevos métodos de producción, como la sinterización por microondas [19] o el moldeado por sinterización [20], [21]. Aunque los avances en los modelos en fase sólida hayan sido menores, estos también han sido implementados en software de simulación por elementos finitos como ABAQUS, y utilizados para el estudio de la sinterización de cilindros de molibdeno [22], [23]. Los modelos más avanzados [20] se basan en una combinación de conceptos ya desarrollados, por ejemplo, por Ashby [24], [25] y Arzt [26] en lo que respecta a los mecanismos de sinterización, y en los trabajos de Scherer [27], Abouaf et al [28], Jagota y Dawson [29] y McMeeking y Kuhn [30] en lo que respecta a los aspectos mecánicos. Estos modelos combinan los resultados de la segunda y tercera etapa de sinterización con los modelos de crecimiento del grano en los sólidos porosos.

Al igual que ocurre con el gres porcelánico, estos modelos no han sido nunca utilizados en cerámica tradicional, por lo que no existe bibliografía específica del uso de estos modelos para el estudio del comportamiento del revestimiento poroso durante su cocción.

2.3. Acoplamiento esmalte-soporte

Es bien conocido que el enfriamiento de las baldosas puede llegar a producir tensiones residuales, originadas por el acoplamiento esmalte-soporte [31] y las producidas por gradientes de temperatura durante el enfriamiento [32], [33].

Estas tensiones y defectos originados por el acoplamiento esmalte-soporte han sido estudiados y modelados ampliamente en la bibliografía [34]–[36]. El principal factor que influye en la aparición de tensiones (y posteriores defectos) entre el esmalte y el soporte es la diferencia entre los coeficientes de dilatación de ambos cuerpos. Desgraciadamente, los modelos desarrollados se basan en efectos y variables macroscópicas que solo se corresponden con la experimentación en entornos de laboratorio.

Para un análisis más detallado del fenómeno, en la bibliografía se encuentran trabajos en los que se ha estudiado la sinterización de sistemas multicapa (como el de la baldosa, que consta de un soporte y un vidriado) [37], [38]. Estos trabajos son directamente trasladables a la cerámica tradicional, y se consideran la base para el estudio de este fenómeno en 3 dimensiones. Nótese, sin embargo, que ITC-AICE ya ha trabajado en el pasado con sistemas multicapa para la predicción de curvaturas en baldosas, aunque estos modelos se reducían a 2 dimensiones [39], [40].

2.4. Secado por atomización de suspensiones cerámicas

El secado por atomización se utiliza ampliamente en la industria alimentaria, farmacéutica y de detergentes para producir polvos secos, así como en la industria cerámica para producir polvos de gran fluidez. Se trata de un proceso complejo y altamente no lineal debido a la combinación del transporte de gotas o partículas dentro de la cámara de secado y el proceso simultáneo de eliminación de humedad. El control de estos fenómenos simultáneos, que culminan en una determinada pérdida de humedad en la gota o la partícula, es la clave para garantizar el funcionamiento fiable de un atomizador.

El método de simulación más detallado que provee de la mejor comprensión y visualización del proceso es el CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) [41]. El núcleo de una simulación CFD de un secador de pulverización, de hecho para cualquier simulación CFD, es el marco de predicción del flujo de aire o del flujo de fluido. Los primeros trabajos de simulación CFD en atomizadores consideraban un estado estacionario del equipo [42], [43]. Con esta suposición, estos informes anteriores eran principalmente simulaciones bidimensionales en estado estacionario. Además, las simulaciones bidimensionales en estado estacionario también dieron lugar a una solución convergente. Sin embargo, dentro de los atomizadores es habitual que aparezcan flujos transitorios y/o fluctuantes que no son capturados con estas simulaciones, y los cuales son relativamente importantes para predecir los datos experimentales. Por otro lado, los atomizadores inducen la presencia de remolinos en el aire de entrada para mejorar la transferencia de masa y de energía entre el aire y las gotas. Con ello se incrementa la complejidad de la predicción del flujo de aire dentro del atomizador, como atestiguan varios investigadores [44], [45].

Pese al potencial del CFD como herramienta de simulación, ya utilizada en la atomización de suspensiones cerámicas [46], el coste de computación y la cantidad de información requerida (geometría del atomizador, lanzas de dispersión de gotas, condiciones de contorno complejas...) hacen de esta técnica poco realista para ser utilizada en el control de equipos a nivel industrial. Por suerte, existen formas de controlar y analizar el funcionamiento de los atomizadores mediante modelos más simples que evalúen el secado aplicando los balances de energía y materia a gran escala [47], [48]. En efecto, la modelización es útil para predecir el comportamiento del secado de las gotas y las partículas, y cómo éste varía con las condiciones de funcionamiento. Sin embargo, la modelización de los atomizadores se enfrenta a varios retos: los complejos flujos tridimensionales en remolino dentro de la cámara de secado, la distribución

del tamaño de las gotas a partir del proceso de atomización y el mecanismo de formación de una partícula a partir de la gota.

Kemp y Oakley [49] clasificaron los modelos del secado por atomización en cuatro niveles, que posteriormente se ampliaron a cinco:

1. Balance de calor y masa; proporciona información útil, especialmente el balance de masa de agua (o disolvente), pero no está relacionado con el tamaño del secador o su posible rendimiento, ni con el comportamiento de los sólidos o las partículas individuales.
2. Los cálculos de alcance (aproximados) dan una primera estimación del tamaño del secador y del tiempo de secado, suponiendo un modelo teórico simple con una tasa constante y un secado de primer orden descendente.
3. Los cálculos de escalado (modelo integral) proporcionan las dimensiones globales y las cifras de rendimiento en el escalado, basándose en las curvas de secado medidas en experimentos a pequeña escala o en plantas piloto, y tratando el secador como un todo.
4. Los métodos detallados (modelo incremental) hacen un seguimiento de las condiciones locales de los sólidos y el gas (por ejemplo, las variaciones a través de una capa o el historial de temperatura de una partícula) a medida que avanza el secado, normalmente como una variación unidimensional con la longitud o el tiempo.
5. Los métodos detallados (CFD o modelos de subpartículas) permiten obtener patrones de flujo tridimensionales complejos o el comportamiento dentro de una sola gota o partícula.

Desde la coordinación del proyecto se optó por centrarse en modelos de secado de nivel 3 según la escala anterior. Dentro de este nivel, resulta de extrema importancia el trabajo de [50], el cual cumple todos los requisitos para poder ser utilizado en el proceso de secado por atomización de suspensiones cerámicas. Dicho modelo consiste en discretizar el tamaño de las gotas para resolver los balances de energía y materia a nivel de partícula. Tras la resolución, se combina cada modelo individual de tamaño de gota para representar el estado final del atomizador. A su vez, los balances de materia y energía pueden realizarse gracias a las correlaciones existentes en cuanto a la relación entre el diámetro de las gotas y su humedad [51], así como a los modelos que simplifican los balances de materia y energía a nivel de partícula, como el modelo CDC [52].

Finalmente, cabe destacar que no se encontró bibliografía referente a modelos de secado por atomización de suspensiones cerámicas de estas características, más allá del trabajo de Favalli [46], por lo que los desarrollos en el ProSIM deberán adaptarse a las particularidades de las arcillas utilizadas en la cerámica tradicional.

3. Conclusiones

En este entregable se han recopilado los resultados de la búsqueda bibliográfica realizada en el Paquete de Trabajo 1 del proyecto. Para cada uno de los modelos a desarrollar se ha realizado una búsqueda bibliográfica exhaustiva que determine el estado actual del arte y el punto de partida para la realización del Paquete de Trabajo 2. La revisión constata la falta de avances en la modelización y simulación de procesos en la fabricación de baldosas cerámicas. No obstante, los fenómenos físico-químicos que rigen el comportamiento de las baldosas, el sistema multicapa baldosa-vidriado y el comportamiento de las suspensiones cerámicas durante el secado por atomización son muy similares a procesos ya estudiados con otros materiales, de los cuales existe una amplia bibliografía. Dicha información será utilizada para realizar la transferencia de conocimiento al sector cerámico.

4. Bibliografía

- [1] R. M. German, "Liquid-phase Sintering and Plenum," 1985.
- [2] A. P. Savitskii, "Liquid phase sintering of the systems with interacting components," *Russ.*

Acad. Sci., 1991.

- [3] M. N. Rahaman and M. Dekker, "Ceramic Processing and Sintering," 1995.
- [4] R. M. German, "Sintering Theory and Practice," 1996.
- [5] E. A. Olevsky, "Theory of sintering: From discrete to continuum," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, 1998.
- [6] M. M. Ristić and S. Đ. Milosević, "Frenkel's theory of sintering," *Sci. Sinter.*, vol. 38, no. 1, pp. 7–11, 2006.
- [7] J. Frenkel, "Viscous flow of crystalline bodies under the action of surface tension, J," *Phys. USSR*, vol. 9, no. 5, pp. 385–391, 1945.
- [8] K. Mackenzie and R. Shuttleworth, "A phenomenological theory of sintering," in *Proc. Phys*, 1949, pp. 833–852.
- [9] V. V. Skorohod, *Rheological basis of the theory of sintering*. Kiev: Naukova Dumka, 1972.
- [10] G. W. Scherer, "Sintering of low-density glasses: I, theory," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 60, no. 5–6, pp. 236–239, 1977.
- [11] E. A. Olevsky, "Theory of sintering: from discrete to continuum," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 23, no. 2, pp. 41–100, 1998.
- [12] M. Reiterer, K. Ewsuk, and J. Argüello, "An Arrhenius-Type Function to Model Sintering Using the Skorohod-Olevsky Viscous Sintering Model Within a Finite-Element Code," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, pp. 1930–1935, 2006.
- [13] J. G. Argüello, M. W. Reiterer, and K. G. Ewsuk, "Verification, performance, validation, and modifications to the sovs continuum constitutive model in a nonlinear large-deformation finite element code," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 92, no. 7, pp. 1442–1449, 2009.
- [14] J. Balaguer, J. M. Tiscar, A. Saburit, F. Quereda, and M. Aguilera, "Modelización de la sinterización de baldosas cerámicas mediante el modelo SOVS," in *Qualicer 2020. XVI World Congress on Ceramic Tile Quality*, pp. 1–13.
- [15] G. A. L. Van De Vorst, "Modelling and numerical simulation of viscous sintering," 1994.
- [16] W. Schatt, "Sintervorgänge, VDI-Verlag." Düsseldorf, 1992.
- [17] H. E. Exner and E. Arzt, *Physical Metallurgy*, vol. 3, 4th ed. RW Cahn and P Haasen, 1996.
- [18] P. M. Raj, A. Odulena, and W. R. Cannon, "Anisotropic shrinkage during sintering of particle-oriented systems—numerical simulation and experimental studies," *Acta Mater.*, vol. 50, no. 10, pp. 2559–2570, 2002.
- [19] H. Riedel and J. Svoboda, "Simulation of microwave sintering with advanced sintering models," in *Advances in microwave and radio frequency processing*, Springer, 2006, pp. 210–216.
- [20] T. Kraft and H. Riedel, "Numerical simulation of solid state sintering; model and application," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, no. 2, pp. 345–361, 2004.
- [21] M. Reiterer, T. Kraft, and H. Riedel, "Manufacturing of a gear wheel made from reaction bonded alumina—numerical simulation of the sinterforming process," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, no. 2, pp. 239–246, 2004.
- [22] A. F. Plankensteiner, E. Parteder, H. Riedel, and D. Z. Sun, "Micromechanism based finite element analysis of the sintering behavior of refractory metal parts using ABAQUS," in *ABAQUS User World Congress*, 1999, pp. 643–657.
- [23] A. F. Plankensteiner and H. Riedel, "Micromechanism based macrostructural finite element analysis of the powder metallurgical process route of refractory metals," 2002.
- [24] M. F. Ashby, "A first report on sintering diagrams," *Acta Metall.*, vol. 22, no. 3, pp. 275–289, 1974.
- [25] S. J. Park, S. H. Chung, J. L. Johnson, and R. M. GERMAN, "HIP 6.0 Background Reading and Operator Manual HIP 6.0 Background Reading and Operator Manual, 1990," *Mater.*

Trans., vol. 47, no. 11, pp. 2745–2752, 2006.

- [26] E. Arzt, “The influence of an increasing particle coordination on the densification of spherical powders,” *Acta Metall.*, vol. 30, no. 10, pp. 1883–1890, 1982.
- [27] G. W. Scherer, “Sintering inhomogeneous glasses: application to optical waveguides,” *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 34, no. 2, pp. 239–256, 1979.
- [28] M. Abouaf, J. L. Chenot, G. Raisson, and P. Bauduin, “Finite element simulation of hot isostatic pressing of metal powders,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 191–212, 1988.
- [29] A. Jagota and P. R. Dawson, “Micromechanical modeling of powder compacts—I. Unit problems for sintering and traction induced deformation,” *Acta Metall.*, vol. 36, no. 9, pp. 2551–2561, 1988.
- [30] R. M. McMeeking and L. T. Kuhn, “A diffusional creep law for powder compacts,” *Acta Metall. Mater.*, vol. 40, no. 5, pp. 961–969, 1992.
- [31] J. L. Amorós, F. Negre, A. Belda, and E. Sánchez, “Acuerdo esmalte-soporte (I) Causas y factores de los que depende,” *Técnica Cerámica*, vol. 178, pp. 582–592, 1989.
- [32] A. D. N. Junior, D. Hotza, V. C. Soler, and E. S. Vilches, “Influencia del enfriamiento de la etapa de cocción sobre las propiedades mecánicas del gres porcelánico,” *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.*, vol. 46, no. 4, pp. 163–170, 2007.
- [33] V. Cantavella, A. Moreno, A. Mezquita, J. C. Jarque, J. Barberá, and A. Palanques, “Evolution of Stresses and Curvatures in Porous Bodies during Cooling,” *Tile Brick Int.*, pp. 58–63, 2009.
- [34] W. D. Kingery, “Factors affecting thermal stress resistance of ceramic materials,” *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 38, no. 1, pp. 3–15, 1955.
- [35] B. Plešingerová, M. Klapáč, and M. Kovalčíková, “Moisture expansion of porous biscuit bodies—reason of glaze cracking,” *Ceramics-Silikáty*, vol. 46, no. 4, pp. 159–165, 2002.
- [36] M. Kavanova, A. Kloužková, and J. Kloužek, “Characterization of the interaction between glazes and ceramic bodies,” *J., Ceram. Silik.*, vol. 61, no. 3, pp. 267–275, 2017.
- [37] T. T. Molla, H. L. Frandsen, R. Bjørk, D. W. Ni, E. Olevsky, and N. Pryds, “Modeling kinetics of distortion in porous bi-layered structures,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 33, no. 7, pp. 1297–1305, 2013.
- [38] E. A. Olevsky and V. Tikare, “Combined macro-meso scale modeling of sintering. part i: Continuum approach,” *NATO Sci. Ser. SUB Ser. III Comput. Syst. Sci.*, vol. 176, pp. 85–93, 2001.
- [39] G. Frignani, “Heat Recovery in the Ceramic Tile Production Cycle,” *Interceram-International Ceram. Rev.*, vol. 70, no. 1, pp. 26–31, 2021.
- [40] V. Cantavella, “Simulación de la deformación de baldosas cerámicas durante la cocción,” Universitat Jaume I, 1998.
- [41] M. W. Woo, *Computational Fluid Dynamics Simulation of Spray Dryers*. 2016.
- [42] D. E. Oakley and R. E. Bahu, “Computational modelling of spray dryers,” *Comput. & Chem. Eng.*, vol. 17, pp. S493–S498, 1993.
- [43] F. G. Kieviet and P. Kerkhof, “Air flow, temperature and humidity patterns in a co-current spray dryer: modelling and measurements,” *Dry. Technol.*, vol. 15, no. 6–8, pp. 1763–1773, 1997.
- [44] M. W. Woo, S. Rogers, C. Selomulya, and X. D. Chen, “Particle drying and crystallization characteristics in a low velocity concurrent pilot scale spray drying tower,” *Powder Technol.*, vol. 223, pp. 39–45, 2012.
- [45] D. B. Southwell and T. A. G. Langrish, “Observations of flow patterns in a spray dryer,” *Dry. Technol.*, vol. 18, no. 3, pp. 661–685, 2000.
- [46] R. C. Favalli, D. Gosman, P. Fereday, M. D. M. Pimenta, J. Octavio, and A. Paschoal,

- "Simulación numérica de un atomizador industrial," in *Qualicer 2008: X Congreso Mundial de la Calidad del Azulejo y del Pavimento Cerámico. 10-13 Feb, 2008*, no. 1, pp. 33–42.
- [47] Z. Pakowski and A. Mujumdar, "Basic Process Calculations and Simulations in Drying," in *Handbook of Industrial Drying, Third Edition*, CRC Press, 2006.
- [48] V. Raghavan, R. Jumah, and A. Mujumdar, "Control of Industrial Dryers," *Handb. Ind. Drying, Third Ed.*, no. November 2014, 2006.
- [49] I. C. Kemp and D. E. Oakley, "Modelling of Particulate Drying in Theory and Practice," *Dry. Technol.*, vol. 20, no. 9, pp. 1699–1750, 2002.
- [50] M. Pinto, I. Kemp, S. Bermingham, T. Hartwig, and A. Bisten, "Development of an axisymmetric population balance model for spray drying and validation against experimental data and CFD simulations," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, no. 4, pp. 619–634, 2014.
- [51] H. Jubaer, S. Afshar, J. Xiao, X. D. Chen, C. Selomulya, and M. W. Woo, "On the importance of droplet shrinkage in CFD-modeling of spray drying," *Dry. Technol.*, vol. 36, no. 15, pp. 1785–1801, 2018.
- [52] T. A. G. Langrish and T. K. Kockel, "The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modelling," *Chem. Eng. J.*, vol. 84, no. 1, pp. 69–74, 2001.