

محاكاة ودراسة استخدام المحلل الكهربائي في منظومة الدفع البحري

أريج محمد عمار¹ ، عبداللطيف بشير بن موسى²

قسم الهندسة البحرية والمنصات العائمة - كلية الهندسة - جامعة طرابلس - طرابلس - ليبيا^{1, 2}

ar.amar@uot.edu.ly , a.mousa@uot.du.ly

ملخص :

تستعرض هذه الدراسة إمكانية تحسين كفاءة أنظمة الدفع البحري المستدامة باستخدام المحلل الكهربائي كبديل للبطاريات التقليدية لتخزين الطاقة المهدورة الناتجة عن محرك الاحتراق الداخلي. تتمثل المشكلة الأساسية في محدودية كفاءة البطاريات البحرية التقليدية وتحدياتها المرتبطة بقصر عمرها، وارتفاع تكاليف صيانتها، وثقل وزنها. لذا يتمثل الهدف الرئيسي للدراسة في تعزيز استهلاك الطاقة في السفن عبر تحويل الطاقة الزائدة إلى هيدروجين وتخزينها، مما يتيح استخدامها لاحقاً لتشغيل خلايا الوقود البحرية ويقلل الاعتماد على الوقود الأحفوري. تم في هذه الدراسة تبني ظروف تشغيل محرك ديزل نوع Sulzer6RTA38 التابع لشركة Sulzer Brothers LTD السويسرية ويعتبر من نوع المحركات البطيئة السرعة، ليتم بذلك تصميم ومعايرة نموذج لهذا المحرك في البرنامج العالمي Aspen Plus ، وللوصول إلى ما هو مستهدف من منظومة دفع متكاملة تم إضافة نموذج للمحلل الكهربائي القلوي Alkaline Electrolysis (AK) بنموذج المحرك ليشكلا نموذج لمنظومة واحدة أطلق عليها مسمى منظومة الطاقة الخضراء . وقد توصلت الدراسة إلى أن استخدام المحلل الكهربائي القلوي لا يتيح فقط تخزين الطاقة بكفاءة، بل يمكن أيضاً من خفض الجهد المطلوب لتفكيك جزيئات الماء H₂O عند ارتفاع درجة حرارة التشغيل، مما يقلل من استهلاك الطاقة الكلي. وبمعنى آخر تمثل هذه الدراسة خطوة مهمة نحو تبني حلول الطاقة النظيفة في القطاع البحري، ويعزز من جهود التحول إلى أنظمة أكثر استدامة وأقل انبعاثات ضارة.

الكلمات المفتاحية : محرك ديزل ، محلل كهربائي ، إنتاج الهيدروجين ، منظومة الدفع البحري.

Simulation And Study Using Electrolyzers In The Marine Propulsion System

Areej mohammed ammar¹ , Abdullatif bashir bin musa²

Department Of Marine Engineering And Floating Platforms - Faculty Of Engineering ,
University Of Tripoli, Tripoli, Libya^{1,2}

ar.amar@uot.edu.ly , a.mousa@uot.du.ly

Abstract:

This study reviews the possibility of improving the efficiency of sustainable marine propulsion systems by using electrolyzers as an alternative to traditional batteries to store wasted energy generated by the internal combustion engine. The main problem is the

limited efficiency of traditional marine batteries and the challenges associated with their short lifespan, high maintenance costs, and heavy weight. Therefore, the main goal of the study is to enhance energy consumption in ships by converting excess energy into hydrogen and storing it, which allows it to be used later to operate marine fuel cells and reduces dependence on fossil fuels. In this study, the operating conditions of a Sulzer Brothers 6RTA38 diesel engine were adopted. LTD It is considered a type of slow-speed engine from Switzerland, so a model of this engine was designed and calibrated in the global Aspen Plus program. To achieve the goal of an integrated propulsion system, a model of the alkaline electrolysis (AK) was added to the engine model to form a model of a single system called Named Green energy system. The study found that using an alkaline electrolyzer not only allows for efficient energy storage, but also enables the effort required to break down water molecules (H₂O) to be reduced when the operating temperature rises, which reduces overall energy consumption. In other words, this study represents an important step towards adopting clean energy solutions in the maritime sector, and enhances efforts to transition to more sustainable systems with less harmful emissions.

Keywords : diesel engine , electrolyzers , hydrogen production , marine propulsion systems.

1. المقدمة :

تعتمد منظومات الدفع البحري على الوقود الأحفوري الديزل أو الغاز الطبيعي المسال أو البطاريات الكهربائية لتوليد الطاقة التي تلزم السفن والغواصات لدفعها في البحر و هذه المنظومات تشمل مجموعة من المكونات التي تعطي كفاءة للسفينة للتحرك في الماء ، حيث تكمن وظيفة المحرك في توليد الطاقة الميكانيكية اللازمة لدفع الرافص propeller ، ولاكن تواجه هذه الأنظمة عدة تحديات وأحد التحديات الرئيسية هو الطاقة المهدورة عند العمل الظروف الغير مثالية عامة او عند السرعات المنخفضة خاصة ، تم إيجاد عدة حلول مبتكرة لاستعادة هذه الطاقة المهدورة ومن أهمها أنظمة الدفع البحري الهجينة والتي تعتمد على دمج محركات الديزل أو الغاز بالبطاريات ليتم تخزين الطاقة الزائدة والمتولدة من المحرك واستخدامها عند الحاجة لها لتوفر الطاقة اللازمة لدفع السفينة بدل عن المحرك عند السرعات المنخفضة أو عند التوقف والتحسين من كفاءة الدفع [1-2].

ففي الدراسة [3] تناول الباحثون تصميم وتطوير لنظام دفع هجين لتحقيق كفاءة أعلى وتقليل الوقود المستهلك، حيث يتم دمج محرك ديزل تقليدي مع نظام دفع كهربائي ودمج مع بطاريات ليثيوم تخزين الطاقة الزائدة لدعم المحرك الكهربائي بالطاقة المخزنة بداخلها، وتوصل الباحثون في هذه الدراسة أن النظام الهجين يساعد على التقليل من استهلاك الوقود والمساعدة في فترات الحمل الخفيف، وأيضا انخفاض الانبعاثات الكربونية وزيادة في كفاءة التشغيل وأهم ما توصل له الباحثون في هذه الدراسة أن هذا النظام يسمح بتخزين الطاقة الزائدة في البطاريات مما يعزز كفاءة استهلاك الطاقة والتقليل من الفاقد.

وبالرغم من أن البطاريات تعتبر من الحلول المبتكرة للتغلب على الفقد في الطاقة إلا أن لها عيوب حيث أنها بمرور الوقت تقل كفاءتها ومع تكرار التفريغ والشحن أداؤها ينخفض، ومن عيوبها أيضا تحتاج لمساحة كبيرة و ثقيل الوزن ولها تكلفة مرتفعة في التصنيع والصيانة، و تكون هذه البطاريات معرضة للاحتراق وللانفجار عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة أو عند تعرضها لتلف ميكانيكي و يتطلب هذا أنظمة متقدمة لضمان تشغيلها بشكل يضمن الأمان والسلامة [4-5].

وفي الدراسة [6] ركز الباحثون على دراسة تقنيات لتحسين كثافة الطاقة وعمر البطارية، وتناولت هذه الدراسة المواد التي يمكن استخدامها في صناعة البطاريات مثل الليثيوم أيون الصلبة، وتمت مناقشة المشكلات المتعلقة بالكفاءة الحرارية والتحديات المتعلقة بإعادة تدوير البطاريات بعد انتهاء عمرها الافتراضي، وتوصل الباحثون إلى أن هناك تحسينات ملحوظة في كثافة الطاقة للبطاريات وأن التحسينات في التصميم والمواد المستخدمة أدى لتقليل من مخاطر الاشتعال والزيادة في الكفاءة وإن إعادة التدوير يحسن من الاستدامة البيئية وتقليل النفايات الناتجة عن البطاريات.

تعتبر الطاقات المتجددة من الحلول المهمة والمستدامة التي يتم السعي لاعتمادها من قبل العالم أجمع لمواجهة الاعتماد المفرط على الوقود الأحفوري الذي يتسبب في تحديات اقتصادية وبيئية. تعتبر طاقة الهيدروجين والطاقة الشمسية وطاقة الرياح من المصادر المهمة للطاقات المتجددة وأيضا من المصادر النظيفة وغير المحدودة، وهذا ما يجعلها من الخيارات المثالية للحد والتقليل من انبعاثات الغازات الدفينة. إن التحول نحو الأنظمة المستدامة للدفع البحري تعد فرصة كبيرة في القطاع البحري للحد من تلوث البحار والهواء الجوي، و الهيدروجين يعتبر بديلا مثاليا عن الوقود

الأحفوري .و إنتاجه معروف منذ حوالي 200 عام ، وأيضا يعتبر من الوسائل الواعدة في مجال تخزين الطاقة ،حيث أن الهيدروجين يتوفر في البيئة بشكل كبير و أصبح شائعا جدا السنوات الأخيرة بسبب النقص في الاحتياطي النفطي و الارتفاع في تكاليف الطاقة [7-8]. ويمكن إنتاج الهيدروجين من أي مصدر للطاقة و أحد الطرق الفعالة لإنتاج الهيدروجين هي طريقة التحليل الكهربائي للماء بسبب وفرة الماء بشكل كبير في الطبيعة ، معظم عمليات إنتاج الهيدروجين في الوقت الحالي تتم عن طريق التحليل الكهربائي للماء عبر تقسيم H_2O جزئ الماء إلى غاز الهيدروجين H_2 وغاز الأكسجين O_2 ، وهذه العملية تحتاج إلى مصدر للطاقة ويمكن توفير هذه الطاقة من الطاقات المتجددة مثل الشمس والرياح أو من أي مصدر للطاقة كما منظومات الدفع البحري ، حيث أن أنظمة الدفع البحري القائمة على استخدام المحلل الكهربائي لتخزين الطاقة على هيئة هيدروجين من أحد البدائل الواعدة للبطاريات التقليدية والتي لا يمكننا الاستفادة من كامل الطاقة المخزنة بها عند الحاجة لها ،وهذا من العيوب التي يلزم والتغلب عليها و إيجاد حلول بديلة أكثر كفاءة مثل المحلل الكهربائي لما يوفره من كفاءة عالية وتقليل الانبعاثات الضارة إلى الصفر وهذه التكنولوجيا تعتبر صديقة للبيئة وطويلة الأمد لأنظمة النقل البحري، تكمن أهمية التحليل الكهربائي للماء في القدرة على إنتاج الطاقة من الموارد الطبيعية المستدامة والمتجددة مثل المياه والطاقة الشمسية بدون أن ينتج عنها أي مخلفات كربونية ضارة [9] .

وأجريت العديد من الدراسات في منظومات الدفع البحري بخصوص استبدال البطاريات بالمحلل الكهربائي لإنتاج الهيدروجين وتخزين الطاقة الزائدة وتوصل الباحثون لعدة نتائج ، ففي الدراسة [10] أجرى الباحث دراسة حول استخدام المحلل الكهربائي في أنظمة الدفع البحري كبديل عن البطاريات و إنتاج هيدروجين نظيف باستخدام التحليل الكهربائي لمياه البحر المنقاة وتخزين الطاقة واستخدامها في تشغيل خلايا وقود بحرية كبديل للوقود الاحفوري ، وتوصل الباحثون لنتائج أهمها أنه الهيدروجين المنتج من التحليل الكهربائي لمياه البحر ذو جودة عالية ويمكن استخدامه في خلايا الوقود دون أن يؤثر على كفاءة النظام ، وتم تحويل الطاقة الكهربائية الزائدة بكفاءة عالية إلى هيدروجين وهذا ما يقلل من الاعتماد على البطاريات التقليدية و أنظمة التخزين الأخرى.

في الدراسة [11] تناولت هذه الدراسة فكرة استخدام طاقة الهيدروجين كبديل مستدام للطاقة في السفينة Energy Observer والتي تعتبر رائدا في هذا المجال وهيا نموذجا مبتكرا في مجال النقل البحري المستدام وتستخدم نظاما متكاملًا يعتمد على إنتاج الهيدروجين من الماء باستخدام طاقة الرياح والطاقة الشمسية و باستخدام التحليل الكهربائي وخلايا الوقود، وتوصل الباحثون إلى ان استخدام الهيدروجين يمكن أن يحدث ثورة في مستقبل النقل البحري والتقليل من الاعتماد على الوقود الأحفوري وتقليل انبعاثات الكربون وإمكانية تطبيق هذه التقنيات في مجالات أخرى .

إن الهدف الرئيسي من هذه الدراسة محاكاة إمكانية الاستفادة من الطاقة الزائدة والمهدورة من منظومات الدفع البحري لإنتاج الهيدروجين بواسطة محلل كهربائي وتخزين هذه الطاقة في الهيدروجين كبديل عن البطاريات التقليدية التي لا يمكن الاستفادة من كامل الطاقة المخزنة بها ، تم في هذه الدراسة تبني ظروف تشغيل محرك ديزل نوع Sulzer6RTA38 التابع لشركة Sulzer Brothers LTD السويسرية ويعتبر من نوع المحركات البطيئة السرعة ، ليتم بذلك تصميم ومعايرة نموذج لهذا المحرك في البرنامج العالمي Aspen Plus ، وللوصول إلى ما هو مستهدف من منظومة دفع متكاملة تم إضافة نموذج معاير للمحلل الكهربائي القلوي Alkaline Electrolysis (AK) بنموذج المحرك ليشكلا نموذج لمنظومة واحدة أطلق عليها مسمى منظومة الطاقة الخضراء .

2. وصف منظومة الطاقة الخضراء :

تتكون المنظومة في هذه الدراسة من مجموعة من المكونات التي تعمل جنبا إلى جنب لتحقيق الأهداف المرجوة ، كالآتي :

◀ منظومة الدفع البحري (محرك الاحتراق الداخلي)

◀ منظومة المحلل الكهربائي القلوي (Alkaline electrolysis)

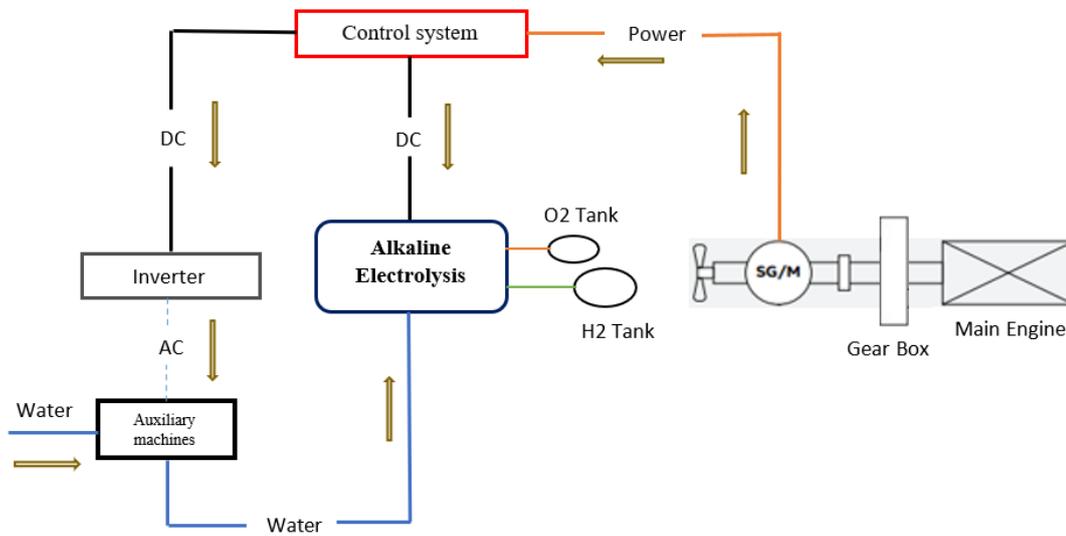
◀ منظومة التحكم (control system)

بالإضافة إلى بعض الآلات المساعدة (Auxiliary machines) من مسخنات الماء ومضخات وغيرها، وتحتوي المنظومة على خزانات خاصة للهيدروجين الأخضر وأخرى للأكسجين النقي كما هو موضح شكل (1). و لربط هذه المعدات والأجهزة معا وجعلها تعمل بشكل ألي ، تحتاج هذه المنظومة إلى نظام تحكم الى . يقوم هذا النظام بتوجيه جزء من الطاقة الكهربائية إلى محول

التيار (inverter) الذي يقوم بدوره بتحويل جزءا من التيار المستمر (DC) إلى تيار متردد (AC) ، مما يمكن من تغذية السخانات الكهربائية والمضخات بالطاقة اللازمة ، وهكذا تبدأ المنظومة في العمل وإنتاج الهيدروجين الأخضر.

الفائض من الطاقة الناتجة عن محرك الديزل يمر عبر منظومة التحكم التي بدورها تقوم بتحويل هذه الطاقة إلى تيار كهربائي مستمر وتقوم بتوجيه جزء منه إلى المحلل الكهربائي والجزء الآخر يتم تمريره إلى محول التيار لتغذية الآلات المساعدة والسخانات والمضخات ، عند مرور التيار الكهربائي المستمر عبر المحلل الكهربائي تبدأ عملية تحليل جزيئات الماء H_2O وتتفصل جزيئات الماء إلى غاز هيدروجين H_2 وغاز الأكسجين O_2 ، يعتبر التحليل الكهربائي للماء بالطريقة القلوية من الوسائل المستدامة والفعالة وبتكاليف اقتصادية ومنخفضة [15].

3. النموذج الرياضي لمنظومة الطاقة الخضراء :



الشكل(1): مخطط توضيحي لمنظومة الطاقة الخضراء

يتكون نموذج المحاكاة لمنظومة الطاقة الخضراء من نموذجين لأجهزة مختلفة وهي :

نموذج لمنظومة الدفع البحري (محرك احتراق داخلي) و نموذج لمحلل كهربائي قلوي، تم دمج النموذجين معا (بعد معايرتهم) للحصول على النتائج المرجوة والتي تتمثل في الاستفادة من الطاقة المهدورة من منظومة الدفع البحري في تشغيل المحلل الكهربائي وتخزين هذه الطاقة في الهيدروجين

حيث يمكن استخدام هذا الهيدروجين في عدة مجالات مثل الصناعة أو التدفئة أو تحلية المياه أو كوقود بديل أو إنتاج الكهرباء عبر ربط خلية وقود Fuel cell في هذه المنظومة لإعادة الطاقة المخزنة في الهيدروجين إلى صورتها ، حيث يمكن تحويل هذا الهيدروجين المنتج إلى صورة طاقة كهربائية للتمكن من استخدامها عند الحاجة لها لتشغيل وتعويض القدرة في منظومة الدفع البحري ، حيث أن المحلل الكهربائي يكون بديلا للبطاريات في هذه المنظومات بسبب ضعف البطاريات في إعطاء والاستفادة من كل الطاقة المخزنة بها على خلاف المحلل الكهربائي.

جدول (1) : مواصفات نموذج المحلل الكهربائي القلوي ومحرك الاحتراق الداخلي

المحرك الاحتراق الداخلي		المحلل الكهربائي القلوي	
القيمة	المعامل	القيمة	المعامل
C12h26	نوع الوقود	1.23V	الجهد المثالي لخلية المحلل الكهربائي
6	عدد الأسطوانات	4000 A/m ²	كثافة التيار
30bar	ضغط غرفة الاحتراق	0.1 m	مساحة المحلل الكهربائي
1030C°	درجة حرارة غرفة الاحتراق	12	عدد خلايا المحلل الكهربائي
1.6066Kg/sec	كتلة الوقود	4.45153E-05	r1
3.5bar	ضغط دخول الهواء	6.88874E-09	r2
37C°	درجة حرارة الهواء	0.33824	S
69.4kg/sec	كتلة الهواء	-0.01539	t1
3.5bar	ضغط دخول الوقود	2.00181	t2
37C°	درجة حرارة دخول الوقود	15.24178	t3
		70 C°	درجة حرارة التشغيل
		585 Kg/hr	معدل تدفق الماء
		7 Bar	الضغط

4. منظومة الدفع البحري :

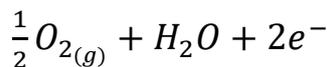
إن الدفع البحري هو النظام المستخدم لتوليد القوة اللازمة لدفع وتحريك السفينة عبر المياه وهذه المنظومات تشمل مجموعة من المكونات التي تعطي كفاءة للسفينة للتحرك في الماء بسهولة . في السابق كان الدفع البحري قائم على استخدام الأشرعة والمجاديف ولا يزال قائما في بعض القوارب الصغيرة ، أما السفن الحديثة معظمها تستمد قوة الدفع من قبل الأنظمة الميكانيكية حيث تتكون من محرك أو أكثر [16] ، وفي هذه الدراسة سيتم التركيز على محرك الديزل وهو نوع من محركات الاحتراق الداخلي يستخدم وقود الديزل لتوليد الحركة. تم اختراع هذا النوع من المحركات بواسطة

رودولف ديزل في القرن التاسع عشر وتعتمد على مبدأ الاحتراق الذاتي حيث يتم ضغط الهواء داخل الأسطوانة بشكل مرتفع حتى يصل إلى درجة حرارة تجعل وقود الديزل يشتعل تلقائياً عند الحقن [17].

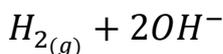
5. نموذج المحلل الكهربائي القلوي :

هو جهاز يقوم بتقسيم جزيئي الماء إلى غاز الهيدروجين H_2 و الأكسجين O_2 [18]، ويتكون المحلل الكهربائي القلوي من قطبين موصلان يتم غمرهما في وعاء يحوي بداخله محلول قلوي (إلكتروليت موصل OH^-) ، إحدى القطبين سالب ويسمى كاثود والقطب الآخر موجب ويسمى أنود . يتم تطبيق تيار كهربائي مستمر DC بين القطبين الأنود والكاثود ليتم احداث فرق جهد لتحريك الأيونات داخل المحلول القلوي ، وهذا ما يسبب عملية أكسدة في الأنود وفقد في إلكترونات بينما تتجذب الأيونات السالبة (الأيونات) إلى القطب ، وفي الكاثود تحدث عملية اختزال بالتالي يكتسب هذا القطب الإلكترونات وتتجذب له الأيونات الموجبة (الكاتيونات) [19] ، ويعمل هذا النوع من المحللات الكهربائية عند درجات حرارة تشغيل منخفضة وتتراوح ما بين 60 إلى 90 درجة مئوية [20] وكثافة تيار ما بين 100-400 ملي أمبير/ سنتيمتر² [21].

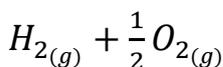
التفاعلات الكيميائية التي تحدث داخل المحلل الكهربائي القلوي تتم كالآتي :
عند الأنود :



عند الكاثود :



التفاعل الكلي لتقسيم الماء :



يتم استخدام ال KOH كإلكتروليت موصل بسبب تميزه بالموصلية العالية ومقاومته للتآكل .

يتم إيجاد جهد الخلية V_{cell} كالآتي :

$$V_{cell} = V_{rev} + (r_1 + r_2 T) i + s \log[(t_1 + t_2 T + t_3 T * T) i + 1] \quad (4)$$

حيث أن :

T هي درجة حرارة التشغيل وقيمتها 70°C درجة مئوية ، والجهد المثالي للخلية $V_{rev} = 1.23\text{V}$ ، و i هو مقدار كثافة التيار المطبق ومقداره 4000 A/m^2 و تم إيجاد باقي الثوابت بالتجارب المعملية [22].

يتم إيجاد معدل الطاقة المستهلكة في المحلل الكهربائي القلوي وفقا للاتية :

$$WAE = I \cdot N \cdot V_{cell} \quad (5)$$

ويتم حساب كتلة الهيدروجين H_2 كالآتي :

$$m_{\text{H}_2} = M n_{\text{H}_2} \quad (6)$$

$$n_{\text{H}_2} = \frac{WAE}{V_{cell} \cdot z \cdot F} \quad (7)$$

حيث أن :

M : هي الوزن الذري .

n_{H_2} : العدد المولي للهيدروجين ويساوي العدد المولي للماء .

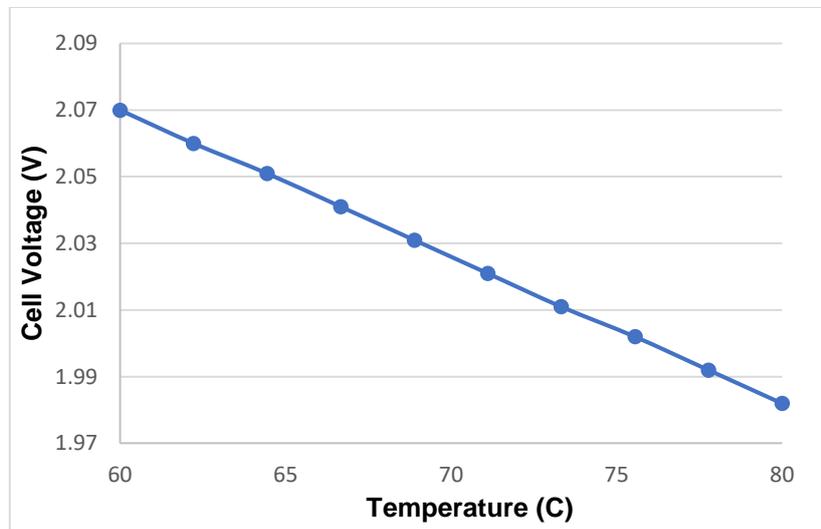
Z : عدد الإلكترونات المنتقلة في التفاعل الكهروكيميائي .

F : ثابت فراداي ويساوي (96485 C/mole) .

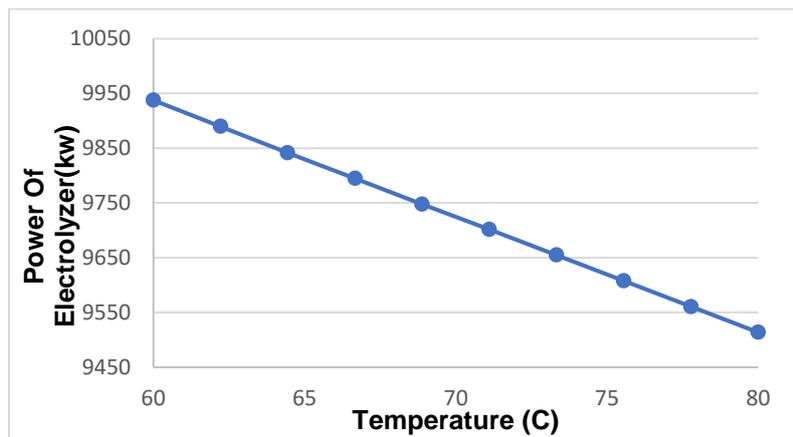
6. النتائج والمناقشة :

تم في هذه الدراسة محاكاة لاستخدام المحلل الكهربائي القلوي في منظومة الدفع البحري ، حيث تم استبدال البطاريات والاستفادة من المحلل الكهربائي لحفظ الطاقة المهذورة المنتجة من محرك الاحتراق الداخلي في الهيدروجين والاستفادة منها عند احتياج المحرك للطاقة . في الشكل (2) العلاقة بين درجة حرارة تشغيل المحلل وجهد الخلية عند كثافة تيار ثابتة 4000 A/m^2 ، حيث أن الزيادة في درجة حرارة التشغيل من $60 - 80$ درجة مئوية ينتج عنها انخفاض في جهد الخلية V_{cell} وهذا يعني أن عند زيادة درجة الحرارة فإن حركة الأيونات داخل الخلية تزداد مما يضمن سرعة التفاعلات وتحقيق توازن كيميائي أسرع ، وهذا ما يزيد كفاءة الخلية وجهد أقل لتفكيك جزيئات الماء إلى H_2 و O_2 ، وهذا الارتفاع في درجة الحرارة يقلل من قوة الترابط بين جزيئات الماء وانفصال

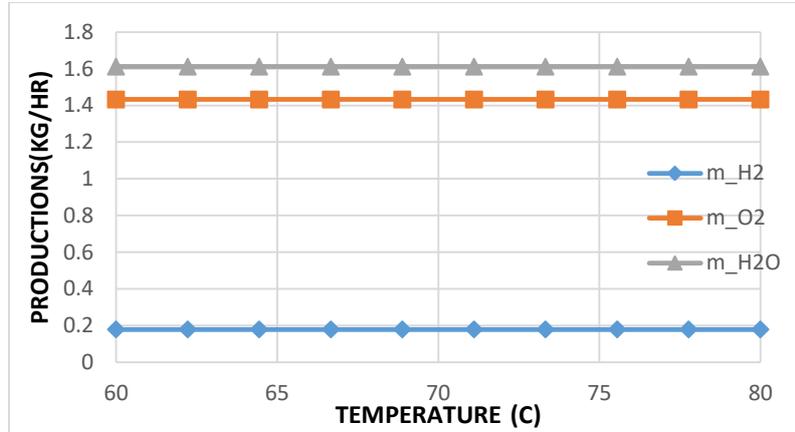
مكوناته كما هو مبين في (المعادلة 3) ، وبالتزامن مع هذا الارتفاع في درجات حرارة التشغيل فإن معدل الطاقة المستهلكة في المحلل الكهربائي تتخفض مع ثبوت مقدار كثافة التيار ا (المعادلة 5) من 9514 Kw-9938 Kw كيلو وات (الشكل 3)، أي أن المحلل الكهربائي يحتاج إلى كمية طاقة قليلة من منظومة الدفع البحري لكي يشتغل . وهذه الزيادة في درجة الحرارة ليس لها أي تأثير على كتل ال H₂ و O₂ المنتجة مما يعني ثبات كتلة ال H₂O المدخلة، أي أن أداء النظام له علاقة بالتفاعلات الحرارية والكهربائية وليس ب كمية المواد المتفاعلة (الشكل 4).



الشكل (2) : تأثير درجة حرارة تشغيل المحلل الكهربائي على جهد الخلية

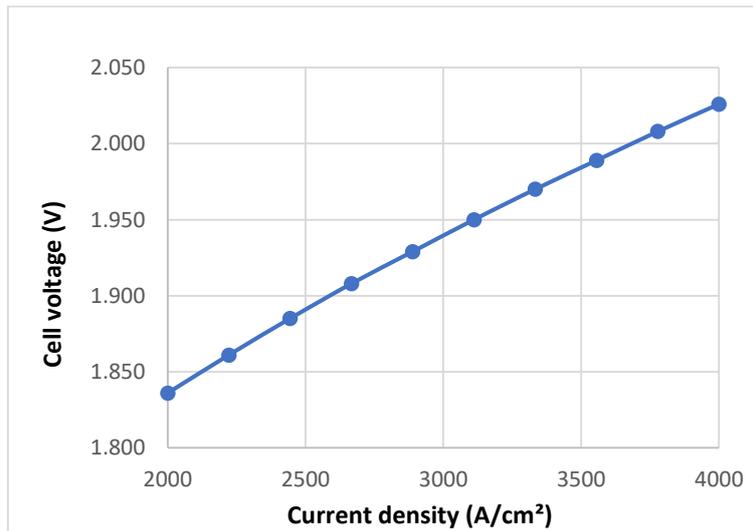


الشكل (3) : تأثير درجة حرارة تشغيل المحلل الكهربائي على معدل الطاقة المستهلكة

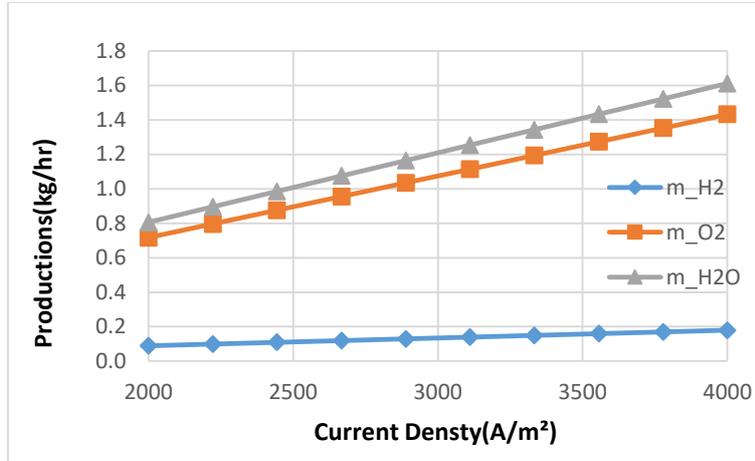


الشكل (4) : تأثير درجة حرارة تشغيل المحلل الكهربائي على معدل الإنتاجية

الشكل (5) يوضح العلاقة بين كثافة التيار وجهد الخلية V_{cell} ، ومن الشكل نلاحظ أن العلاقة بين كثافة التيار وجهد الخلية هي علاقة طردية ، يزداد جهد الخلية من 1.836 V- 2.026 V بزيادة كثافة التيار من $2000 A/m^2$ - $4000 A/m^2$ وهذا بسبب زيادة الاستقطاب والمقاومة الكهربائية فيزداد الجهد للحفاظ على التيار ، وبزيادة التيار يزداد معدل الإنتاجية للهيدروجين والأكسجين لأنها تتناسب بشكل مباشر مع التيار (الشكل 6).

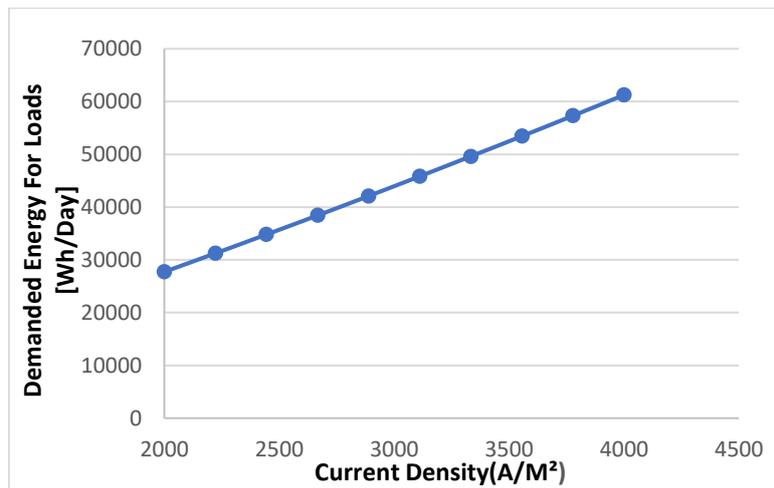


الشكل (5): تأثير كثافة التيار على جهد الخلية



الشكل (6) : تأثير كثافة التيار على معدل الإنتاجية

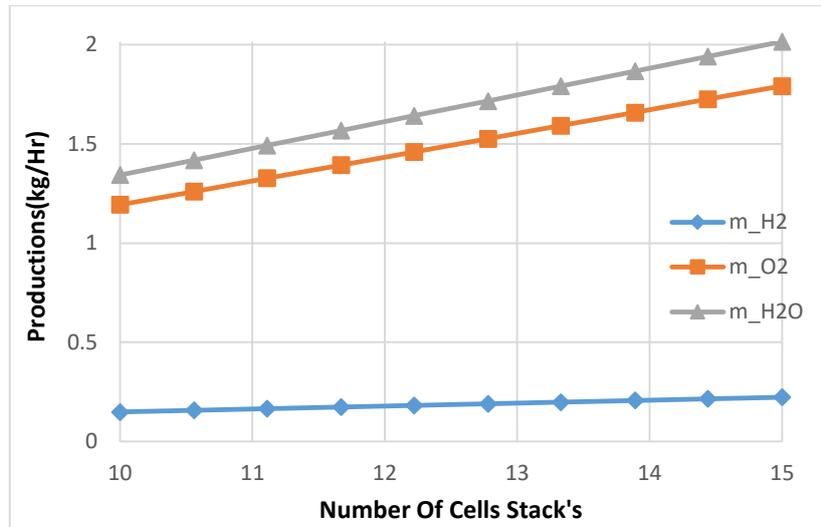
الشكل (7) يبين العلاقة بين كثافة التيار والطاقة المطلوبة للأحمال ونلاحظ من الشكل أن بزيادة كثافة التيار يزداد استهلاك الطاقة التي تلزم لتحفيز عملية التحليل لإنتاج الهيدروجين والأكسجين وهذه الزيادة في الطاقة ترجع لأن النظام يحتاج لمزيد من الطاقة لتحفيز التفاعلات الكيميائية وبالتالي من الشكل نستنتج أن أفضل نقاط للتشغيل تكون من 3000-3500 A/m² حيث يكون الاستهلاك في الطاقة معتدل.



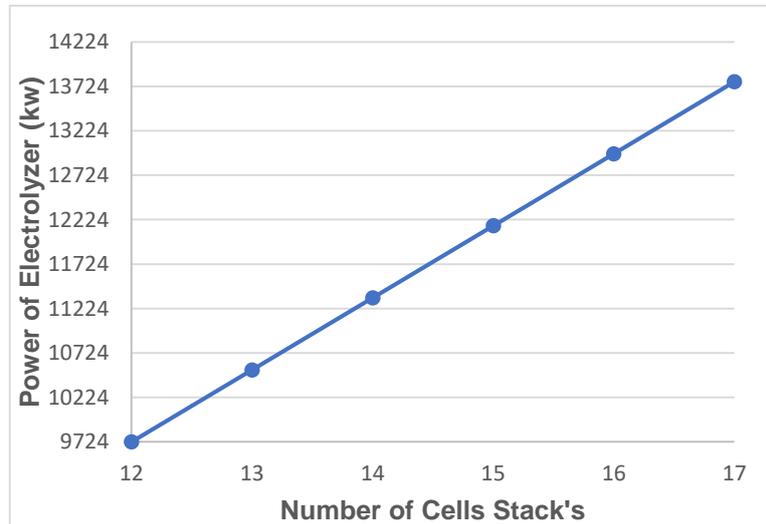
الشكل (7) : تأثير كثافة التيار على مقدار الطاقة المطلوبة للأحمال.

الشكل (8) يبين أن بزيادة عدد حزم خلايا المحلل الكهربائي القلوي يزداد معدل الإنتاجية حيث أن التيار الكهربائي يتوزع بشكل أفضل وتقل المقاومة وتحقيق توازن أفضل في التفاعلات الكيميائية

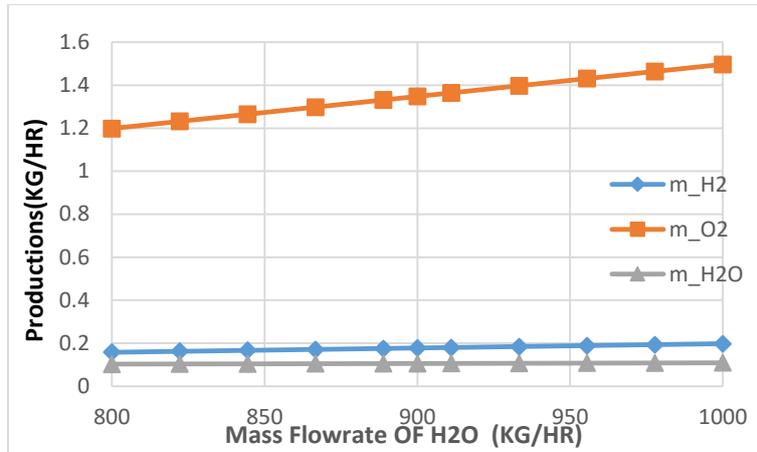
التي تحدث لفصل جزيئات الماء إلى H_2 و O_2 ، وهذ الزيادة تلعب دورا مهما في تحسين الظروف التشغيلية مثل درجات الحرارة والضغط وبالمقابل زيادة كمية الطاقة اللازمة المتحصل عليها من منظومة الدفع البحري لتغطية متطلبات الطاقة للمحلل الكهربائي (الشكل 9) وايضا زيادة كتلة التدفق للماء تزيد من إنتاجية غاز ال H_2 و O_2 الشكل (10).



الشكل (8) : تأثير زيادة عدد حزم خلايا المحلل الكهربائي على معدل الإنتاجية.



الشكل (9) : تأثير زيادة عدد حزم خلايا المحلل الكهربائي على كمية الطاقة التي يحتاجها المحلل الكهربائي



الشكل (10) : تأثير زيادة معدل تدفق كتلة الماء على معدل الإنتاجية

7. الخلاصة :

في هذه الدراسة تم تصميم ومحاكاة لمنظومة دفع بحري وتخزين الطاقة الزائدة من محرك الديزل في صورة هيدروجين عبر ربط منظومة الدفع البحري بمحلل كهربائي قلوي (منظومة الطاقة الخضراء) ومن خلال عملية المحاكاة لمنظومة الطاقة الخضراء ودراسة بعض التأثيرات على هذه المنظومة وجد أن زيادة درجة حرارة التشغيل من 60 إلى 80 درجة مئوية تسبب في خفض جهد الخلية من 1.23 فولت إلى 0.9 فولت، مما يعزز من سرعة التفاعلات الكيميائية ويحسن من كفاءة التحليل الكهربائي. وتبقى إنتاجية الهيدروجين ثابتة دون تأثير من التغير الناتج في درجة الحرارة ، وهذا يعزز من فعالية النظام في البيئات التشغيلية المختلفة وانخفاض في معدل الطاقة المستهلكة للمحلل الكهربائي حيث انخفضت من 9938 كيلو وات إلى 9514 كيلو وات عند كثافة تيار ثابتة وقدرها 4000 أمبير/متر مربع، هذا يدل على كفاءة أعلى وبتكاليف طاقة أقل. وتبين أن زيادة عدد حزم خلايا المحلل الكهربائي القلوي يؤدي إلى تحسين معدل الإنتاجية الكلي، حيث يتوزع التيار الكهربائي بشكل أفضل وتتحقق تفاعلات كيميائية مستقرة، مما يزيد من كفاءة النظام العام.

وفي دراسة التأثيرات تم تحديد أفضل نقاط تشغيل عند كثافة تيار تتراوح بين 3000 إلى 3500 أمبير/متر مربع، حيث تبين أن هذا النطاق يوازن بين استهلاك الطاقة وكفاءة الإنتاجية. تشير هذه النتائج إلى أن استخدام المحلل الكهربائي القلوي يمكن أن يقدم بديلاً موثوقاً وفعالاً عن البطاريات التقليدية، ويتيح تخزين الطاقة بفعالية، مع تقليل الانبعاثات وتحقيق تشغيل آمن ومستدام لمنظومات الدفع البحري.

8. المراجع

- [1] Ovrum E, Bergh TF. “Modelling Lithium-Ion Battery Hybrid Ship Crane Operation” . APPI Energy 2015;152:162-72
- [2] Zahedi B, Norum LE, Ludwigsen KB. “Optimised Efficiency Of All-Electric Ship By DC Hybrid Power Systems”. J Power Sources. 2014;255:341–54.
- [3] Notti , E ., Sala , A & Begg , D . (2011). New Hybrid Diesel Electric Propulsion System For Trawlers . Conference Paper Italian National Research Council . Dol:10.13140/2.14543.3043.
- [4] MAN Truck & Bus Se . (2021). MAN Smart Hybrid Experience :” Marine Hybrid Brochure” . MAN Truck & Bus SE.
<https://Www.Man-Engines.Com>
- [5] Sauer , D.U., & Wenzl , H.(2008). “Comparison Of Different Approaches For Lifetime Prediction Of Electrochemical Systems-Using Lead-Acid Batteries As Example “. Journal Of Power Sources,176(2),534-546.
- [6] Salgado , R . M., Danzi ,F., Oliveira , J. E., El-Azab, A., Camanho , P.P.,& Braga , M.H. (2021). The Latest Trends In Electric Vehicles Batteries . Molecules, 26(11),3188.
- [7] Zeng, K., & Zhang , D. Recent Progress In Alkaline Water Electrolysis For Hydrogen Production And Applications . Center For Petroleum , Fuel , And Energy , The University Of Western Australia.
- [8] El-Shafie , M. (2023) . Hydrogen Production By Water Electrolysis Technologies : A Review . Results In Engineering , 20 , 101426. Elsevier.
- [9] green tech . (n.d.).combining hydrogen with energy storage. Retrieved from <https://www.greentech.com/ar/combining-hydrogen-with-energy-storage.html>
- [10] Bacquart, T., Moore, N., Wilmot, R., Bartlett, S., Morris, A. S. O., Olden, J., Becker, H., Aarbaug, T. A., Germe, S., Riot, P., Murugan, A., & Mattelaer, V. (2021). Hydrogen for Maritime Application – Quality of Hydrogen Generated Onboard Ship by Electrolysis of Purified Seawater. Journal of Marine Science and Engineering, 9(5), 514. <https://doi.org/10.3390/jmse9050514>.
- [11] cnet. (2021) . energy observer on board the worlds first hydrogen powered boat. Retrieved from

<https://www.cnet.com/science/energy-observer-on-board-the-worlds-first-hydrogen-powered-boat/>

[12] الرقيعي، م.إ.، و بن موسى، س.ع، أ.د.، فرحات، س.(2023). إستعادة الحرارة المهدرة من محركات الديزل [12] البطيئة السرعة.

[13] Sánchez, M., Amores, E., Abad, D., Rodríguez, L., & Clemente-Jul, C. (2020). "Aspen Plus model of an alkaline electrolysis system for hydrogen production". International Journal of Hydrogen Energy, 45(7), 3916-3929.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.027>

[14] Ulleberg, Ø. (2003). "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: A system simulation approach". International Journal of Hydrogen Energy, 28(1), 21-33. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00033-2)

[15] Gondal, I. Masood, S. Khan, R. ; Green hydrogen production potential for developing a hydrogen economy in Pakistan. International Journal of hydrogen energy. 2018: 1-29.

[16] دفع بحري .ويكيبيديا العربية

https://ar.m.Wikipedia.org/wiki/دفع_بحري

[17] Mohammed alshadly, samh farhat (1 January 1984) "Diesel engines and their marine applications" ; knowledge facility.

[18] A. Tijani, N. Yusup, and A. Abdol Rahim (2014), "Mathematical modelling and simulation analysis of advanced alkaline electrolyzer system for hydrogen production", ScienceDirect Procedia Technology 15 798 – 806.

[19] Zeng , K., & Zhang , D.(2010). "recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications progress in energy and combustion" science,36(3),307-326.

[20] Hakim, L. Sylvia, N. Sari, R. (2020); "Production of hydrogen from sea water as renewable energy using the electrolysis method". International Journal of psychosocial Rehabilitation.: 1475-7192.

[21] Krishnan Rajeshwar, Robert McConnell (2008), Stuart Licht, Solar Hydrogen Generation Towards Renewable Energy Future. New York: Xspring +Business Media LLC;

[22] M. Rashid, M. Al Mesfer, H. Naseem, and M. Danish,. (2020). Hydrogen Production by Water Electrolysis: A Review of Alkaline Water Electrolysis, PEM Water Electrolysis and High