Comprehensive Journal of Science
Volume (10), Issue (38), (Dec, 2025)
ISSN: 3014-6266

مجلة العلوم الشاملة
المجلد (10) العدد 38 ديسمبر 2025
ردمد: 3014-6266

تقليل الإنبعاثات الكبريتية عبر محاكاة Aspen HYSYS V 8.0: بإنشاء مصنع لإنتاج حامض الكبريتيك من الكبريت الصلب الناتج عن معالجة الغاز الطبيعي في مجمع مليتة الصناعي.(دراسة بيئية وتصميم اقتصادي)

أحمد ميلاد أبو سروال.

Gmail /ahmad.abuserwal@gmail.com

كلية التقنية الهندسية /زوارة .

قسم النفط.

تاريخ الاستلام:2025/11/15 –تاريخ المراجعة: 2025/11/22– تاريخ القبول: 2025/11/24– تاريخ للنشر: 8/12/ 2025

الملخص:–

الغرض الرئيسي من الدراسة وهو التقليل من الانبعاثات و تحويل المنتج الثانوي (وهو الكبريت العنصري الحر) الناتج عن عملية تحلية الغاز في مصنع مليته إلى منتج مفيد ذو مردود اقتصادي (وهو حمض الكبريتيك) تناولت هذه الدراسة الجوانب البيئية والفنية المتعلقة بتقييم جدوى إنشاء مصنع متكامل لإنتاج حمض الكبريتيك في مليته؛ بطاقة تصميميه قدرها 60 طن/يوم باستخدام عملية التلامس الأحادي و بنقاوة 98.5٪ وزناً. تمت محاكاة المصنع المقترح لإنتاج حمض الكبريتيك في حالة الاستقرار باستخدام برنامج Aspen Hysys V 8.0 بالطاقة التصميمية المقترحة. يتكون نموذج المصنع من عدد من الوحدات التشغيلية وهي (مجفف، وفرن، ومفاعل حفاز (محول أربعة طبقات) ، ومبادلات حرارية، وخزان خلط، وفواصل، وعمود الامتصاص التفاعلي). تم تصميم واجراء حسابات المواصفات الفنية للمصنع وفقًا للمراجع الصناعية والعلمية المتخصصة.

اشارت النتائج التي تم الحصول عليها إلى أن معدل الإنتاج اليومي للكبريت في مصنع مليته يزيد عن 19.28 طن/يوم، والتي سُجلت بمتوسط 407.67 طن/يوم سنة 2024، وهذه القيمة كافية اقتصاديًا لإنشاء حمض الكبريتيك في المصنع بطاقة إنتاجية (60 طن/يوم). تم إجراء نموذج محاكاة لمصنع لإنتاج حمض الكبريتيك بواسطة نظام التلامس الواحد. حيث تم استخدام تدفقات مواد وطاقة محددة لتصميم الوحدات التشغيلية لتحقيق أقصى نسبة أكسدة لثاني أكسيد الكبريت والتي بلغت 99.4 مول٪. تم حساب مواصفات تصميم المعدات باستخدام العلاقات الرياضية والتي حُققت في مجال صناعة حمض الكبريتيك. كما أن كمية ثاني أكسيد الكبريت المنبعثة من المصنع المقترح والتي تم الحصول عليها من نموذج المحاكاة حوالي 3.767 كجم/طن من حامض الكبريتيك المنتج (أي حوالي 600 جزء في المليون)، وهذه القيمة تقع ضمن النطاق المحدد والمعتمد من قبل وكالة حماية البيئة الأمريكية الرائدة في هذا المجال. وأشارت عملية دراسة انتشار ثاني أكسيد الكبريت المنبعث من مصنع حمض الكبريتيك المقترح باستخدام Disper V4.0 إلى أن التراكيز صغيرة ولا تؤثر على جودة الهواء في المنطقة المحيطة بالمصنع. لذلك فإن بناء هذا المصنع في الموقع المقترح (مليته) لن يكون له أي آثار صحية على مكونات البيئة الحية أو محتوياتها.

بشكل عام، فإن مشروع إنشاء مصنع لإنتاج حمض الكبريتيك هو مشروع صديق للبيئة يضمن التخلص الآمن والاقتصادي من المنتج الثانوي لعملية تحلية الغاز الطبيعي وهو مادة الكبريت، والذي يمثل عامل جذب اقتصادي للقطاعين العام والخاص لتنفيذه.

الكلمات الرئيسية :-

الانبعاثات ، الكبريت العنصري ، محاكاة ، حامض الكبريتيك ، التلامس الاحادي.البيئة.

Abstract :

The primary objective of this study is to reduce emissions and convert the secondary by-product—namely, elemental sulfur generated from the natural gas sweetening process at the Mellitah plant—into a valuable and economically beneficial product, sulfuric acid. This study addresses the environmental and technical aspects related to assessing the feasibility of establishing an integrated sulfuric acid production plant in Mellitah, with a design capacity of 60 tons per day, employing the single-contact process to produce acid with a purity of 98.5 wt.%. The proposed plant was simulated under steady-state conditions using Aspen HYSYS V8.0 at the designated design capacity. The plant model comprises several operational units, including a dryer, furnace, catalytic converter (four-bed converter), heat exchangers, mixing tank, separators, and a reactive absorption tower. The design and technical specifications of the plant were developed in accordance with specialized industrial and scientific references.

The results indicate that the daily sulfur production rate at the Mellitah plant significantly exceeds 19.28 tons/day, reaching an average of 407.67 tons/day in 2024. This quantity is economically sufficient to support a sulfuric acid production capacity of 60 tons/day. A simulation model for a sulfuric acid plant operating via the single-contact system was carried out. Specified material and energy streams were utilized to design the operational units and achieve the maximum possible sulfur dioxide oxidation, which reached 99.4 mol%. Equipment design specifications were calculated based on mathematical correlations established in the sulfuric acid industry. The amount of sulfur dioxide emitted from the proposed plant, as obtained from the simulation model, was approximately 3.767 kg/ton of produced sulfuric acid (around 600 ppm), a value that falls within the acceptable limits established by the U.S. Environmental Protection Agency. Furthermore, the dispersion study of SO_2 emissions from the proposed sulfuric acid plant using Disper V4.0 indicated that concentrations are low and do not affect ambient air quality in the surrounding area. Therefore, constructing this plant at the proposed site (Mellitah) would not pose any health risks to environmental or ecological components.

Overall, the establishment of a sulfuric acid production plant represents an environmentally friendly project that ensures the safe and economically viable disposal of elemental sulfur—the by-product of natural gas sweetening—making it an attractive investment opportunity for both the public and private sectors.

المقدمة :-

يلعب إزالة الكبريت من الغاز دورًا محوريًا في التحكم في انبعاثات الصناعة، ويتضمن ذلك إزالة مركبات الكبريت، من الغازات المنبعثة الناتجة عن العمليات الصناعية. و تعالج هذه التقنية التحديات الحرجة التي تعنى بتلوث الهواء. حيث تساهم انبعاثات الكبريت في تكون الأمطار الحمضية، والإصابة بالأمراض التنفسية، وتدهور البيئة والغلاف النباتي للمناطق المحيطة ،وكذلك الزيادة الكبيرة والمخيفة للأورام والتشوهات الخلقية للأجنة.

من خلال هذه التحديات وهذه المؤشرات كانت المساهمة في الحد من هذه الملوثات وذلك باقتراح تنفيذ انشاء مصنع لعملية إزالة الكبريت من الغازوادخاله كمادة اساسية لإنتاج حمض الكبريتيك وذلك للتقليل من الملوثات كهدف اساسي ثم المردود الاقتصادي العائد من هذا المشروع كما هو مدرج في التوصيات التي خلصت لها هذه الدراسة. ومن هنا يمكن للصناعات تقليل الملوثات الضارة بشكل كبير، مما يضمن هواءً أنظف ونظم بيئية أكثر صحة، و إن تطبيقها يُظهر التزامًا بالممارسات المستدامة والامتثال للوائح البيئية الصارمة ، ومن الآثار الصحية المترتبة على الانبعاث بشكل عام وجود مجتمعات قريبة من المنشآت الصناعية وهو تعرض لمستويات أعلى من الإصابات جراء هذه الانبعاثات وتزيد في هذه المناطق حالات ارتفاع في الأمراض التنفسية وانخفاض في جودة الحياة، حيث يمكن تخفيف هذه المخاطر الصحية والارتقاء بمستوى العيش الآمن في هذه المناطق من خلال معالجة الانبعاثات الكبريتية بتقنيات إزالة الكبريت من الغاز، وكذلك من الآثار البيئية ،انبعاثات الكبريت التي تضر بشكل كبير بالبيئة. عند إطلاقها في الغلاف الجوي، يتفاعل ثاني أكسيد الكبريت مع بخار الماء لتكوين حمض الكبريتيك.

تؤدي هذه العملية إلى الأمطار الحمضية، التي تضر بالنظم البيئية والتربة والمسطحات المائية، تغير الأمطار الحمضية كيمياء التربة، مما يؤدي إلى استنفاد العناصر الغذائية الأساسية وإلحاق الضرر بالنباتات وغالبا ما تظهر الغابات المعرضة للأمطار الحمضية نموًا متقزمًا ومقاومة ضعيفة للأمراض.

تعاني النظم البيئية المائية أيضًا من انبعاثات الكبريت. تؤدي الأمطار الحمضية إلى خفض درجة حموضة البحيرات والأنهار، مما يخلق ظروفًا غير ملائمة للأسماك وغيرها من الكائنات المائية. تواجه العديد من الأنواع انخفاضًا في أعدادها أو الانقراض بسبب هذه التغيرات.

تساهم انبعاثات الكبريت في تكوين جسيمات دقيقة تقلل هذه الجسيمات من جودة الهواء والرؤية، مما يؤثر على المناطق الحضرية والريفية على حد سواء. بالإضافة إلى ذلك، تسرع المركبات الكبريتية من تآكل المباني والمعالم والبنية التحتية، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية.

أهمية الدراسة :-

تتمثل الأهمية لهذه الدراسة في التقليل من انبعاثات الكبريت من خلال إزالة الكبريت من الغاز حيث لا تحمي صحة الإنسان فحسب، بل تحافظ أيضًا على النظم البيئية والبنية التحتية. بما يضمن تنفيذ تدابير فعالة للسيطرة على الانبعاثات مستقبلًا مستدامًا لكل من البيئة والمجتمع.

وتتمثل أيضا أهمية الدراسة **في مؤشرات** تزايد الطلب على الكبريت بسرعة نتيجة الاستخدام العالمي للغاز الطبيعي، ويرجع ذلك إلى الفوائد البيئية التي يوفرها مقارنة بالوقود الأحفوري الآخر، بما في ذلك النفط والفحم. ويُعزز الاستخدام المتزايد للغاز الطبيعي والحاجة إلى خفض استهلاك الطاقة وزيادة المكاسب المرتبطة بالعملية على المستوى العالمي. **في ليبيا**، يُعد مصنع الغاز في غرب ليبيا المصدر الرئيسي للغاز الطبيعي الحلو. مشروع الغاز الليبي الغربي (WLGP) هو مشروع مشترك بنسبة 50-50 بين المؤسسة الوطنية للنفط الليبية وشركة إيني الإيطالية، وبدأ تشغيله في أكتوبر 2004. وبحلول يوليو 2007، كان يتم تصدير 280 مليار قدم مكعب سنويًا (7.9 مليار متر مكعب) من الغاز الطبيعي من منشأة معالجة في مليته على الساحل الليبي، عبر خط أنابيب جرين ستريم إلى جنوب شرق صقلية (Mellitah, 2017).

المنتج الرئيسي هو الغاز الطبيعي الحلو، وتشمل المنتجات الأخرى من مصنع الغاز المسال (LPG) الذي يُرسل إلى منشأة الوفاء الساحلية لمزيد من عملية الفصل، والغاز الحمضي الذي يحتوي بشكل أساسي على CO_2 وH_2S، والذي يُرسل إلى وحدات استعادة الكبريت، حيث تستعيد هذه الوحدات عنصر الكبريت المصاحب بنسبة تصل إلى 99.8٪ بالوزن. يُصلب الكبريت المستعاد في وحدة الباستيل ويتم تصديره في شكل صلب.

يُعالج الغاز الخام في مصنع مليته بمتوسط 906,000 متر مكعب قياسي/ساعة، مُنتجًا 579,000 متر مكعب قياسي/ساعة من الغاز التجاري (الغاز النظيف أو التصديري)، و126,972 متر مكعب قياسي/ساعة من الغاز الحمضي الذي يُرسل إلى مصنع استعادة الكبريت. متوسط معدل تدفق H_2S في الغاز الخام هو 499.3 كمول/ساعة، ما يعادل 15.978 طن/ساعة من عنصر الكبريت (Hassan et al., 2009).

لذلك، في نطاق ليبيا، يمكن توليد الكبريت العنصري من مصنع مليته، حيث تُطرد المركبات المعتمدة على الكبريت كمنصرفات، ويتم إنتاج الكبريت العنصري منها. ويتوفر حوالي 407.67 متر مكعب/يوم من الكبريت للمعالجة اللاحقة وفقًا للبيانات المقدمة من مصنع مليته، ويُعد هذا هو العامل المحدد الرئيسي

للمادة الخام. ليتم فيما بعد انتاج حامض الكبريتيك الذي يعتبر مادة حيوية انتجت في العالم لما لها من أهمية في كثير من الصناعات حيث يُوضح الشكل (2.1) الإنتاج العالمي لحمض الكبريتيك خلال الفترة من 1970 إلى 2012.

are given in Table (2.1).

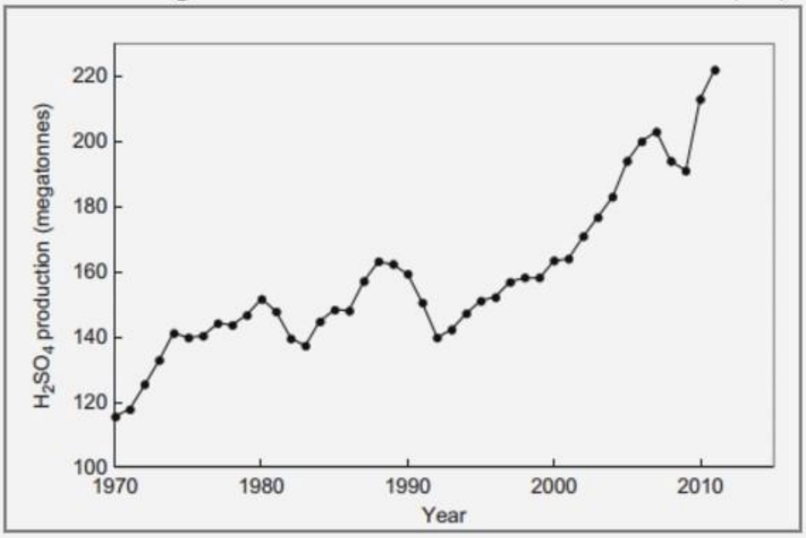

Figure (2.1). World sulfuric acid production, 1970-2012 (King *et al.*, 2013).

الدراسات السابقة :-

تُظهر دراسة الأدبيات أنه خلال العقدين الماضيين، جذب موضوع إنتاج حمض الكبريتيك اهتمامًا واسعًا لما يتطلبه من نمذجة دقيقة، مثل:

- المحاكاة العددية لمفاعل انعكاس الجريان الدوري لأكسدةSO_2، (Snyder et al., 1993) .
- دراسات تحسين إنتاج H_2SO_4 ،(Kiss et al., 2006) وتحسين مفاعل أكسدة SO_2متعدد الأسرّة الأدياباتية (Nodehi, 2007)،
- التحديد المتزامن لـ SO_3و SO_2 في الغازات المتدفقة (Ibanez et al., 2008)،
- الدراسة التجريبية المعتمدة على النماذج لمفاعلات الأكسدة ذات السرير الثابت لـ SO_2 (Schoneberger et al., 2009).

ركزت الدراسات السابقة على مفاعل أكسدة SO_2فقط أو على امتصاص SO_3فقط.

من ناحية أخرى، قدمت أبحاث أخرى نموذجًا متكاملًا لمصنع صناعي لإنتاج حمض الكبريتيك، فمثلاً:-

- أظهرت دراسة أجراها Tveit (2003) أن عملية إنتاج حمض الكبريتيك يمكن نمذجتها باستخدام برامج محاكاة لمحطات الطاقة، ويمكن دمج العملية في نظام طاقة أوسع. يمكن استخدام أدوات المحاكاة الخاصة بمحطات الطاقة كجزء من تدقيق الطاقة وتحليل الطاقة لبعض العمليات الكيميائية. وأظهرت المقارنة بين القيم الفعلية للعملية وتلك المحددة بواسطة نموذج المحاكاة أن النظام مناسب لحساب التغيرات البارامترية التي تؤثر على إنتاج البخار والكهرباء في المصنع، مثل تأثير تسخين الهواء المخصص للاحتراق قبل دخوله الفرن. كما أشارت نتائج الدراسة إلى أن الدراسات المستقبلية يمكن أن تشمل تحسين مستويات الضغط ودرجة الحرارة، وتغيير استهلاك البخار منخفض الضغط، سواءً بإضافة وحدات جديدة تحتاج للبخار أو زيادة استهلاك البخار في الوحدات الحالية، وتغيير نظام التدفئة المركزية. ويشكل نموذج المحاكاة أساسًا قويًا لأي تغييرات هيكلية في النظام، ويعتمد ذلك على طبيعة التغييرات الهيكلية في العملية.

- أشار Bhat وPinjala (2010) في دراستهم إلى أن التكنولوجيا ضرورية لتصميم وتشغيل مصانع حمض الفوسفات وحمض الكبريتيك الصديقة للبيئة بشكل مربح، واستكشفت شركة Aspen Tech كيف يمكن لتكنولوجيا النمذجة إزالة الاختناقات في المصانع الحالية، وتحقيق نقاء عالٍ للمنتج، وزيادة استرداد الطاقة، وأتمتة تحليل العمليات لتحسين أداء المصنع. وقدمت نتائج نموذج حمض الكبريتيك لديهم نظرة عامة قيمة على النظام. وتستفيد المحاكاة من قدرات التصميم لمكونات الإلكتروليت في برنامج Aspen Plus، بما في ذلك التوليد التلقائي للكيمياء وقدرة جميع نماذج الوحدات على إدارة تفاعلات الإلكتروليت. ويوفر Aspen Plus نماذج حرارية متقدمة ومعلومات مدمجة للحصول على نتائج دقيقة تعكس السلوك غير المثالي لمكونات الطور السائل.

  وقد تمثل مفهومهم كدليل لفهم العملية والبيئة، ونقطة انطلاق لتطوير نماذج أكثر تعقيدًا للمصنع ومعداته.

- قدّم Sultana. وAmin (2011). تحليلًا نظريًا لمحاكاة مصنع حمض الكبريتيك. ففي نظام الاتصال، يتم أكسدة الكبريت السائل تدريجيًا إلى ثالث أكسيد الكبريت من خلال تفاعل طارد للحرارة، ويُمتص في برج الامتصاص بواسطة حمض كبريتيك بنسبة 98٪ وزنياً. وقد تم استخدام Aspen One V7.2 بنجاح لنمذجة كل وحدة فرعية لمصنع حمض الكبريتيك في نظام متكامل واحد. كما تم اختيار COM thermo كنموذج حراري متقدم لنمذجة النظام بأكبر قدر ممكن من الدقة. وللطورين السائل والبخار على التوالي، استخدم NRTL وPeng–Robinson كنظام للسوائل، واستخدمت خصائص HYSYS للمحاكاة. شملت محاكاة عملية حمض الكبريتيك التوليد التلقائي للكيمياء وقدرة معالجة تفاعلات الإلكتروليت لجميع نماذج الوحدات. وللحصول على نتائج دقيقة، يقدم Aspen–HYSYS نماذج حرارية متقدمة ومعلومات مدمجة لتعكس السلوك غير المثالي لمكونات الطور السائل.

مجلة العلوم الشاملة العدد 38 ـــ\n\n706

العمليات المجاورة كوسيط تدفئة. وخلصت الدراسة إلى أن استخدام كبريتيد الهيدروجين المعزول من الغاز الطبيعي العماني ساعد في إنتاج حمض الكبريتيك بنجاح باستخدام نظام WSA.

- استخدم Lee et al. (2014) برنامج NORAM Engineering لتطوير وإزالة عنق الزجاجة في مصانع ومرافق احتراق الكبريت وتجديد الحمض وإنتاج حمض الكبريتيك المعدني. وتناقش أبحاثهم بعض الفوائد والتحديات المرتبطة بتصميم واستخدام المحاكاة الحاسوبية لحمض الكبريتيك. وبسبب التحديات الخاصة بصناعة حمض الكبريتيك، تم التطرق لاستخدام برامج محاكاة متنوعة (تجارية ومطوَّرة من قبل المستخدم). كما تم مناقشة النمذجة الديناميكية ومحاكاة مصانع الحمض لتسخين المصنع مسبقًا، وفحص الميزات المرغوبة والجوانب الرئيسية للمحاكاة اللازمة لتحقيق نتائج ذات معنى.

منهجية الدراسة:-

استندت الجوانب الهندسية والبيئية لهذه الدراسة إلى البيانات المتاحة الصادرة عن مجمع مليتة للنفط والغاز، والتي جرى الحصول عليها من أرشيفات الشركة، بالإضافة إلى الاجتماعات الشخصية مع بعض المسؤولين فيها. كما تم الاعتماد على بعض البيانات الصناعية الصادرة عن الشركات العالمية المتخصصة في تصنيع حمض الكبريتيك.

وعليه، فإن منهجية المحاكاة الخاصة بالمصنع المقترح تعتمد على المعلومات المستسقاة من عدد من المصانع القائمة في عدة دول، وعلى البيانات والمعلومات العلمية الموثوقة الواردة في المصادر المعتمدة في هذا المجال.

وقد جرى إعداد تقييمات الأثر البيئي وفق لوائح وكالة حماية البيئة (EPA).

أما الجانب الاقتصادي من التحليل، فقد أُعد باستخدام منهجية علمية معتمدة، وفق الأسلوب الذي تتبعه منظمة الأمم المتحدة للتنمية الصناعية (اليونيدو – UNIDO) في إعداد دراسات الجدوى للمشاريع الصناعية.

إنتاج حمض الكبريتيك بطريقة التماس (Contact Process)

يوضح الشكل (3.1) عملية الاحتراق بالكبريت في طريقة التماس المستخدمة في إنتاج حمض الكبريتيك. بعد إزالة الرطوبة من هواء التغذية في عمود التجفيف، يُمزج الكبريت مع الهواء الجاف. وفي موقد الكبريت تحدث عملية الأكسدة، حيث يتكوّن ثاني أكسيد الكبريت. بعد ذلك يُبرَّد خليط غاز ثاني أكسيد الكبريت والهواء غير المتفاعل من 1310 كلفن إلى 690 كلفن قبل دخوله المرحلة الأولى من المحول، حيث يتحول ثاني أكسيد الكبريت إلى ثالث أكسيد الكبريت.

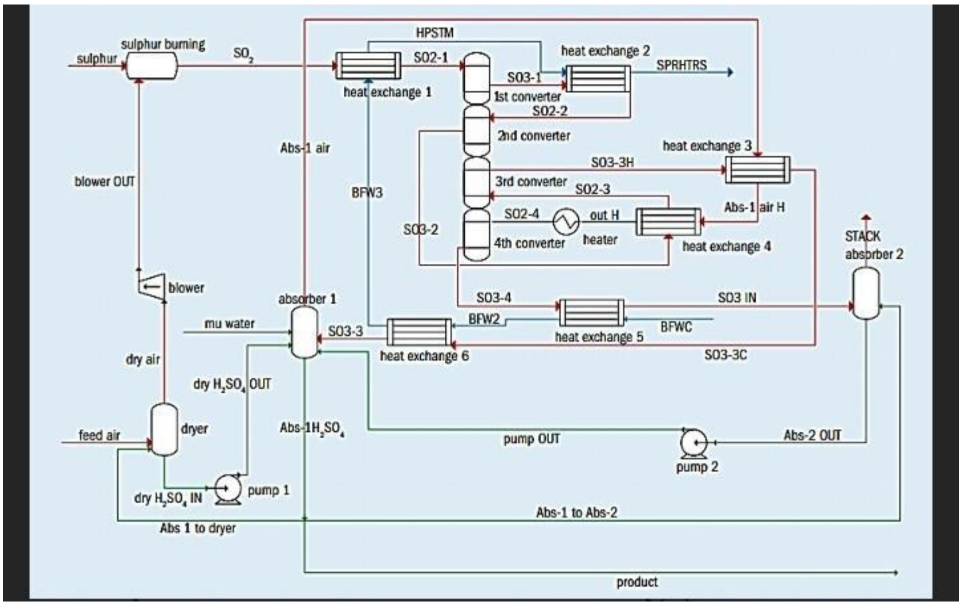

Figure (3.1). Plant of Sulfuric acid production of a sulfur burning (Contact Process), (Bhat and Pinjala, 2010)

تتم عملية أكسدة ثاني أكسيد الكبريت في المحول بالتفاعل مع الماء وبوجود الحفاز. وبما أن الحرارة المنبعثة من أكسدة ثاني أكسيد الكبريت سترفع درجة حرارة الحفاز، فإن معدل تحويل التوازن سينخفض. لذلك، يتم تقسيم عملية تحويل ثاني أكسيد الكبريت إلى أربع مراحل، ويمكن التحكم في درجة حرارة الحفاز في كل مرحلة عن طريق التبريد خطوة بخطوة بين المراحل.

يتم تمرير المخرج المبرد من المبرد (مبادل حراري 5) المحتوي على ثلاثي أكسيد الكبريت إلى برج الامتصاص حيث يتفاعل لتكوين حمض الكبريتيك بتركيز 98.5% وزناً. يتم تصريف غاز المداخن من برج الامتصاص الذي يتكون أساساً من النيتروجين. ويُخفض تركيز ثاني أكسيد الكبريت في المداخن إلى أقل من 700 جزء في المليون، بحيث يمكن إطلاق غاز العادم إلى الغلاف الجوي.

نظرًا لاستمرار امتصاص الحمض، يجب توفير وسيلة لتخفيف جزء الحمض الذي يتم تصريفه من الأبراج وُيعاد تدويره. وبالتالي، يُغذى حمض الكبريتيك بتركيز 99% وزناً إلى خزان الدورة مع ماء منزوع المعادن وحمض الكبريتيك بتركيز 95.7% وزناً القادم من برج التجفيف. تكون التركيز الناتج لحمض الكبريتيك الخارج من خزان الدورة 98.5% وزناً، ويتم تقسيمه إلى جزئين. يُبرّد جزء منه ويعاد تدويره إلى برج الامتصاص، بينما يُبرّد الجزء الآخر ويُقسم مرة أخرى إلى جزئين. أحد هذين الجزئين يشكل المنتج النهائي بتركيز 98.5% وزناً من حمض الكبريتيك، والجزء الآخر يُعاد تدويره إلى برج التجفيف.

النتائج والحسابات:-

3. بيانات الإدخال المستخدمة لمحاكاة مصنع حمض الكبريتيك

لمحاكاة العملية الموضحة في الشكل (3.1)، تم تعيين وتحديد العديد من البيانات المستخدمة (المكونات، حزمة السوائل الحرارية الديناميكية، التفاعلات الكيميائية، والتيارات الرئيسية) كما يلي:

1- المكونات

المكونات المستخدمة لمحاكاة المصنع موضحة في الجدول (3.1):

الجدول (3.1). قائمة المكونات النموذجية في المحاكاة.

اسم المكون	الصيغة الكيميائية
ثاني أكسيد الكبريت.	SO2
ثالث أكسيد الكبريت	SO3
الأكسجين.	O2
الماء	H2O
حمض الكبريتيك	H2SO4
النيتروجين.	H2S
الكبريت.	S

2- حزمة السوائل الحرارية الديناميكية

لمحاكاة الأحماض المائية مثل عمليات حمض الكبريتيك، يُنصح بتفعيل خاصية الإلكتروليتات في Aspen-Hysys. في Aspen Hysys، يُعرف النظام الإلكتروليتي بأنه النظام الذي ينفصل فيه بعض الأنواع الجزيئية جزئيًا أو كليًا إلى أيونات في المذيب السائل، و/أو تترسب بعض الأنواع الجزيئية كأملاح. تحدث هذه التفاعلات للانفصال والترسيب بسرعة كافية بحيث يمكن اعتبارها عند حالة توازن كيميائي. تُعرف التفاعلات التوازنية في الطور السائل التي تصف هذا السلوك باسم كيمياء المحلول. في Aspen، غالبًا ما يُشار إلى كيمياء المحلول ببساطة باسم الكيمياء. لكيمياء المحلول تأثير كبير على محاكاة أنظمة الإلكتروليتات. بالنسبة للأنظمة غير الإلكتروليتية، تحدث التفاعلات الكيميائية عادةً فقط في المفاعلات. في Aspen Plus، جميع نماذج العمليات التشغيلية يمكنها التعامل مع تفاعلات الإلكتروليتات (Bhat and Pinjala, 2010).

لذلك، الخيار العالمي المستخدم في هذا النموذج هو Electrolyte NRTL من حزمة خصائص Aspen. يتم استخدام هذا الإعداد للمحاكاة مع المحاليل الإلكتروليتية غير المثالية. يقوم نموذج Electrolyte NRTL بحساب خصائص الطور السائل باستخدام نموذج معاملات النشاط للإلكتروليت NRTL.

3- التفاعلات الكيميائية

يتم إدراج التفاعلات الكيميائية التالية في النموذج على النحو التالي (King et al., 2013):

A) :Conversion reactions :-

A) Conversion reactions:

$$S + O_2 \xrightarrow{1150\ ^oC} SO_2 \qquad \Delta H^o_{25\ ^oC} \approx -300 \frac{MJ}{kgmol\ of\ S} \quad \ldots\ldots.\ (2.3)$$

$$SO_3 + H_2O \xrightarrow{80-110\ ^oC} H_2SO_4 \quad \Delta H^o_{25\ ^oC} = -130 \frac{MJ}{kgmol\ of\ SO_3} \quad \ldots\ldots.\ (2.2)$$

B) Kinetic reaction:-

$$SO_2 + 0.5O_2 \xrightarrow{400-630\ ^oC} SO_3 \quad \Delta H^o_{25\ ^oC} = -100 \frac{MJ}{kgmol\ of\ SO_3} \quad \ldots\ldots.\ (2.1)$$

البيانات الحركية يُمثَّل لها بتعبيرٍ لمعدّل التفاعل باستخدام حفّاز مكوَّن من خامس أكسيد الفناديوم V_2O_5 مدعومٍ على هلام السليكا، وذلك وفقًا لـ Hill (1977)، كما يلي:

$$\boldsymbol{r_m = \frac{k_1 P_{SO_2} P_{O_2} - k_2 P_{SO_3} P_{O_2}^{0.5}}{P_{SO_2}^{0.5}}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.1)$$

يمثّل هذا التعبير شكلاً مبسّطًا (منخفض الدرجة) من حركيات هوغن–واتسون التقليدية. وتُعرَّف ثوابت معدل التفاعل على النحو التالي:

$$lnk_1 = 12.07 - \frac{31000}{RT} \qquad \text{and} \qquad lnk_2 = 22.75 - \frac{53600}{RT} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.2)$$

whereas;

T is expressed temperature in K

R is expressed in Cal/mol.K

k_1 is expressed in mol/sec.$g_{catalyst}$.$atm^{1.5}$

k_2 is expressed in mol/sec.$g_{catalyst}$.atm

تيارات التغذية :-

1- تغذية الكبريت

تبيّن البيانات المسجّلة في مصنع مليتة لعام2024 كمية الكبريت العنصري الحرّ المُنتَج يوميًا، كما هو موضّح في الجدول (3.2)، حيث بلغ متوسط الإنتاج اليومي حوالي 407.67 طن/يوم (نشرة بيانات التشغيل لمصنع مليتة، 2024).

Table (3.2). Production rate of Sulfur in Mellitah Plant in 2024
(Mellitah Plant Operating Datasheet, 2024)

Months/2017	Ton/day
January	480
February	384
March	380
April	480
May	480
June	96
July	384
August	480
September	384
October	384
November	480
December	480

كمية الكبريت المطلوب تغذيتها إلى المصنع المقترح تبلغ 19.28 طن/يوم.أما متوسط معدل الإنتاج اليومي في عام 2024 فهو 407.67 طن/يوم.ويُطلَب إجراء اختبار للتحقق مما إذا كان متوسط معدل الإنتاج يتجاوز 19.28 طن/يوم عند مستوى دلالة $\alpha = 0.05$.

2. تغذية الهواء

يتم تزويد الفرن بالهواء الزائد لتوفير كمية الأكسجين اللازمة لعملية التأكسد التحفيزي التالية لغاز ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) إلى ثلاثي أكسيد الكبريت (SO_3). كما يوفّر الهواء النيتروجين الذي يمنع ارتفاع درجة حرارة الفرن بشكل مفرط. يُطلَب وجود حوالي 100٪ من الهواء الزائد كما هو موضح في بيانات حرق الكبريت الصناعية (King et al., 2013)، أي ما يقارب 7,310 كغ/ساعة من الهواء الداخل

ومع ذلك، فإن تقليل نسبة الهواء الداخل إلى الكبريت يقلل أيضًا من نسبة الأكسجين إلى ثاني أكسيد الكبريت (O_2/SO_2) في الغاز، مما قد يؤدي إلى انخفاض كفاءة التأكسد التحفيزي لثاني أكسيد الكبريت (King et al., 2013).مع ذلك، فإن تقليل نسبة الهواء الداخل إلى الكبريت يقلل أيضًا من نسبة الأكسجين إلى ثاني أكسيد الكبريت (O_2/SO_2) في الغاز، مما قد يؤدي إلى انخفاض كفاءة التأكسد التحفيزي لثاني أكسيد الكبريت (King et al., 2013).

3-العامل الحفاز

تُخلط مكونات الحفّاز لتشكيل معجون، ثم يتم عادةً بثقه في شكل أقراص صلبة أسطوانية أو حلقية أو حلقة مضلّعة كما هو موضح في الشكل (3.2)، ثم تُخبز هذه الأشكال عند درجات حرارة مرتفعة. تُعطي الحفّازات ذات الشكل الحلقي (أو الحلقة المضلعّة)، والتي تُستخدم بشكل شائع اليوم، انخفاضًا في فرق الضغط وقلة حساسية للانسداد بالغبار. الحد الأدنى لدرجة الحرارة هو 410–430 °م للحفّازات التقليدية و380–390 °م للحفّازات المخدّمة بالسيزيوم. أما الحد الأعلى لدرجة الحرارة فهو 600–650 °م، وفوق هذا الحد قد تُفقد فعالية الحفّاز بشكل دائم نتيجة تقليل السطح الداخلي (BAT، 1999).

متوسط العمر التشغيلي للحفّاز حوالي 10 سنوات. ويتم تحديد العمر التشغيلي عادةً بناءً على فقدان الحفّاز أثناء عملية غربلة الحفّاز، والتي يجب القيام بها من وقت لآخر لإزالة الغبار (BAT، 1999).

Figure (3.2). C116 Sulfuric acid catalyst (Catalysts, 1989)
A) The Standard cylindrical extrude (top left); **B**) Ribbed extrusion (top right);
C) Smooth ring (bottom left); and **D**) Ribbed-ring (bottom right).

وبعد اتباع الخطوات الازمة وتتبع التوصيات والمقادير الدقيقة لكميات المواد الداخلة كما نصت عليها كثير من الدراسات يمكن الرجوع اليها بتوسع ، من خلالها تمكنا الوصول إلي نتائج المحاكاة لنموذج المصنع المراد انشاؤه على النحو التالي :-

. أولا :-

نتائج محاكاة نموذج المصنع:-

يتم إنتاج حمض الكبريتيك في مصنع يعتمد على احتراق الكبريت. حيث يُجفف الهواء الرطب في برج التجفيف باستخدام حمض الكبريتيك بنسبة 98% وزنياً. يُستخدم الهواء الجاف الناتج في موقد الكبريت لحرق الكبريت وإنتاج ثاني أكسيد الكبريت،الخطوات الرئيسية في هذه العملية تتمثل في تحويل ثاني أكسيد الكبريت إلى ثالث أكسيد الكبريت، ثم دمجه مع الماء لتكوين محلول يحتوي على 99% وزنياً من حمض الكبريتيك. يتم ذلك عن طريق مرور ثاني أكسيد الكبريت عبر أربعة أَسِرَّة تحويل (Converter Beds). وبسبب محدودية برنامج Aspen HYSYS، تم استخدام أربعة محولات فردية كوحدات بديلة لأسرة التحويل.

يمر غاز SO_2 الخارج من موقد الكبريت عبر غلاية حرارة مهدرة (Waste Heat Boiler) لتخفيض درجة الحرارة قبل الدخول إلى أول سرير تحويل (PBR-100). لنفس الغرض، يُستخدم مبرد بين الأسرة المتتالية.

المخرج النهائي من السرير الرابع (PBR-103) يمر عبر مبادل حراري لضبط درجة الحرارة بما يتناسب مع معدل تحويل برج الامتصاص. أما المخرج من السخان (E-107)، المحتوي على ثالث أكسيد الكبريت، فيُمرر إلى برج الامتصاص حيث يتفاعل مع حمض الكبريتيك بنسبة 98% وزنياً لتكوين حمض كبريتيك بنسبة 99% وزنياً. يُطلق غاز المداخن من برج الامتصاص، ويتكون أساساً من النيتروجين.

ونظراً لاستمرار تركيز الحمض الممتص في الزيادة، من الضروري توفير وسيلة لتخفيف جزء من الحمض الذي يتم تفريغه من الامتصاص وإعادة تدويره.

لذلك، يُغذى حمض الكبريتيك بنسبة 99% وزنياً إلى خزان الدورة مع الماء منزوع المعادن وحمض الكبريتيك بنسبة 95.7% وزنياً القادم من برج التجفيف. تكون التركيبة النهائية لحمض الكبريتيك الخارج من خزان الدورة حوالي 98.5% وزنياً، ويتم تقسيمها إلى جزئين. يتم تبريد أحدهما وإعادة تدويره إلى برج الامتصاص، بينما يُبرد الجزء الآخر ويتم تقسيمه مرة أخرى إلى جزئين؛ أحدهما يمثل المنتج النهائي بنسبة 98.5% وزنياً، والجزء الآخر يُعاد تدويره إلى برج التجفيف

يظهر الجدول التالي النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها من المحاكاة التي تم إجراؤها

الجدول (3.13). النتائج الرئيسية لمحاكاة نموذج مصنع حمض الكبريتيك باستخدام عملية الاتصال الأحادي

Table (3.13). Key simulation results of sulfuric acid plant model by single contact process

	Name	Unit	Value	Stream Name
Feed	Sulfur	kg/hr	803.3	Sulfur
	Air	kg/hr	7310	Moist Air
	Water for absorption tower	kg/hr	540.5	Deionized water
	Water for steam generation	kg/hr	1,942	BFWC
Product	Sulfuric Acid (98.5 wt.%)	kg/hr	2,500	SA
By–products	Steam	kg/hr	1,942	W1
	Exhaust gas	kg/hr	6,175	Stack gas

يوضح الجدول (3.13) أن النموذج المحاكى يعطي أداءً جيدًا مع الحد الأدنى من انبعاثات أكاسيد الكبريت (Sox)وتحسين استهلاك الطاقة. كلا العاملين يمثلان أهم الاهتمامات في مصانع حمض الكبريتيك.

وفقاً للخطوات الرئيسية الموضحة لكل وحدة تشغيلية في العملية، نموذج مصنع حمض الكبريتيك باستخدام عملية الاتصال الواحدة في الشكل(3−10)

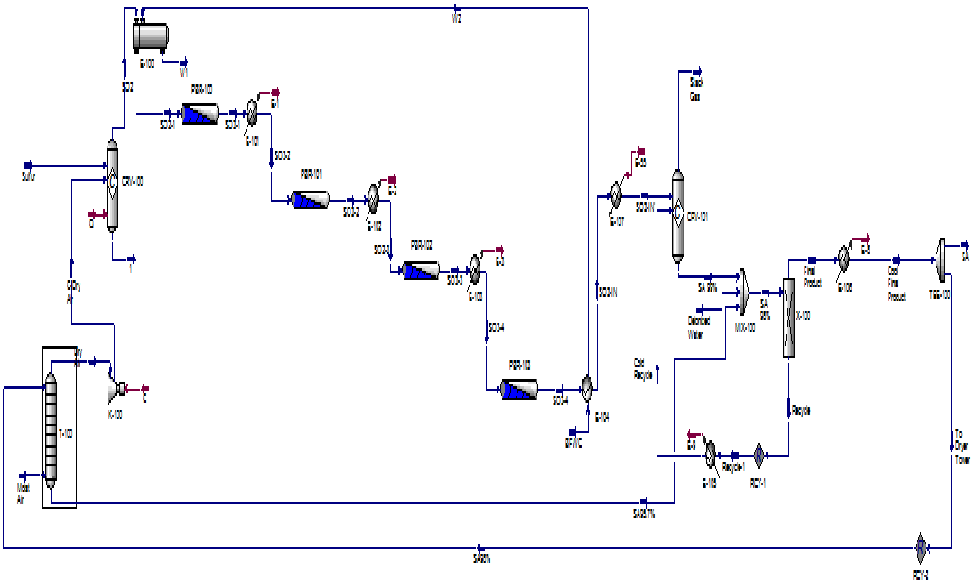

Figure (3.10). The model plant of sulfuric acid production by single contact process

يتم عرض بيانات تصميم نموذج مصنع حمض الكبريتيك في الجدول (3.14) وفقًا لنشرة البيانات الصناعية لمصانع حمض الكبريتيك.(Catalysts, 1989)

مجلة العلوم الشاملة العدد 38 ـــ

Table (3.14). Industrial design datasheet of the sulfuric acid plant model

Company Name:	N/A		
Unit No.:	100		
Capacity (ton/day):	60	**Purity (wt.%):**	98.5
Overall design conversion (%):	99.6		
Start-up date:	N/A		
Feedstock:	Pure sulfur		
Engineering Company:	N/A		
Unit Type:	Single contact process		
Number of beds:	4	**Absorption after bed No.:**	4
Flow rate inlet bed (m^3/hr):	1.211×10^4		
Quench flow rate (m^3/hr):	174.9		
Temperature quench (°C):	417		
Composition inlet bed (vol.%):	SO_2: 9.89; N_2: 77.10; O_2: 10.55; H_2O: 2.46		
Total catalyst volume, (m^3):	39.73		
Atmospheric pressure site (bar):	1.013	**Inlet pressure to reactor, (bar):**	1.2
Bed diameter (m):	4.02		

Bed specification

Bed No.	Volume (m^3)	Height (m)	Temperature (°C) *In*	Temperature (°C) *Out*	ΔP (bar)	Cooling quench (m^3/hr)	Conversion (%)	Residence time (sec)
1	7.87	0.62	417	597.9	4.627×10^{-4}	7.35	62.98	0.58
2	9.14	0.72	438	489.9	4.418×10^{-4}	2.63	48.42	0.675
3	10.66	0.84	432	448.8	4.755×10^{-4}	10.66	30.16	0.788
4	12.06	0.95	206	245.4	3.291×10^{-4}	2.38	95.53	0.89

Catalyst type:	C116 ribbing
Catalyst shape:	Ribbed rings

Catalyst composition:			
Absorber packed bed No.:	1	**Absorber efficiency (%):**	99.99
Absorber bed dimensions (m):		**Height:**	2
		I. Diameter:	7
Packing type of absorber:	Ceramic	**Diameter (mm):**	51
		Shape:	Saddles
Absorber residence time (sec):		**Sulfuric acid:**	300
		Gas :	2
Steam production (ton/hr):	1.942	**Pressure (bar):**	44.82
		Temperature (°C):	624.5
Water content in feed air (vol.%):	1.37	**Water content in dry air (vol.%):**	0.84
Exhaust gas flow rate (m^3/hr)	6894	**SO_2 content (ppm):**	600
Demister type: **Drying tower:**	Knitted Teflon®/stainless steel.		
Absorber tower:	Glass fiber/stainless steel.		

Stream Temperatures

Furnace temperature (°C)	1150
Inlet to sulfur furnace (°C)	116.5
Outlet after drying tower (°C)	72.12
Inlet to absorber (°C)	206.9
Outlet after absorber (°C)	103.7

تم استخدام برنامج Disper V.4.0 لمحاكاة انتشار الملوث SO_2 المنبعث من المدخنة تحت ظروف مناخية مثل درجة الحرارة، الرطوبة، الرياح، وغيرها. علاوة على ذلك، تم تقديم خرائط ورسوم بيانية لتوزيع SO_2 لنموذج مصنع حمض الكبريتيك. وأخيرًا، تمت مناقشة تقييم المخاطر المرتبطة بالملوثات المنبعثة.

ثانيا:-

النتائج الاقتصادية:-

يعرض الجدول (5.23) التدفق النقدي الصافي السنوي وصافي القيمة المستقبلية للمشروع (Net Future Worth – NFW).

وفقًا للبيانات المبينة في الجدول (5.23)، فإن المشروع سيستعيد رأس المال المستثمر من إيرادات المبيعات بعد أربع سنوات من التشغيل (في عام 2027)، وسينتج عنه ربح (صافي القيمة المستقبلية) بقيمة 1,970,405.20 دولار أمريكي. يُعدّ زمن الاسترداد (Pay-back time) معيارًا مفيدًا لتقييم المشاريع ذات العمر القصير، أو عندما يكون رأس المال متاحًا لفترة زمنية محدودة فقط. وغالبًا ما يُستخدم لتقييم مشاريع تحسين صغيرة في المنشآت التشغيلية. زمن الاسترداد هذا (4 سنوات) يتوافق مع نطاق زمن الاسترداد المتوقع للمشروع بين 2 إلى 5 سنوات كما ذكر .Sinnott (2005)

يبلغ التدفق النقدي الصافي السنوي 3,745,966.49 دولار أمريكي، وفي نهاية عمر المصنع، يكون الربح المكتسب (صافي القيمة المستقبلية) 43,176,036.59 دولار أمريكي.

Table (5.23). Net cash flows, pay-back, and NFW of the plant

Year	End of year	Forecast sales[1,2] (kg/year)	Forecast selling[3] $/kg	Operating Costs ($) Fixed	Variable	Indirect	Sales income $	Net cash flow $	Project NFW $
-	0	-	-	-	-	-	-	-13013460.76	-
2024	1	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	-9,267,494.27
2025	2	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	-5,521,527.78
2026	3	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	-1,775,561.29
2027	4	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	1,970,405.20
2028	5	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	5,716,371.69
2029	6	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	9,462,338.18
2030	7	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	13,208,304.67
2031	8	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	16,954,271.16
2032	9	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	20,700,237.65
2033	10	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	24,446,204.14
2034	11	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	28,192,170.63
2035	12	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	31,938,137.12
2036	13	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	35,684,103.61
2037	14	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	39,430,070.10
2038	15	1.98×10^7	0.481	4,336,042	108,445.51	1,333,346	9,523,800	3,745,966.49	43,176,036.59

الجدول (23-5) التدفق النقدي ،الصافي السنوي وصافي القيمة المستقبلية للمشروع.

- **التكلفة المتوقعة لبيع حمض الكبريتيك تظل ثابتة على مدى (15 عامًا).**
- **سعة المصنع = 100٪.**
- **السعر المتوقع لبيع حمض الكبريتيك = 0.481 دولار/كجم لحمض الكبريتيك ذو النقاء 98.5٪ بالوزن (Pereraوآخرون، 2013).**

الخلاصة:-

بشكل عام، يمثل إنشاء مصنع لإنتاج حمض الكبريتيك مشروعًا صديقًا للبيئة، يضمن التخلص الآمن والاقتصادي من الكبريت العنصري الناتج عن عملية تحلية الغاز الطبيعي، بالإضافة إلى تحقيق مؤشرات اقتصادية كافية لجذب استثمارات القطاعين العام والخاص.

التوصيات:-

بناءً على النتائج المستخلصة للمصنع المقترح لإنتاج حمض الكبريتيك، يمكن تلخيص التوصيات كما يلي:

يمكن اعتبار نتائج هذه الدراسة دليلاً لمتخذي القرار بشأن إنشاء المصنع. فإن إنشاء مصنع لإنتاج حمض الكبريتيك سيوفر فرص عمل للشباب، ويسهم في تطوير قطاع الصناعة الكيميائية والبترولية من خلال اكتساب الخبرة في عملية تصنيع حمض الكبريتيك.

الكمية المتاحة من الكبريت الحر تسمح بإمكانية إنشاء 20 خط إنتاج إضافي لحمض الكبريتيك في المستقبل.

. الدراسات المستقبلية:-

هناك عدة مقترحات لتطوير الدراسة الحالية، ويمكن تلخيصها فيما يلي:

يمكن استخدام نموذج المحاكاة الحالي كمرجع لفهم العملية والجانب الاقتصادي، وكذلك كنقطة انطلاق لتطوير نماذج أكثر تقدمًا لتصميم المصنع وتحديد مواصفات معدات العملية. يمكن أيضًا إجراء دراسات تحسين إضافية، مثل ضبط كمية الطاقة الناتجة عن المصنع أو تحسين سياسات تغذية الهواء مع مراعاة تغيرات درجات الحرارة بين الليل والنهار باستخدام هذا النموذج.

إلى جانب الفوائد الناتجة عن إنتاج حمض الكبريتيك، يمكن تقليل انبعاثات أكاسيد الكبريت (SOx) بشكل كبير، بنسبة تصل إلى حوالي 80٪ في المصنع المقترح، من خلال تحسين معاملات التشغيل مثل معدلات تدفق الهواء أو نسب التوزيع. هذه التحسينات ستضمن الامتثال للمعايير الدولية لانبعاثات SOx لمدة 24

ساعة. علاوة على ذلك، يمكن استخدام نموذج المصنع في دراسات التحكم، وقابلية التشغيل، والتحسين، بالإضافة إلى تدريب المشغلين وتقييم السيناريوهات.

يمكن نمذجة المراحل الأربع للمحول في العملية بالتفصيل في برنامج Aspen Plus باستخدام أربعة مفاعلات RCSTR مع معادلات حركية محددة من قبل المستخدم. يمثل الروتين الفرعي FORTRAN المسمى USRKIN الحركيات لجميع المراحل، ويجب تجميعه وربطه في ملف بصيغة .dll. يجب وضع جميع الملفات المرتبطة (.bkp و .dll و .opt) في نفس الدليل. يمكن اختيار عمود Radfrac كبرج امتصاص تفاعلي لتحسين أداء التفاعلات الكيميائية في المحلول. كما يمكن نمذجة عملية حرق الكبريت باستخدام طريقة الحد الأدنى للطاقة الحرة لجибس لتحديد التركيب التوازني للمنتجات الناتجة عن التفاعلات المختلفة التي يمكن أن تحدث.

المراجع :- (References)

LY (2008). قرار أمين اللجنة الإدارية للهيئة العامة للبيئة رقم (96)، المتطلبات البيئية لحماية الهواء من التلوث، طرابلس، ليبيا.

Google Maps (2018). موقع مجمع مليتة. متاح على الإنترنت

Al-Dallal, A. J. A. (2013) . محاكاة عملية حامض الكبريتيك الرطب (WSA) لاستغلال الغاز الحمضي المفصول من الغاز الطبيعي العُماني. مجلة الخوارزمي الهندسية، 9(3): 58-69.

Amin, M.R., Sarker, N.K., Khan, T.A., & Islam, M.S. (2013). محاكاة إنتاج حمض الكبريتيك باستخدام عملية الحرق المباشر للكبريت مع الامتصاص الأحادي. مجلة الهندسة، 2(3): 113-117.

Amoot Iranian Trading Company (2013). تجاوز الإنتاج العالمي لحمض الكبريتيك 230.7 مليون طن في عام 2012. متاح على الإنترنت.

Apodaca, L. E. (2012). ملخص السلع المعدنية للكبريت. هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية، واشنطن العاصمة.

Ashar, N. G., & Golwalkar, K. R. (2013). دليل عملي لتصنيع حمض الكبريتيك، والأوليوم، وعوامل السلفنة. دار نشر سبرنغر الدولية، سويسرا.

BAT (1999). وثيقة تقنيات أفضل الممارسات المتاحة لإنتاج حمض الكبريتيك. الجمعية الأوروبية لحمض الكبريتيك (ESA)، والرابطة الأوروبية لمصنّعي الأسمدة (EFMA). متاح على الإنترنت.

Bhat, C., & Pinjala, V. (2010). نمذجة مصانع حمض الكبريتيك. مجلة الكبريت، إصدار سبتمبر-أكتوبر، 330: 1-5.

Catalysts (1989). كاتاليست من شركة Catalysts and Chemicals Europe SA، الكتالوج العام. بروكسل، بلجيكا.

Centre for Industry Education Collaboration (2018). حمض الكبريتيك. مركز التعاون في التعليم الصناعي، جامعة يورك، المملكة المتحدة. متاح على الإنترنت.

Chemical Engineering (2018). مؤشر تكلفة مصانع الهندسة الكيميائية (CEPCI): القيمة السنوية لعام 2018. متاح على الإنترنت.

Chowdhury, N. B., Hasan, Z., & Biplob, A. H. M. (2012). محاكاة مصنع حمض الكبريتيك باستخدام HYSYS ونهج تحسين الربح السنوي. مجلة العلوم، 2(4): 179-182.

Christensen, K., & Polk, P. (2011). تقليل انبعاثات SO2 باستخدام محفز Topse's VK-701 LEAP5™ الجديد. مجلة Sulfuric Acid Today، 17(1): 23-24.

Dougherty, J. W. (2011). مخاوف السلامة المتعلقة بالهيدروجين في صناعة حمض الكبريتيك. مؤتمر الكبريت 2011، 7-9 نوفمبر، هيوستن، تكساس.

DuPont (2012). تقنية عملية حرق الكبريت لإنتاج حمض الكبريتيك MECS®. متاح على الإنترنت.

ECE (2010). المفوضية الأوروبية للبيئة. معايير جودة الهواء. متاح على الإنترنت.

EG (2005). القانون المصري: القرار الوزاري رقم 1741 لسنة 2005، الملاحق التنفيذية للقانون رقم 4 لسنة 1994 بشأن البيئة. جمهورية مصر العربية.

Felthouse, T. R., DiGiovanni, M. P., Horne, J. R., & Richardson, S. A. (2011). تحسين أداء مصنع حمض الكبريتيك باستخدام محفزات MECS الجديدة GEAR. Sulfuric Acid Today، 17(2): 16–18.

Hill, C. G. (1977). مقدمة في حركية الهندسة الكيميائية وتصميم المفاعلات. جون وايلي وأبناؤه، نيويورك، الولايات المتحدة.

Ibanez, J. G., Batten, C. F., & Wentworth, W. E. (2008). التحديد المتزامن لـ SO_2 و SO_3 في غاز متدفق. بحوث الهندسة الكيميائية والصناعية، 47: 2449–2454.

IChemE (1987). إرشادات إجراءات تقييم المخاطر. مركز سلامة العمليات الكيميائية، معهد المهندسين الكيميائيين الأمريكي.

IHS Markit (2017). دليل الاقتصاد الكيميائي. أكتوبر 2017. متاح على الإنترنت.

International Market (2018). أسعار حمض الكبريتيك بتركيز 98.5%. متاح على الإنترنت.

Jiangxi Eloong Environmental Technology Co. Ltd. (2018). متاح على الإنترنت.

King, M., Moats, M., & Davenport, W. G. (2013). تصنيع حمض الكبريتيك: التحليل، التحكم، والتحسين. الطبعة الثانية، إلسفير، بولندا.

King, M. J., & Forzatti, R. J. (2009). المنتجات الثانوية القائمة على الكبريت في صناعة المعادن غير الحديدية. ضمن أعمال مؤتمر COM 48، مونتريال، 137–**149**.