



تصميم مفاعل الرش باللهب (FSP) لإنتاج جسيمات نانوية من ZrO_2

محمد فتحي ابحور و مصطفى أحمد الهليب*

قسم الهندسة الكيميائية، كلية الهندسة، الجامعة الأسمرية الإسلامية، زليتن، ليبيا

*البريد الإلكتروني: m.alhaleeb@asmarya.edu.ly

Design of Flame Spray Pyrolysis (FSP) Reactor to Produce ZrO_2 Nanoparticles

Mohammed Fathi Ebhour and Mustafa Ahmed Alhaleeb*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Alasmarya Islamic University, Zliten, Libya.

الملخص

يركز هذا البحث على تصميم مفاعل يعتمد على تقنية الرش باللهب (FSP) لإنتاج جسيمات نانوية من ثاني أكسيد الزركونيوم (ZrO_2)، التي تتمتع بخواص فريدة تجعلها مفيدة في التطبيقات الصناعية والطبية. وتهدف الدراسة إلى تحسين عملية إنتاج هذه الجسيمات من خلال تصميم مفاعل متطور باستخدام المحاكاة الرقمية عبر برنامج ANSYS Fluent V22 R21. تمثل مشكلة الدراسة في كيفية إنتاج جسيمات نانوية بحجم دقيق وبكميات كبيرة، مع الحفاظ على التحكم في خصائصها الفيزيائية. اعتمدت المنهجية على تصميم مفاعل يحقق معدلات إنتاج تتراوح بين 100 و300 جرام في الساعة، وذلك من خلال تعديل معدلات تدفق السائل من 27 إلى 81 مليلتر في الدقيقة. تضمنت الإجراءات دراسة توزيع درجات الحرارة وسرعة تدفق الغاز داخل المفاعل، مع حساب أحجام الجسيمات النانوية. أظهرت النتائج أن التصميم الجديد للمفاعل يسمح بإنتاج جسيمات بأحجام تتراوح بين 12 و28 نانومتر، مع الحفاظ على سلامة العملية ومنع ارتفاع درجة حرارة النظام إلى مستويات خطيرة. في النهاية، استنتجت الدراسة أن هذا التصميم يمكن أن يكون فعالاً لإنتاج جسيمات نانوية بجودة عالية، ويوفر الأساس لتوسيع نطاق الإنتاج وتحسين كفاءته في الدراسات المستقبلية.

الكلمات الدالة: تقنية الرش باللهب، إنتاج الجسيمات النانوية، ثاني أكسيد الزركونيوم، محاكاة عددية، تحسين كفاءة الإنتاج.

Abstract

This research focuses on the design of a reactor based on Flame Spray Pyrolysis (FSP) technology to produce zirconium dioxide (ZrO_2) nanoparticles, which possess unique properties that make them useful in industrial and medical applications. The study aims to improve the production process of these nanoparticles by developing an advanced



reactor design using digital simulation through ANSYS Fluent V22 R1 software. The research problem lies in how to produce nanoparticles with precise size and in large quantities, while maintaining control over their physical properties. The methodology involved designing a reactor capable of achieving production rates ranging between 100 and 300 grams per hour, by adjusting the liquid flow rates from 27 to 81 milliliters per minute. The procedures included studying the temperature distribution and gas flow velocity within the reactor, and calculating the sizes of the nanoparticles. The results showed that the new reactor design allows for the production of nanoparticles with sizes ranging between 12 and 28 nanometers, while ensuring the safety of the process and preventing the system from reaching dangerously high temperatures. Ultimately, the study concluded that this design can be effective in producing high-quality nanoparticles and provides a foundation for scaling up production and improving efficiency in future studies.

Keywords: Flame Spray Pyrolysis (FSP), Nanoparticle Production, Zirconium Dioxide (ZrO_2), Simulation (ANSYS Fluent), Production Efficiency Improvement.

1. المقدمة

تعتبر الجسيمات النانوية، التي تتراوح أحجامها بين 1 و100 نانومتر، مكونات أساسية في تقنية النانو، وتتكون من مواد مثل الكربون وأكاسيد المعادن والمعادن أو المواد العضوية. تستمد هذه الجسيمات خصائصها الفريدة من نسبة المساحة السطحية إلى الحجم العالية، مما يعزز الاستقرار والتفاعلية والموصلية الحرارية (Gleiter, 2000). تتيح هذه المساحة السطحية المتزايدة تحسين الخصائص الحفزية، مما يجعل الجسيمات النانوية مفيدة في التحفيز وأجهزة الاستشعار وأنظمة توصيل الأدوية، بالإضافة إلى التطبيقات البيئية مثل السيطرة على التلوث (Lu et al., 2007; Zhang & Banfield, 2005).

تظهر الجسيمات النانوية بأشكال وأحجام متنوعة (من 1 إلى 3 أبعاد) وتستخدم في الطب للتصوير وتوصيل الأدوية، وفي الإلكترونيات لتطوير أجهزة أصغر وأكثر كفاءة (Murray et al., 2000). وقد حظي إنتاج الجسيمات النانوية من خلال تقنية "فلاش سبراى بايروليزيس (FSP)" بالاهتمام، حيث تم إثبات إمكانية الإنتاج على نطاق واسع بمعدل إنتاج تجريبي يبلغ 300 جم/ساعة لأكسيد الزركونيوم (ZrO_2) و1,100 جم/ساعة لثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) (Mueller et al., 2004).

أكسيد الزركونيوم (ZrO_2) هو موصل شبه، يتمتع بفقوة نطاق واسعة تتراوح بين 5 و7 إلكترون فولت، وهو مستقر كيميائيًا وحراريًا، مما يجعله مثاليًا للتطبيقات مثل الكشف عن الأشعة فوق البنفسجية واستشعار الغازات. لقد جذبت هيكله النانوية، بما في ذلك القضبان النانوية (NRs) والأسلاك النانوية (NWs)، اهتمامًا كبيرًا بفضل مساحتها السطحية العالية وتأثيرات التقييد الكمومي.



يظهر نمو القضبان النانوية (ZrO_2 NRs) على الركائز المرنة مثل PET إمكانية كبيرة في تصنيع الأجهزة الإلكترونية، بما في ذلك أجهزة الاستشعار والثنائيات الباعثة للضوء.

تعتمد الخصائص والتطبيقات المحددة لقضبان ZrO_2 النانوية على الحجم، وبنية البلورة، وتعديلات السطح، والاستخدام المقصود، مما يستدعي البحث المستمر. يرتبط الطلب على ZrO_2 بالقطاعات مثل الطاقة والسيارات والرعاية الصحية، حيث من المتوقع أن ينمو حجم سوق السيراميك النانوي الزركوني من 7,260.46 مليون دولار أمريكي في عام 2023 إلى 8,568.86 مليون دولار أمريكي بحلول عام 2029 (Gleiter, 2000)، بمعدل نمو سنوي مركب يبلغ 2.80%. تهدف هذه الدراسة إلى تصميم مفاعل FSP قادر على إنتاج 100 إلى 300 جم/ساعة من جسيمات ZrO_2 النانوية بحجم جزيئات أولية محكم التحكم يتراوح بين 12 إلى 28 نانومتر.

2. الدراسات السابقة

زيادة معدل إنتاج تقنية "فلاش سبراي بايروليزيس (FSP)" أمر حاسم نظرًا لقدرتها على إنتاج مجموعة واسعة من المواد. وقد دفع ذلك الباحثين إلى التركيز على فهم تأثيرات ظروف التشغيل على مواصفات المنتجات النهائية، مثل الحجم والتركيب والشكل وغيرها من الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمواد المنتجة. طور مولر وآخرون (Mueller et al., 2004) وهين وبراتسينيس (Heine & Pratsinis, 2005) نماذج محاكاة لتشكيل الجسيمات النانوية، تشمل بعدًا مكانيًا واحدًا فقط استنادًا إلى خصائص الغاز المقاسة. ناقش مولر وزملائه (Mueller et al., 2004) إنتاج جسيمات ZrO_2 باستخدام تقنية "فلاش سبراي"، حيث تم قياس درجة حرارة الغاز تجريبيًا وسرعة الغاز عبر ارتباط تدفق الاندفاع، مع إغفال عمليات الرش والتبخر. حسّن هين وبراتسينيس (Heine & Pratsinis, 2005) هذا من خلال استخدام نموذج تبخر القطرات متعدد المكونات في FSP، مع قياس سرعة الغاز، واستخدام نماذج توازن سكاني مُفصّلة لتشكيل الصلبة، مع عدم اعتبار عمليات الرش. طور هين وبراتسينيس النهج السابق باستخدام نموذج تبخر القطرات متعدد المكونات لتسهيل عملية التبخر في FSP. بالإضافة إلى النموذج السابق، قام هين وبراتسينيس (2005) أيضًا بقياس سرعة الغاز. في كلا النموذجين (Mueller et al., 2004; and Heine & Pratsinis, 2005)، تم قياس سرعة الغاز ودرجة الحرارة تجريبيًا، واستخدمت نتائج حسابات نموذج تبخر القطرات متعدد المكونات في محاكاة عملية تشكيل الصلبة، التي تم نمذجتها باستخدام توازن سكاني مُفصّل لتأسيس التجميع والتلبيد وفق (Kruis et al. (2007). أيضًا لم تأخذ النماذج التي طورها (Heine & Pratsinis (2005) في الاعتبار عملية الرش. بالإضافة إلى ذلك، اعتمد كود تشكيل الصلبة على ملفات درجة الحرارة وسرعة الغاز التجريبية كبيانات إدخال

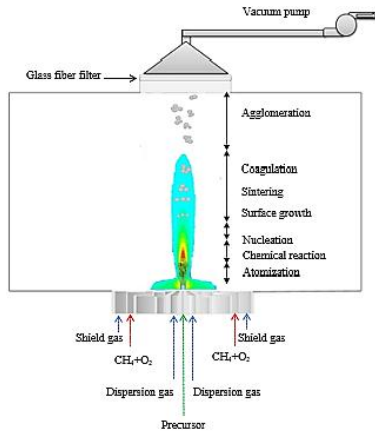
لمحاكاة عملية تشكيل الصلبة. في نهجهم، زاد معدل إنتاج جسيمات ZrO_2 من 100 إلى 300 جم/ساعة وزاد القطر الأولي للمنتج من 12 إلى 26 نانومتر. لم تحاكي نماذجهم جميع العمليات في FSP، مثل الرش والاحتراق. قام غروهن وزملائه (Gröhn et al., 2011) بنمذجة إنتاج جسيمات السيليكا في مفاعل لهب انتشاري باستخدام مُحلل أنسييس فلويونت ثنائي الأبعاد بدون اعتبار نقل الحرارة بالإشعاع أو عمليات تغيير الطور للمواد السابقة. استخدموا وظيفة معرف مستخدم لتنفيذ نموذج ديناميكا الكتل الأولية وقطرات الأجسام في أنسييس فلويونت. طبق غروهن وآخرون (Gröhn et al., 2012) نموذجًا بسيطًا للتنبؤ بخصائص جسيمات ZrO_2 في عملية FSP، مضيفين تبادل الحرارة بالإشعاع بين القطرات والغاز الساخن ولكن ليس بين الطور الصلب والغاز، مع الأخذ في الاعتبار تغيير الطور للمواد السابقة من السائل إلى البخار. قام تورابموستيدي وآخرون (Torabmostaedi et al., 2013) بزيادة إنتاج جسيمات ZrO_2 إلى 1.2 كجم/ساعة، مع دمج نموذج رذاذ أحادي الحجم مع أنسييس فلويونت، حيث تم التحقق من نتائج المحاكاة مع البيانات التجريبية. أظهرت دراستهم أن القطر الأولي للجسيمات تم التحكم فيه عن طريق تثبيت زمن الإقامة والحفاظ على نسب تدفق الغاز/السائل الثابتة عند درجات حرارة عالية، مع افتراض عدم تأثير الجسيمات النانوية على درجة حرارة الغاز. استخدم غروهن وآخرون (Gröhn et al., 2014) لاحقًا CFD للتنبؤ بخصائص جسيمات ZrO_2 في مفاعل على نطاق تجريبي، حيث أظهروا أن زمن إقامة الجسيمات عند درجات حرارة عالية (HTPRT) يتحكم في خصائص الجسيمات النانوية. أجرى تورابموستيدي وزهانق (Torabmostaedi & Zhang, 2014a) دراسة سابقة لفحص تأثير معلمات المعالجة على تخليق جسيمات الزركونيا النانوية باستخدام FSP استخدموا نماذج عديدة مدمجة مع الديناميكا السائلة الحاسوبية (CFD) لمحاكاة العملية. كانت النتائج الرئيسية من تحقيقهم هي: أدى زيادة انخفاض الضغط ونسبة حجم الأكسجين/الخليط إلى تقليل زمن الإقامة وتليبد الجسيمات النانوية داخل اللهب. كان لتغذية الغاز المحيط تأثير ضئيل على تدفق السائل والحجم النهائي للجسيمات. باستخدام قيمة معينة لنسبة حجم الأكسجين/الخليط المتوقعة وانخفاض الضغط، كان من الممكن تحقيق أحجام جسيمات مماثلة عند معدلات إنتاج أعلى مع استخدام تركيز مسبق ثابت. تقدم هذه النتائج رؤى قيمة في التحكم بعملية تخليق جسيمات الزركونيا عبر FSP، مما يبرز أهمية تحسين معلمات المعالجة لتحقيق خصائص الجسيمات المرغوبة. حقق بوس وزملائه (Buss et al., 2019) تأثيرات تكوين الجسيمات ونموها باستخدام تكوينات مفاعل FSP المفتوحة مقابل المغلقة، باستخدام نهج أحادي الحجم قائم على نموذج توازن السكان مع أنسييس فلويونت، مما يظهر أن التحكم في درجة حرارة الغاز باستخدام تدفق الهواء المعاكس وإعادة تدوير الجسيمات النانوية يؤثران على حجم الجسيمات النانوية. درس ميرهوفر وآخرون (Meierhofer et al., 2020) تأثيرات

المعلومات التشغيلية وتكوين الفوهة على خصائص الجسيمات النانوية أثناء إنتاج ZrO_2 ، باستخدام نموذج توازن سكاني مرتبط ANSYS Fluent، وتنبؤوا بنجاح بقطر الجسيمات النانوية وخصائص الرش.

في هذه الدراسة، سيتم محاكاة اللهب باستخدام ANSYS FLUENT V.23، يليها كود MATLAB لتصميم مفاعل FSP قادر على إنتاج ما يصل إلى 100 إلى 300 جم/ساعة من جسيمات ZrO_2 النانوية مع التحكم في حجم الجسيمات ضمن نطاق القطر الأولي للجسيمات (من 12 إلى 28 نانومتر).

3. المنهجية وطرق العمل

يهدف المشروع إلى تصميم مفاعل FSP قادر على إنتاج كمية من أكسيد الزركونيوم (ZrO_2) بمعدل يتراوح بين 100 إلى 300 جم/ساعة، مع حجم جزيئات أولية يتراوح بين 12 إلى 28 نانومتر. فهم تأثيرات زيادة معدلات الإنتاج مهم جداً. زيادة معدل الإنتاج تتطلب زيادة في معدل تدفق محلول السلائف الذي يحتوي على المادة المطلوبة لتكوين المواد النانوية. في هذه الدراسة، محلول السلائف المستخدم هو $(C_{12}H_{28}O_4Zr)$ بتركيز 0.5 مولاري. يتم زيادة معدل ضخ محلول السلائف عند ثبات تركيز 0.5 مولاري عبر الأنبوبة الشعرية ذات القطر 0.5 مم كما هو مبين في الرسم التوضيحي لطريقة FSP، عند فرق ضغط ثابت لغاز التشتيت عادة يستعمل الأكسجين عند 1.5 بار. يتم توليد هذا الفارق في الضغط بتمرير 50 لترًا في الدقيقة من غاز الأكسجين عبر فتحة فوهة بقطر 0.2 مم. زيادة معدل تدفق محلول السلائف تؤدي إلى زيادة في محتوى الحرارة لعملية الاحتراق وزيادة في درجة الحرارة، مما ينتج عنه زيادة في أقطار القطرات الأولية لعملية التفتيت، والتي بدورها تؤدي إلى زيادة في أقطار الجسيمات النانوية المتكونة.



شكل 1. مخطط التحلل بالرش باللهب

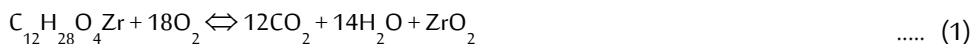


1.3. معايير التصميم

النقاط المحددة التي تم أخذها في الاعتبار في تصميم العملية تشمل تبريد اللهب، وهو عنصر حاسم للتحكم في حجم المادة النانوية، حيث تعتمد الحاجة إلى التبريد على معايير العملية مثل معدل تدفق السوائل والغازات، نوع المذيب، السلائف، تركيزها، وانخفاض الضغط عبر الفوهة لتحقيق رذاذ ناعم. كما أن موقع ورقة الترشيح مهم، ففي غرفة الاحتراق يجب تصميم ارتفاع المفاعل بعناية للحفاظ على درجات حرارة سطح ورقة الترشيح أقل 500 °م، بالإضافة إلى الحفاظ على تدرج ضغط سلبي عبر المرشح. تم استخدام حزمة ديناميكا السوائل الحاسوبية ANSYS Fluent (CFD) مع كود MATLAB لبناء نموذج لعملية FSP، وقد تم التحقق من دقة هذا النموذج باستخدام بيانات دراسة سابقة (Abubreeq, 2024).

2.3. طريقة اختيار معدلات الإنتاج

قدمت دراسات المحاكاة التي أجراها (Torabmostaedi & Zhang, 2014b) خاصية مهمة لتوسيع الإنتاج إلى معدلات أعلى. في هذه الدراسة، تم تحليل تأثير معدل الإنتاج على نطاق واسع مع الحفاظ على تركيز السلائف ثابتاً. وُجد أن حجم الجسيمات يمكن التحكم فيه بدقة عن طريق الحفاظ على نسبة تدفق الغاز إلى السائل (GLFR) عند قيم معينة، مع الحفاظ على تدفق الأكسجين المشتت، وتركيز السلائف، وانخفاض ضغط الفوهة ثابتة. أظهرت نتائج المحاكاة أنه من خلال الحفاظ على نسبة GLFR بين 616 و1845، يمكن الحصول على حجم جسيمات يتراوح بين 12 نانومتر و 28 نانومتر عند تركيز سلائف ثابت. باستخدام النسب الموصى بها من GLFR، يتم تحديد معدلات تدفق السلائف، وتُستخدم هذه المعدلات بعد ذلك لحساب معدلات إنتاج ZrO_2 من خلال موازنه الكتلة لمعادلات التفاعل الاحتراق وفق المعادلة (1)، كما تم تسجيل معدلات الإنتاج المحسوبة والمبينة في الجدول (1).



جدول 1. ظروف التشغيل عند معدلات الإنتاج المختلفة

الحالة	معدل تدفق الأكسجين المشتت (لتر/دقيقة)	معدل تدفق السلائف (مل/لتر)	نسبة الغاز إلى السائل (RGH)	انخفاض ضغط الفوهة (بار)	تركيز السلائف (مولاري)	تركيز غاز أكسيد الزركونيوم (مول/م ³)	الإنتاجية
1	50	27.1	1845	1.5	0.5	0.00017	100
2	50	50	1000	1.5	0.5	0.00029	200
3	50	81.1	616	1.5	0.5	0.00037	300



3.3. طريقة حساب قطر القطرة الأولية

نظرًا لأن زيادة الإنتاجية عن طريق زيادة معدل تدفق المادة الأولية ستؤدي إلى زيادة أقطار القطرات المتكونة من المادة الأولية عند خروجها من الأنبوب الشعري. المعادلة (2) تبين أن حجم القطرة الأولية (ID) يتأثر بسرعة الغاز المتشتمت ويمكن حسابه باستخدام العلاقة الخاصة بفوهات الخلط الخارجي.

$$ID = 51 d_n Re^{-0.39} W_e^{-0.18} \left(\frac{m_{mix}}{m_{gas}} \right)^{0.29} \quad \dots (2)$$

حيث أن:

$$Re = \frac{\rho_{mix} d_n (v_{gas} - v_{mix})}{\mu_{mix}}, \text{ and } W_e = \frac{\rho_{mix} d_n (v_{gas} - v_{mix})^2}{\gamma_{mix}} \quad \dots (3)$$

كما هو موضح في المعادلة (2)، عندما تتضاعف كتلة المادة الأولية، يزداد القطر بمعدل 1.2، مع الحفاظ على فتحة الفوهة عند معدل تدفق ثابت لغاز الأكسجين. أقطار القطرات الأولية لكل معدل تدفق هي مبينة بالجدول (2).

جدول 2. حجم القطرات الأولية (ID) عند معدلات إنتاج مختلفة.

ID (micron)	الإنتاجية (g/hr)	m_{mix} (kg/s)	U_{mix} ($\frac{m}{s}$)	Re	We	الحالة
14	100	3.79E-04	2.3	88207	1931109	1
17	200	7.02E-04	4.24	87673	1907803	2
20	300	1.14E-03	6.8	86953	1876613	3

تكمن أهمية حساب الأقطار الأولية للقطرات في استخدامها كأقطار مبدئية للقطرات في إعدادات لبرنامج المحاكاة FLUENT.

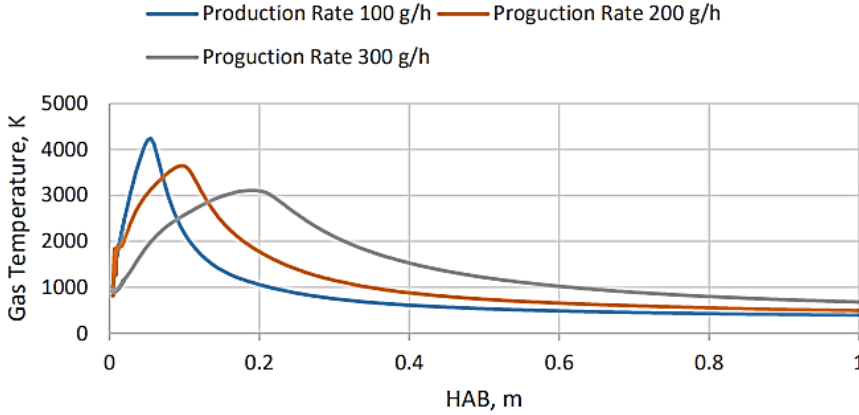
4. النتائج والمناقشة

العوامل الرئيسية في نجاح توسيع عملية FSP لإنتاج ZrO_2 هي مراقبة درجة الحرارة وملف السرعة وتقييم خصائص الجسيمات.

1.4. ملف درجة الحرارة

يمكن تحسين كفاءة التحلل الحراري وإنتاج جزيئات نانوية ذات خصائص مرغوبة من خلال التحكم الدقيق في توزيع درجة الحرارة داخل المفاعل، مما يضمن أيضًا جمع الجزيئات بكفاءة على ورق الترشيح. أظهرت نتائج المحاكاة تأثير ملف درجة الحرارة المحسوب على طول المحور المركزي حتى موقع

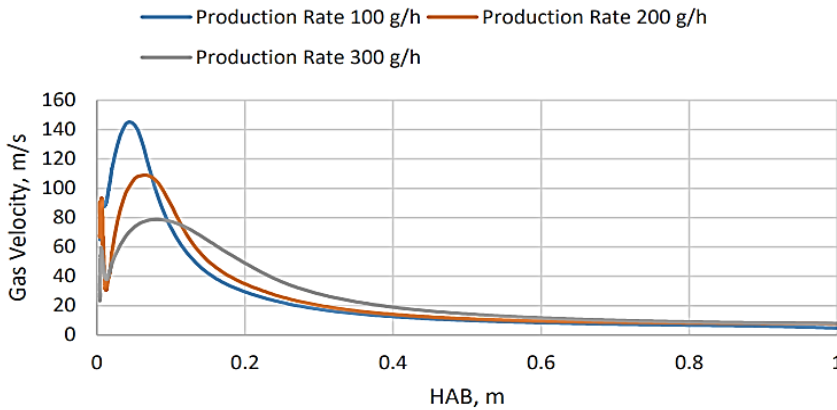
ورق الترشيح على ارتفاع 1 متر، في ثلاث حالات تشغيل مختلفة (100، 200، 300) جم/ساعة، والمبينة في الشكل (2). أشار النموذج إلى أن زيادة معدل تدفق السائل تسبب في تحرك موقع ذروة درجة الحرارة نحو الأسفل نتيجة لزيادة كمية الحقن السائل، مما أدى إلى احتراق المزيد من بخار المذيب.



شكل 2. تنبأ نموذج Fluent بملفات درجات حرارة الغاز (بالكلفن) على طول المحور المركزي (بالمتر) عند معدلات إنتاج مختلفة (جم/ساعة).

2.4. ملف السرعة

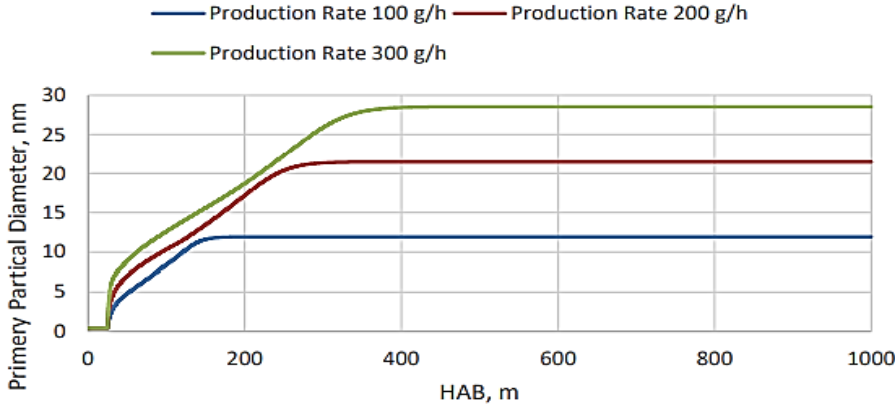
يؤثر زمن الإقامة على مدى التحلل الحراري وخصائص الجسيمات النهائية. يوضح الشكل (3) اتجاهات سرعة الغاز مع زيادة معدلات الإنتاج من 100 إلى 300 جم/ساعة.



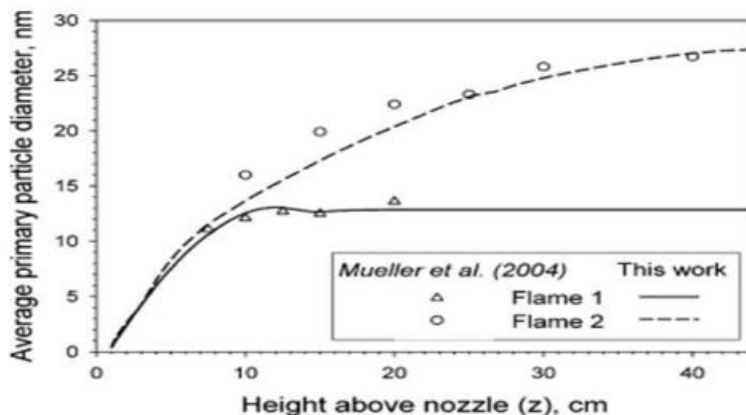
شكل 3. تنبأ نموذج Fluent بملفات سرعة الغاز على المحور المركزي عند معدل إنتاج 100 جم/ساعة (الخط الأزرق)، ومعدل إنتاج 200 جم/ساعة (الخط البرتقالي)، ومعدل إنتاج 300 جم/ساعة (الخط الرمادي).

3.4. تقييم خصائص الجسيمات

تم تشغيل برنامج Fluent للتنبؤ بظروف تكوين ونمو الجسيمات النانوية للحالات المدرجة في الجدولين (1 و 2) حيث احتوت الطور السائل على 0.5 مول من زركونيوم في الإيثانول. يعتمد تكوين الجسيمات ونموها بشكل كبير على توزيع درجات الحرارة وسرعة الطور المستمر، بالإضافة إلى تركيز ZrO_2 عند نهاية عملية التبخر. باستخدام توقعات درجات الحرارة وسرعات الغاز (الشكلان 2 و 3)، وقيم تركيز ZrO_2 الأولية بالجدول (1)، تم حساب أقطار الجسيمات الأولية باستخدام MATLAB بناءً على نهج تم وصفه بواسطة مولر (Müller, 2003). يوضح الشكل (5) أقطار الجسيمات الأولية المقاسة تجريبياً وصفه (Heine and S. E. Pratsinis, 2005) ونفس الشكل يبين القسم المحسوبة للأقطار في دراستهم، بينما يوضح الشكل (4) أقطار الجسيمات الأولية المتوقعة والمحسوبة في هذه الدراسة. أظهر النموذج أن توزيع درجات الحرارة داخل النظام له تأثير حاسم على عملية التحلل الحراري ونمو الجسيمات اللاحق. أظهرت النتائج أن الأقطار يمكن التحكم فيها لتتراوح بين 12 و 28 نانومتراً من خلال ضبط الإنتاجية بين 100 و 300 جم/ساعة. وبمقارنه الشكلين (4) و (5) يتضح تطابق القياسات العملية للأقطار المقاسة عند نفس هذه الظروف للتشغيل (Heine and S. E. Pratsinis, 2005) مع القيم المحسوبة في هذه الدراسة.



شكل 4. ملفات قطر الجسيمات الأولية المتوقعة في الدراسة الحالية (الجزء السفلي).



شكل 5. أقطار جسيمات زركونيوم أكسيد (ZrO_2) الأولية المحسوبة بمتوسط Sauter (لهيب 1: الخط المتصل؛ لهيب 2: الخط المتقطع) تظهر مقارنةً بالبيانات التجريبية (لهيب 1: مثلثات؛ لهيب 2: دوائر)

5. الاستنتاجات

هدف الدراسة الحالية هو تصميم مفاعل لاشتعال رذاذ اللهب يتم التحكم فيه بشكل جيد، قادر على إنتاج 100 جم/ساعة إلى 300 جم/ساعة من نانو مواد ZrO_2 عالية الجودة (بأحجام تتراوح بين 12 و28 نانومتر). تم استخدام حزمة الديناميكا السوائل الحاسوبية (CFD) أنسيس فلوينت، إلى جانب كود MATLAB، لمحاكاة وتصميم المفاعل. أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام الجديد يمكنه تحقيق معدلات إنتاج ZrO_2 تتراوح من 100 إلى 300 جم/ساعة، مع أقطار جزيئات أولية تتراوح بين 12 و28 نانومتر، من خلال زيادة معدل تدفق السائل من 27 إلى 81 مل/دقيقة، مع منع احتراق ورق الترشيح على بعد متر واحد فوق سطح الموقد. يمكن اعتبار هذه الدراسة أساساً لعدة دراسات مستقبلية، مثل دراسة تأثير تركيز السلف لتزايد الإنتاجية، ودراسة تأثير توزيع الأكسجين لزيادة الإنتاجية.

المراجع

- Abubreeq, W.K. (2024). *Numerical Study of Predicting Flame Temperature, Gas Velocity, and Nanoparticle Size in Flame Spray Pyrolysis*. B.Sc. Project, Chemical Engineering department, Alasmarya Islamic University, Libya.
- Buss, L., Meierhofer, F., Bianchi Neto, P., França Meier, H., Fritsching, U., & Noriler, D. (2019). Impact of co-flow on the spray flame behaviour applied to nanoparticle synthesis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 97(2), 604-615.
- Gleiter, H. (2000). Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. *Acta Materialia*, 48(1), 1-29.
- Gröhn, A. J., Buesser, B., Jokiniemi, J. K., & Pratsinis, S. E. (2011). Design of turbulent flame aerosol reactors by mixing-limited fluid dynamics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(6), 3159-3168.



- Gröhn, A. J., Pratsinis, S. E., & Wegner, K. (2012). Fluid-particle dynamics during combustion spray aerosol synthesis of ZrO_2 . *Chemical Engineering Journal*, 191, 491-502.
- Gröhn, A. J., Pratsinis, S. E., Sánchez-Ferrer, A., Mezzenga, R., & Wegner, K. (2014). Scale-up of nanoparticle synthesis by flame spray pyrolysis: the high-temperature particle residence time. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(26), 10734-10742.
- Heine, M. C., & Pratsinis, S. E. (2005). Droplet and particle dynamics during flame spray synthesis of nanoparticles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(16), 6222-6232.
- Kruis, F. E., Kusters, K. A., Pratsinis, S. E., & Scarlett, B. (1993). A simple model for the evolution of the characteristics of aggregate particles undergoing coagulation and sintering. *Aerosol Science and Technology*, 19(4), 514-526.
- Lu, A. H., Salabas, E. E., & Schüth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte chemie international edition*, 46(8), 1222-1244.
- Meierhofer, F., Mädler, L., & Fritsching, U. (2020). Nanoparticle evolution in flame spray pyrolysis—Process design via experimental and computational analysis. *AIChE Journal*, 66(2), e16885.
- Mueller, R., Jossen, R., Kammler, H. K., Pratsinis, S. E., & Akhtar, M. K. (2004). Growth of zirconia particles made by flame spray pyrolysis. *AIChE Journal*, 50(12), 3085-3094.
- Müller, R. (2003). *Characterization and Synthesis of Nanoparticles made in Vapor and Spray Flames*. Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, Switzerland.
- Murray, C. B., Kagan, C. R., & Bawendi, M. G. (2000). Synthesis and characterization of monodisperse nanocrystals and close-packed nanocrystal assemblies. *Annual Review of Materials Science*, 30(1), 545-610.
- Torabmostaedi, H., Zhang, T., Foot, P., Dembele, S., & Fernandez, C. (2013). Process control for the synthesis of ZrO_2 nanoparticles using FSP at high production rate. *Powder Technology*, 246, 419-433.
- Torabmostaedi, H., & Zhang, T. (2014a). Numerical Optimization of Quenching Efficiency and Particle Size Control in Flame Synthesis of ZrO_2 Nanoparticles. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23, 1478-1492.
- Torabmostaedi, H., & Zhang, T. (2014b). Computational study of the effect of processing parameters on the formation and growth of ZrO_2 nanoparticles in FSP process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 78, 1-10.
- Zhang, H., & Banfield, J. F. (2005). Nanoparticles in the environment: pathways, properties, and toxicity. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59(1), 169-189.