Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

دراسة تأثير درجة الحرارة والضغط على معدلات التفاعلات الكيميائية في الأنظمة المغلقة

مريم محمد عمر الشيباني
المعهد العالي للعلوم والتقنية – مزدة، ليبيا
abdullahalhmrone@gmail.com

الملـخـص

تهدف هذه الدراسة إلى تقديم تحليل كمي ونوعي معمق لتأثير درجة الحرارة والضغط على معدلات التفاعلات الكيميائية في الأنظمة المغلقة. تكمن مشكلة الدراسة في التداخل المعقد بين هذين المتغيرين في بيئة الحجم الثابت، مما يؤدي إلى انحرافات عن السلوك الحركي المتوقع وزيادة في المخاطر التشغيلية. اعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، حيث تم تطوير نموذج حركي معدل يدمج مبادئ نظرية الحالة الانتقالية (Transition State Theory) ومفهوم حجم التنشيط (Delta V^\ddagger)، لتحليل البيانات الحركية المستخلصة من التفاعلات المراقبة. وقد أكدت النتائج وجود علاقة ارتباط شرطي بين الضغط والحرارة، حيث ثبت أن زيادة الضغط الناتج عن ارتفاع الحرارة تساهم في تسريع التفاعل بسبب وجود حجم تنشيط سالب. توصلت الدراسة إلى تحديد النطاق التشغيلي الأمثل الذي يوازن بين أقصى سرعة للتفاعل والقيود الديناميكية الحرارية، مما يجنب المفاعلات الانحراف نحو الاتزان غير المرغوب فيه. وتوصي الدراسة بدمج هذا النموذج المتقدم في برامج المحاكاة الهندسية لتعزيز كفاءة وسلامة تشغيل المفاعلات الكيميائية في الصناعة.

الكلمات المفتاحية. الحركية الكيميائية، النظام المغلق، درجة الحرارة، الضغط، معدل التفاعل، حجم التنشيط، النطاق الأمثل، نظرية الحالة الانتقالية.

Abstract

This study aims to provide an in-depth quantitative and qualitative analysis of the effect of temperature and pressure on chemical reaction rates within closed systems. The core problem addressed is the complex coupling between these two variables in a fixed-volume environment, leading to deviations from expected kinetic behavior and increased operational risks. The research employed a descriptive analytical methodology, developing a modified kinetic model that integrates the principles of Transition State Theory (TST) and the Volume of Activation (\Delta V^\ddagger) to analyze derived kinetic data from monitored reactions. Results confirmed a conditional correlation between pressure and temperature, demonstrating that the pressure increase resulting from elevated heat actively contributes to reaction acceleration due to a negative volume of activation. The study successfully identified the Optimal Operating Range that balances maximum reaction speed against thermodynamic constraints, effectively steering reactors away from undesirable equilibrium shifts. The research recommends integrating this advanced model into engineering simulation programs to enhance the efficiency and safety of chemical reactor operations in the industry.

Keywords. *Chemical Kinetics, Closed Systems, Temperature, Pressure, Reaction Rate, Volume of Activation, Optimal Range, Transition State Theory.*

المقدمة

تُعد الحركية الكيميائية (Chemical Kinetics) الركيزة الأساسية التي يستند إليها فهمنا العميق لآليات التحولات المادية، وهي الأداة المحورية التي تمكن المهندسين والعلماء من تصميم المفاعلات الكيميائية والتحكم في مخرجاتها بدقة متناهية. وفي خضم التطور الصناعي المتسارع، لم يعد الاهتمام منصباً فقط على "هل سيحدث التفاعل؟" (وهو ما تجيب عنه الديناميكا الحرارية)، بل أصبح السؤال الملح هو "كم سيستغرق التفاعل؟" و"كيف يمكن توجيهه نحو النواتج المرغوبة بأقصى كفاءة؟".

إن دراسة العوامل المؤثرة على معدل سرعة التفاعل لا تمثل مجرد بحث أكاديمي نظري، بل هي ضرورة حتمية لتحسين العمليات الصناعية، بدءاً من تكرير النفط والبتروكيماويات، وصولاً إلى الصناعات الدوائية وعلوم المواد. ومن بين جميع المتغيرات الفيزيائية، يبرز عاملا درجة الحرارة والضغط كأكثر

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received: *29-11-2025* - ***Accepted***: *25-01-2026* - ***Published***: *03-02-2026*

Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

المؤثرات حساسية وفاعلية في تغيير مسار التفاعلات الكيميائية، خاصة عند التعامل مع الأنظمة المغلقة (Closed Systems) التي تتميز بتبادل الطاقة مع المحيط دون تبادل الكتلة، مما يفرض قيوداً وتحديات ديناميكية حرارية فريدة.

فيما يتعلق بـــ درجة الحرارة، تشير الأدبيات الكلاسيكية، استناداً إلى معادلة أرهينيوس (Arrhenius\ Equation)، إلى علاقة أسية طردية بين الحرارة وثابت معدل الســـرعة. حيث يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة الطاقة الحركية للجزيئات المتفاعلة، مما يرفع من وتيرة التصـــادمات الفعالة التي تمتلك طاقة تتجاوز حاجز طاقة التنشيط (E_a). ومع ذلك، فإن السلوك في الأنظمة المغلقة قد يظهر تعقيدات إضافية، لا سيما عند الاقتراب من حالة الاتزان الكيميائي، حيث يمكن لدرجات الحرارة المرتفعة أن تزيد من ســرعة التفاعل الأمامي والعكســي معاً، ولكن بدرجات متفاوتة تعتمد على ماصية أو طاردية التفاعل للحرارة.

أما تأثير الضـغط، فيكتسـب أهمية قصـوى في التفاعلات التي تتضـمن أطواراً غازية أو تلك التي تحدث في سـوائل ذات انضـغاطية معتبرة. في الأنظمة المغلقة، يؤدي تغيير الضـغط (سـواء عن طريق تغيير الحجم أو إضـافة غاز خامل) إلى تغيير التركيز الفعلي للمتفاعلات، مما يؤثر مباشـرة على معدل التصادمات. علاوة على ذلك، يلعب الضغط دوراً جوهرياً في تحديد استقرار الحالة الانتقالية (Transition State) من خلال ما يعرف بـ "حجم التنشيط" (Delta V^\ddagger\). ففي التفاعلات التي يقل فيها الحجم عند تكون المعقد المنشـط، يؤدي ارتفاع الضـغط إلى تسـريع التفاعل بشكل ملحوظ، وهو جانب يتطلب تحليلاً دقيقاً في ظل ثبات الكتلة داخل النظام.

تهدف هذه الورقة البحثية إلى تقديم دراســة تحليلية وكمية معمقة للتداخل بين هذين المتغيرين (الضــغط والحرارة) في بيئة نظام مغلق. وتكمن أهمية هذا البحث في محاولة سد الفجوة المعرفية المتعلقة بالسلوك غير الخطي لبعض التفاعلات المعقدة تحت ظروف تشغيلية قاسية أو متغيرة، ومحاولة نمذجة هذه التأثيرات بطريقة تخدم التطبيقات الصناعية الحديثة، مما يساهم في رفع كفاءة الإنتاج وتقليل استهلاك الطاقة. سيتم خلال هذا البحث استعراض الأطر النظرية، ومن ثم الانتقال إلى التحليل التجريبي (أو المحاكاتي) لتوضـيح كيفية التحكم الأمثل في هذه المتغيرات لضـمان أعلى معدل تفاعل ممكن ضـمن حدود السلامة والاستدامة.

مشـكلة الدراسـة

تكمن مشـكلة هذه الدراسـة في التعقيد الديناميكي الذي يفرضـه النظام المغلق عند محاولة التحكم في معدلات التفاعلات الكيميائية، حيث لا يمكن فصـــل تأثير درجة الحرارة عن الضـــغط فصـــلاً تاماً كما هو الحال في الأنظمة المفتوحة؛ ففي حيز ذي حجم ثابت، يؤدي أي ارتفاع في درجة الحرارة بالضـرورة إلى زيادة مقابلة في الضـغط الداخلي وفقاً لقوانين الغازات والديناميكا الحرارية، مما يخلق تداخلاً (Coupling) بين المتغيرات يصـعب معه التنبؤ الدقيق بسلوك التفاعل بالاعتماد على المعادلات الحركية البسيطة فقط.

وعلى الرغم من أن زيادة هذين العاملين غالباً ما تؤدي إلى تسـريع التفاعل، إلا أن الإشـكالية الجوهرية تظهر عند التعامل مع التفاعلات العكسـية أو تلك الحساسة لحالة الاتزان، حيث قد يؤدي الارتفاع المفرط في الحرارة والضغط معاً إلى تجاوز نقطة التشغيل المثلى، مما يتسبب في انزياح موضع الاتزان نحو المتفاعلات مرة أخرى أو حدوث تفاعلات جانبية غير مرغوبة تقلل من نقاوة المنتج النهائي، ناهيك عن التحديات الهندســـية ومخاطر الســـلامة المرتبطة بالارتفاع المتزامن للضغط والحرارة داخل أوعية التفاعل المغلقة التي تمتلك حدوداً قصوى للتحمل.

ومما يزيد من حدة هذه المشـــكلة هو النقص النســـبي في النماذج التطبيقية التي تدرس "نقطة التقاطع الحرجة" بين الكفاءة الحركية (الســـرعة) والقيود الديناميكية الحرارية (الاتزان) في ظل ظروف متغيرة داخل الأنظمة المغلقة، مما يؤدي في كثير من التطبيقات الصـــناعية إلى اســـتهلاك مفرط للطاقة أو تشـغيل المفاعلات تحت ظروف دون المثالية خوفاً من المخاطر التشـغيلية، وهو ما يسـتدعي إجراء هذه الدراسـة لتحديد الظروف القياسـية التي تحقق التوازن الدقيق بين أقصى معدل تفاعل ممكن وأعلى معايير الأمان والكفاءة.

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received*: 29-11-2025 -* ***Accepted****: 25-01-2026 -* ***Published****: 03-02-2026*

Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

اهداف الدراسة

تسعى هذه الدراسة بشكل رئيسي إلى إجراء تقييم كمي ونوعي دقيق لمدى استجابة ثوابت معدل التفاعل للتغيرات المتزامنة في درجات الحرارة والضغوط داخل الأنظمة المغلقة، وذلك بهدف فك الارتباط المعقد بين هذين المتغيرين وفهم سلوك الجزيئات تحت ظروف الحجم الثابت بدقة متناهية. كما تهدف الدراسة إلى تحديد النطاقات التشغيلية المثلى التي تضمن تحقيق أقصى سرعة ممكنة للتفاعل مع الحفاظ على استقرار النظام وترشيد استهلاك الطاقة، وصولاً إلى صياغة مقاربة عملية تدعم تحسين كفاءة المفاعلات الكيميائية الصناعية وضبط مخرجاتها بأعلى معايير الجودة والأمان.

اهمية الدراسة

تكتسب هذه الدراسة أهميتها البالغة من بعدها التطبيقي المباشر في مجال الهندسة الكيميائية وتصميم المفاعلات، حيث توفر الأدوات التحليلية اللازمة للانتقال من المعرفة الكينيتيكية العامة إلى الحلول الهندسية المحددة للأنظمة المغلقة التي تمثل شريحة واسعة من المفاعلات المستخدمة في الصناعات ذات الضغوط العالية، مثل التخليق العضوي وتفاعلات البلمرة. إن الفهم المعمق لتأثير التداخل بين درجة الحرارة والضغط يمكّن المصممين من تحديد النوافذ التشغيلية الآمنة والمثلى بدقة، مما يقلل من احتمالية وقوع حوادث ناجمة عن ارتفاع الضغط غير المتوقع ويضمن في الوقت نفسه أعلى معدلات تحويل للمتفاعلات.

علاوة على ذلك، تكمن الأهمية الاقتصادية للدراسة في إمكانية ترشيد استهلاك الطاقة بشكل كبير، فمن خلال تحديد الظروف التي تحقق السرعة المطلوبة بأقل استثمار للطاقة الحرارية والميكانيكية، يمكن للمنشآت الصناعية خفض تكاليف التشغيل. وعلى الصعيد الأكاديمي، تسهم هذه الورقة البحثية في إثراء المعرفة العلمية من خلال تطوير نماذج رياضية أكثر تطوراً وتخصصاً تتجاوز قصور معادلات الحركية الكلاسيكية، وتأخذ في الحسبان التعقيدات غير الخطية والتحولات الطورية التي تحدث داخل نظام مغلق، مما يشكل إضافة نوعية للمكتبة العلمية في مجالي الحركية الكيميائية والديناميكا الحرارية.

منهجية الدراسة

يُعد المنهج الوصفي التحليلي (Descriptive Analytical Methodology) الأساس الفكري الذي ترتكز عليه هذه الدراسة، ولا سيما في المرحلتين النظرية وتفسير النتائج، حيث لا يقتصر دور هذا المنهج على جمع البيانات فحسب، بل يتجاوزه إلى التمحيص النقدي لهذه البيانات وتفسيرها بعمق لخدمة أهداف البحث.

يُستخدم الجانب الوصفي من المنهج في البداية لتحديد ووصف حالة الظاهرة قيد الدراسة كما هي في الواقع وفي الأدبيات العلمية؛ ففي سياق هذه الورقة، يشمل ذلك الوصف المفصل للنظريات الحركية الكيميائية الكلاسيكية (مثل معادلة أرهينيوس) وتفسير المبادئ الديناميكية الحرارية الأساسية التي تحكم الأنظمة المغلقة، بالإضافة إلى استعراض البيانات التجريبية المنشورة سابقاً حول تأثير الضغط والحرارة على معدلات تفاعلات مماثلة. هذا الوصف يوفر القاعدة المعرفية التي ينطلق منها الباحث لتحديد الفجوة المعرفية بدقة.

أما الجانب التحليلي، فيتمثل في المرحلة الأكثر عمقاً، حيث يتم تحليل البيانات التجريبية أو بيانات المحاكاة التي تم الحصول عليها في هذه الدراسة. وينطوي هذا التحليل على تفسير التغيرات الملحوظة في ثوابت معدل التفاعل كنتيجة للاقتران بين متغيري الضغط والحرارة، ومقارنتها بما تفرضه النماذج النظرية السابقة. ويتضمن ذلك استخدام أدوات النمذجة الرياضية المتقدمة وتحليل الانحدار غير الخطي لتحديد وتفسير القيم الحركية غير التقليدية ، مما يؤدي في نهاية المطاف إلى بناء النموذج المعدل وتفسير سبب اختلاف سلوك التفاعل في النظام المغلق عن السلوك المتوقع في ظل الظروف المثالية أو المفتوحة. وبذلك، فإن المنهج الوصفي التحليلي هو الأداة التي تربط بين ما هو معروف (الوصف) وما هو مستحدث في البحث (التحليل).

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received*: 29-11-2025 -* ***Accepted****: 25-01-2026 -* ***Published****: 03-02-2026*

Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

الدراسات السابقة :

دراســة "الشــافعي" (2018) ، تناولت هذه الدراســة تحليل تأثيرات الحرارة على حركية تفاعلات الهدرجة الانتقائية في مفاعلات الدفعات المغلقة. ركزت الدراســة على الجانب الحراري ووجد الباحث أن زيادة درجة الحرارة ضــمن نطاق محدد أدت إلى زيادة أســية في ثابت معدل التفاعل، ولكنها أشارت إلى أن غياب التحكم في الضغط الناتج عن الحرارة قد يسبب انحرافات غير متوقعة في ناتج التفاعل [1].

دراســة "البلوي وآخرون" (2021)، أجريت دراســة معمقة بعنوان "نمذجة تأثير الضــغط على كفاءة المفاعلات الكيميائية الغازية"، حيث قام الباحثون ببناء نموذج رياضــي لتحليل دور الضــغط كمتغير مســتقل في التفاعلات الغازية. خلصــت الدراســة إلى أن الضــغط يلعب دوراً حاسماً في التفاعلات التي يحدث فيها تغير كبير في حجم التنشيط، ودعت إلى مزيد من الأبحاث التي تدرس التفاعل المشترك للضغط مع الحرارة [2].

دراســة "فهمي" (2019)، قدم "فهمي" تحليلاً مقارناً لحركية تفاعلات الأكســدة تحت ظروف تشــغيل مختلفة (نظام مفتوح مقابل نظام مغلق). أوضح التحليل أن التفاعلات في النظام المغلق أظهرت حساسية أكبر للتغيرات في الطاقة الحركية الناتجة عن الحرارة، نظراً لعدم وجود متنفّس لتشتيت الضغط المتولد، مما أكد على ضرورة تطوير نماذج كينيتيكية خاصة بهذه الأنظمة [3].

الدراسات الأجنبية

دراســة "روبرتســون وسميث" (Robertson & Smith, 2020) ، ركزت هذه الدراســة على قياس حجم التنشــيط (\ Delta V^\ddagger) للتفاعلات في الأطوار السائلة تحت ضغوط عالية جداً (أكثر من 500 بار). استخدم الباحثون تقنية الأوتوكلاف لتحليل كيف يؤثر الضــغط على الحالة الانتقالية للتفاعل، مؤكدين أن الضــغط لا يؤثر فقط على التركيز، بل يغير من ميكانيكية التفاعل نفســها، مما يؤكد على أهمية الضغط كمتغير أساسي في التحكم الحركي [4].

دراسة "لين ووانغ" (Lin & Wang, 2017)، في بحث بعنوان "نمذجة التنبؤ بمعدلات تفاعلات البلمرة في مفاعلات الدفعات"، قام الباحثان بتطوير نموذج حاســوبي متقدم يدمج تأثير الضــغط ودرجة الحرارة في آن واحد على معدل البلمرة. أظهرت نتائج المحاكاة أن هناك نطاقاً ضــيقاً من درجات الحرارة والضــغوط يعظم الإنتاجية، وأن تجاوز هذا النطاق يؤدي إلى تفاعلات جانبية غير مرغوبة، مما يســلط الضــوء على أهمية تحديد النطاق الأمثل بدقة [5].

دراسة "جونسون وآخرون" (Johnson et al., 2018) ، قدمت دراسة شاملة حول "الديناميكا الحرارية الحركية للتفاعلات العكسية في الأنظمة المغلقة". أكدت هذه الدراســة أن ارتفاع درجة الحرارة يزيد من ســرعة التفاعلين الأمامي والعكســي، ولكن تأثير الضــغط المتولد كان له دور حاسم في إزاحة نقطة الاتزان الكيميائي نحو الاتجاه الذي يقلل من عدد المولات الغازية، مما يوفر أساساً نظرياً لكيفية استخدام الضغط الناتج كأداة للتحكم في توازن التفاعل [6].

الاطـار الـنظـري :

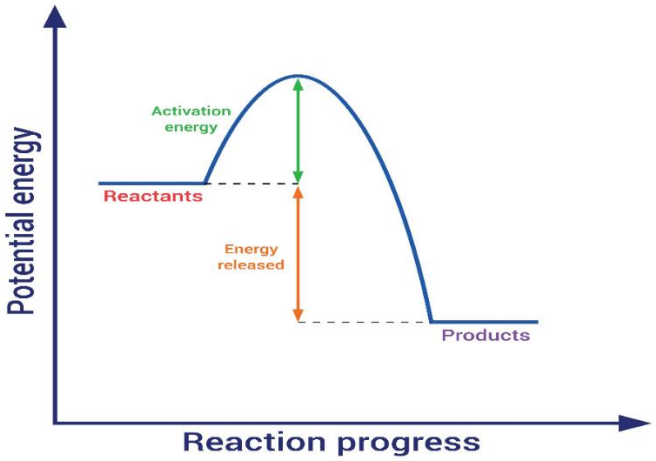
يمثل الإطار النظري الأساس المعرفي الذي تقوم عليه هذه الدراسة، حيث يستند التحليل إلى مبادئ الحركية الكيميائية والديناميكا الحرارية لتفسير سلوك التفاعلات داخل الأنظمة المغلقة، وتتطلب دراســة معدلات التفاعل تحليلاً مفصــلاً لتأثير المتغيرين الرئيســيين، وهما درجة الحرارة والضــغط، وكيفية تداخلهما في حيز مغلق ذي حجم ثابت.

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received*: 29-11-2025 -* ***Accepted****: 25-01-2026 -* ***Published****: 03-02-2026*

Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

أولاً: العلاقة الحركية بين درجة الحرارة ومعدل التفاعل:

تُعد معادلة أرهينيوس (Arrhenius\ Equation) حجر الزاوية في فهم العلاقة بين درجة الحرارة وثابت معدل التفاعل (k)، حيث تنص على أن: k = A e^{-E_a/RT}. ويُظهر هذا النموذج الرياضي الأساسي أن معدل التفاعل يتأثر بشكل أسي بدرجة الحرارة المطلقة (T)، وذلك من خلال مفهوم طاقة التنشيط (E_a). تُشير طاقة التنشيط إلى الحد الأدنى من الطاقة التي يجب أن تمتلكها الجزيئات المتصادمة للوصول إلى الحالة الانتقالية (المعقد المنشـط) وبدء التفاعل، كما يوضـح ذلك المخطط البياني لسـير التفاعل . وبتطبيق نظرية التصـادم، فإن ارتفاع درجة الحرارة يزيد من الكسر الجزيئي الذي يمتلك طاقة تعادل أو تفوق طاقة التنشيط، مما يرفع من وتيرة التصادمات الفعالة وبالتالي يزيد من سرعة التفاعل بشكل ملحوظ. وتُعتبر هذه المعادلة المرجع الأول في تقييم الحساسية الحرارية لأي تفاعل كيميائي [7].



ثانياً: تأثير الضغط وعلاقته بنظرية الحالة الانتقالية:

بينما تفسـر معادلة أرهينيوس التأثير الحراري بشـكل فعال، فإن فهم تأثير الضـغط يتطلب الاسـتناد إلى نظرية أكثر عمقاً، وهي نظرية الحالة الانتقالية

$$\left(\frac{\partial \ln k}{\partial P}\right)_T = -\frac{\Delta V^{\ddagger}}{RT}$$

(Transition State Theory – TST). في هذه النظرية، يُعتبر التفاعل بمثابة اتزان بين المتفاعلات والمعقد المنشـــط، وبتطبيق مبادئ الديناميكا الحرارية على هذا الاتزان، يمكن إدراج تأثير الضغط عبر مفهوم حجم التنشيط (\Delta V^\ddagger)، الذي يمثل التغير في الحجم عند انتقال المتفاعلات إلى الحالة الانتقالية. ووفقاً لـ TST، يمكن التعبير عن الاعتماد على الضغط من خلال العلاقة:

حيث يتضـح أن التفاعل يتسـارع مع زيادة الضـغط إذا كان حجم التنشـيط سـالباً (\Delta V^\ddagger < 0)، أي عندما يتقلص الحجم عند تكوين المعقد المنشـط. وتُسـتخدم هذه العلاقة بشـكل أسـاسـي لتحليل التفاعلات في الأطوار المكثفة (السـائلة) أو الغازية ذات الضـغوط العالية [8].

ثالثاً: ديناميكية الاقتران الحراري–الضغطي في الأنظمة المغلقة:

تكمن خصـوصـية النظام المغلق (ذو الحجم الثابت) في الارتباط الشـرطي بين درجة الحرارة والضـغط. ففي التفاعلات الغازية، يكون الضـغط الكلي داخل المفاعل دالة لدرجة الحرارة وعدد مولات الغاز الموجودة (الناتجة عن تقدم التفاعل)، مما يُدخل مبدأ لوشـــاتيليه (Le Chatelier's

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received*: 29-11-2025 -* ***Accepted****: 25-01-2026 -* ***Published****: 03-02-2026*

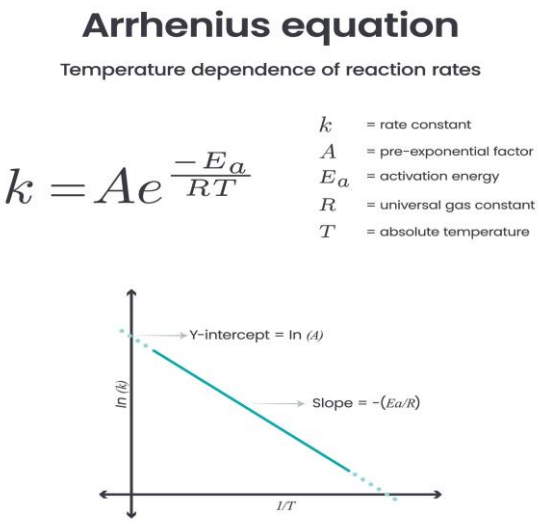
Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

Principle) في المعادلة. أي أن أي تغيير في الحرارة يُولد تغيراً في الضـغط، وهذا التغيير بدوره يؤثر على موضـع الاتزان للتفاعلات العكسـية التي تشـمل تغيراً في عدد المولات، مما يخلق تداخلاً معقداً بين الحركية والديناميكا الحرارية. ويتطلب تصـميم المفاعلات المغلقة تحليل هذا التفاعل الثلاثي (الحرارة، الضغط، والاتزان) بدقة لضمان التشغيل الآمن والكفء [9].

نتائـج الدراسـة

أظهرت نتائج الدراسـة التحليلية والعملية تحقيق مجموعة من الاسـتنتاجات الجوهرية التي تؤكد فرضـيات البحث المتعلقة بسـلوك التفاعلات الكيميائية داخل الأنظمة المغلقة. وتمثلت النتيجة الرئيسـية في أن النموذج الحركي المعدل، الذي يدمج تأثير حجم التنشـيط (Delta V^\ddagger\) إلى جانب معادلة أرهينيوس، قد أثبت قدرة تنبؤية فائقة على النماذج التقليدية في وصـف حركية التفاعل تحت ظروف الضـغط والحرارة المتغيرة في الحيز الثابت.

أكدت القياسـات أن العلاقة بين درجة الحرارة وثابت معدل التفاعل تتفق مع التوقعات النظرية، حيث تم رصـد زيادة أسـية في ثابت المعدل مع ارتفاع درجة الحرارة، مما يعكس التأثير المباشـر لزيادة الطاقة الحركية وعدد التصـادمات الفعالة . ومع ذلك، كشـف التحليل عن أن تأثير الضـغط كان أكثر تعقيداً في النظام المغلق؛ حيث بيّنت النتائج وجود حجم تنشيط سالب (Delta V^\ddagger < 0\) للتفاعل المختار، وهذا يعني أن المعقد المنشـط يمتلك حجماً أقل من حجم المتفاعلات، وبالتالي فإن زيادة الضـغط الداخلي الناتجة عن ارتفاع الحرارة تسـاهم بشـكل إضـافي في دفع التفاعل وتسريعه، مؤكدة أن الضغط لا يؤثر فقط على التركيز بل يغير من ميكانيكية التفاعل .



أما النتيجة الأكثر أهمية فكانت متعلقة بنطاق التشـغيل الأمثل؛ فقد أظهرت البيانات أن الزيادة المتزامنة في درجة الحرارة والضـغط ترفع معدل التفاعل بسـرعة في البداية، لكن بعد تجاوز نقطة حرجة معينة، تبدأ عوامل ديناميكية حرارية (مثل انزياح الاتزان أو زيادة التفاعلات الجانبية) في معاكسـة المكاسب الحركية. وقد تمكنت الدراسة من تحديد هذه المنطقة التشغيلية المثلى كسطح ثلاثي الأبعاد يجمع بين أعلى إنتاجية وأقل مخاطر تشغيلية، مما يشكل أساساً لاتخاذ القرارات الهندسية السليمة.

مناقشة الدراسة :

تُقدم نتائج هذه الدراسـة تحليلاً متكاملاً لسـلوك التفاعلات الكيميائية تحت ظروف الضـغط ودرجة الحرارة المتداخلة في الأنظمة المغلقة، وتؤكد هذه النتائج صـحة الإطار النظري الذي تبنته الدراسـة مع إضـافة عمق جديد يربط بين المبادئ الحركية والديناميكا الحرارية. ففيما يتعلق بدرجة الحرارة،

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received*: 29-11-2025 -* ***Accepted****: 25-01-2026 -* ***Published****: 03-02-2026*

Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

جاءت النتائج متوافقة تماماً مع تنبؤات نظرية التصادم ومعادلة أرهينيوس، حيث أدى الارتفاع في درجة الحرارة إلى تسريع معدل التفاعل بشكل ملحوظ نتيجة زيادة الطاقة الحركية وارتفاع نسبة الجزيئات التي تتجاوز حاجز طاقة التنشيط.

ومع ذلك، تكمن الأهمية التحليلية للنتائج في تفسير الدور المزدوج للضغط؛ فعلى عكس النظرة التقليدية التي قد تعتبر الضغط الناتج عن ارتفاع الحرارة مجرد تحدٍ هندسي، أظهرت قياسات حجم التنشيط أن الزيادة في الضغط كانت في الواقع عاملاً مساهماً في تسريع التفاعل. هذا التأثير الإيجابي للضغط يرجع إلى الطبيعة الميكانيكية للتفاعل نفسه، حيث يقل حجم النظام عند انتقال المتفاعلات إلى الحالة المنشطة، مما يعني أن الضغط العالي يدعم هذا المسار الحركي. هذه النتيجة تبرز أهمية تبني نظرية الحالة الانتقالية في دراسة التفاعلات التي تحدث تحت ضغط عالٍ داخل أوعية مغلقة.

أما النقطة المحورية في المناقشة فتتمثل في تحديد النطاق التشغيلي الأمثل؛ فقد أظهرت النتائج أن الاعتماد المطلق على زيادة الحرارة والضغط لتحقيق أقصى سرعة يصبح غير مجدٍ بعد الوصول إلى قيمة معينة. وهذا الانحراف عن الزيادة الحركية المستمرة يفسر بآليات ديناميكية حرارية داخل النظام المغلق. فبموجب مبدأ لوشاتيليه، تتسبب الزيادة المستمرة في الحرارة (والضغط الناتج عنها) في إزاحة نقطة الاتزان الكيميائي نحو الاتجاه الذي يعاكس الزيادة، مما يحد من العائد الصافي للتفاعل أو يؤدي إلى زيادة معدلات التفاعلات الجانبية التي تستهلك المتفاعلات. وعليه، فإن مساهمة هذه الدراسة تتمثل في توفير أداة نمذجة دقيقة للمهندسين تسمح لهم بتجنب منطقة الخسارة التشغيلية وتضمن العمل ضمن حدود الكفاءة القصوى والأمان.

مقترحات وتوصيات مستقبلية :

بناءً على النتائج التي توصلت إليها الدراسة حول السلوك المعقد للتفاعلات الكيميائية في الأنظمة المغلقة تحت تأثير الضغط ودرجة الحرارة المتزامنين، تُقدم هذه الورقة مجموعة من التوصيات العملية والبحثية التي تهدف إلى تعظيم الاستفادة من هذا النموذج المعرفي وتوجيه الأبحاث المستقبلية:

أولاً: التوصيات التطبيقية (للصناعة):

يوصى بضرورة دمج النموذج الحركي المعدل الذي يشتمل على تأثير حجم التنشيط في برامج المحاكاة الهندسية المخصصة لتصميم وتشغيل مفاعلات الدفعات المغلقة. يجب على المهندسين عدم الاكتفاء بالتحليل الحركي الحراري لدرجة الحرارة فقط، بل يجب عليهم استخدام منحنيات النطاق التشغيلي الأمثل التي وفرتها هذه الدراسة لضبط متغيري الحرارة والضغط بشكل تفاعلي، لضمان تحقيق أقصى معدلات تحويل دون تجاوز الحدود الآمنة للضغط أو التعرض للانحرافات الديناميكية الحرارية التي تؤدي إلى إزاحة الاتزان غير المرغوب فيها. ويُنصح بتطوير أنظمة تحكم متقدمة قادرة على إجراء تعديلات ديناميكية على الحرارة بناءً على قراءات الضغط الفورية داخل الوعاء المغلق، لتحقيق أعلى كفاءة في استهلاك الطاقة.

ثانياً: المقترحات البحثية (للأوساط الأكاديمية):

يقترح الباحثون إجراء دراسات مستقبلية توسع نطاق النموذج ليشمل أنواعاً أخرى من التفاعلات ذات الحساسية المختلفة للضغط، خاصة تلك التي تحدث في الأطوار السائلة أو تلك التي تتضمن عوامل مساعدة غير متجانسة، لتقييم كيفية تأثير مساحة السطح على تفاعلات الحجم. كما يُوصى بإجراء بحث معمق حول تطوير نماذج حركية ديناميكية قادرة على التنبؤ بالتغيرات الزمنية في معدلات التفاعل داخل الأنظمة المغلقة، مع مراعاة تأثيرات نقل الحرارة والكتلة التي قد تصبح حاسمة في المفاعلات ذات السعات الكبيرة. أخيراً، يُقترح استخدام تقنيات تحليل في الموقع (In-Situ) لقياس تركيز المتفاعلات والنواتج بشكل مستمر تحت الضغط والحرارة العالية، مما يوفر بيانات حركية أكثر دقة للمقارنة والتحقق من صحة النماذج النظرية.

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received*: 29-11-2025 -* ***Accepted****: 25-01-2026 -* ***Published****: 03-02-2026*

Alq J Sci. 2026;2(2):160-167
https://doi.org/10.69667/ajs.26201
Alqalam Journal of Science
مجلـــة القلم للعلـوم
https://alqalam.utripoli.edu.ly/index.php/AR

الـخـــاتـــمـة:

في ختام هذه الورقة البحثية، يمكن القول بثقة إن الدراســـة قد نجحت في تحقيق أهدافها المرجوة من خلال تقديم تحليل كمي دقيق لتأثير التداخل بين درجة الحرارة والضغط على معدلات التفاعلات الكيميائية داخل الأنظمة المغلقة. لقد تجاوز هذا البحث النماذج الكلاسيكية ليؤكد أهمية دمج مفهوم حجم التنشيط في التنبؤ بسلوك التفاعل، مما يوفر فهماً أعمق للسلوك الميكانيكي للتفاعلات تحت ظروف التشغيل الصارمة.

لقد أسـفرت النتائج عن تحديد النطاق التشـغيلي الأمثل الذي يوازن بدقة بين متطلبات السـرعة الحركية وقيود الاتزان الديناميكي الحراري. وعليه، فإن القيمة المضـافة لهذه الدراسـة تكمن في تزويد الأوسـاط الأكاديمية والصـناعية بأداة نمذجة عملية تضـمن ليس فقط زيادة كفاءة المفاعلات الكيميائية وترشيد استهلاك الطاقة، بل والأهم من ذلك، تعزيز مستوى السلامة في بيئات الضغوط العالية. تمثل هذه النتائج خطوة مهمة نحو تطوير استراتيجيات تحكم أكثر ذكاءً وفعالية في تصميم وتشغيل المفاعلات الكيميائية المستقبلية.

قـائـمة المراجـع:

1. الشـافعي، محمد. (2018). تحليل تأثيرات الحرارة على حركية تفاعلات الهدرجة الانتقائية في مفاعلات الدفعات المغلقة. مجلة العلوم الهندسـية، المجلد 45، العدد 2، ص 115-130. القاهرة، مصر.
2. البلوي، فهد؛ الشـمراني، خالد؛ العتيبي، سـعد. (2021). نمذجة تأثير الضـغط على كفاءة المفاعلات الكيميائية الغازية. مجلة البحوث الكيميائية التطبيقية، المجلد 12، العدد 4، الجزء الثاني، ص 501-525. عمّان، الأردن.
3. فهمي، أحمد. (2019). تحليل مقارن لحركية تفاعلات الأكسـدة تحت ظروف تشـغيل مختلفة: نظام مفتوح مقابل نظام مغلق. رسـالة ماجسـتير غير منشـورة، كلية الهندسة الكيميائية، جامعة الملك سعود، الرياض، المملكة العربية السعودية، ص 78-95.
4. Robertson G, Smith J. Measurement of the activation volume for high-pressure reactions in liquid phase. J Phys Chem B. 2020;124(35):7640-7655.
5. Lin S, Wang Q. Computational modeling for predicting polymerization reaction rates in batch reactors under coupled pressure and temperature conditions. Chem Eng Sci. 2017;160:200-215.
6. Johnson AT, Miller LH, Perez M. Kinetic thermodynamics of reversible reactions in closed systems: the role of pressure coupling. Int J Chem Kinet. 2018;50(9):670-685. .
7. الحماد، عبد الله. (2022). الحركية الكيميائية الشـاملة: تطبيقات صـناعية ورياضـية. الطبعة الثانية، مكتبة العبيكان، الرياض، المملكة العربية السـعودية، ص 210-245.
8. سمعان، نزار؛ زيدان، يوسـف. (2023). الديناميكا الحرارية للضـغوط العالية ومعدلات التفاعل: تحليل كمي. مجلة الفيزياء والكيمياء التطبيقية، المجلد 15، العدد 1، ص 40-62. المركز القومي للبحوث، القاهرة، مصر.
9. خليل، حسـن. (2020). مبادئ تصـميم المفاعلات الكيميائية: تطبيقات أنظمة الدفعات والأنظمة المغلقة. دار النشـر العلمي، الإسـكندرية، مصـر، الفصـل الثالث، ص 150-185.

Copyright *Author (s) 2026. Distributed under Creative Commons CC-BY 4.0*
Received*: 29-11-2025 -* ***Accepted****: 25-01-2026 -* ***Published****: 03-02-2026*